



HAL
open science

Mesure et suivi d'activité de plusieurs personnes dans un Living Lab en vue de l'extraction d'indicateurs de santé et de bien-être

Loic Sevrin

► **To cite this version:**

Loic Sevrin. Mesure et suivi d'activité de plusieurs personnes dans un Living Lab en vue de l'extraction d'indicateurs de santé et de bien-être. Biotechnologies. Université de Lyon, 2016. Français. NNT : 2016LYSE1162 . tel-01413106

HAL Id: tel-01413106

<https://theses.hal.science/tel-01413106>

Submitted on 9 Dec 2016

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

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



N° d'ordre NNT : 2016LYSE1162

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

École Doctorale ED 160
École Doctorale Électronique, Électrotechnique et Automatique EEA

Soutenue publiquement le 20/09/2016, par :
Loïc Sevrin

**Mesure et suivi d'activité de plusieurs
personnes dans un Living Lab en vue de
l'extraction d'indicateurs de santé et de
bien-être**

Devant le jury composé de :

Carrault Guy, Professeur des Universités, Université de Rennes 1	Rapporteur
Charpillat François, Directeur de Recherches, INRIA Nancy	Rapporteur
Bru-Chevallier Catherine, Directrice de recherche, INL	Examinatrice
Dantoine Thierry, Professeur des Universités, CHU Université de Limoges	Examineur
Fleury Anthony, Maitre de Conférences, École des Mines de Douai	Examineur
Noury Norbert, Professeur des Universités, Université Lyon 1	Directeur de thèse
Abouchi Nacer, Professeur des Universités, CPE Lyon	Co-directeur de thèse
Jumel Fabrice, Maitre de Conférence, CPE Lyon	Invité
Massot Bertrand, Maitre de Conférence, INSA Lyon	Invité
Saraydaryan Jacques, Maitre de Conférence, CPE Lyon	Invité

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

Président de l'Université

M. le Professeur Frédéric FLEURY

Président du Conseil Académique

M. le Professeur Hamda BEN HADID

Vice-président du Conseil d'Administration

M. le Professeur Didier REVEL

Vice-président du Conseil Formation et Vie Universitaire

M. le Professeur Philippe CHEVALIER

Vice-président de la Commission Recherche

M. Fabrice VALLÉE

Directeur Général des Services

M. Alain HELLEU

COMPOSANTES SANTE

Faculté de Médecine Lyon Est – Claude Bernard

Directeur : M. le Professeur J. ETIENNE

Faculté de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud – Charles Mérieux

Directeur : Mme la Professeure C. BURILLON

Faculté d'Odontologie

Directeur : M. le Professeur D. BOURGEOIS

Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

Directeur : Mme la Professeure C. VINCIGUERRA

Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation

Directeur : M. le Professeur Y. MATILLON

Département de formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine

Directeur : Mme la Professeure A-M. SCHOTT

COMPOSANTES ET DEPARTEMENTS DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Faculté des Sciences et Technologies

Directeur : M. F. DE MARCHI

Département Biologie

Directeur : M. le Professeur F. THEVENARD

Département Chimie Biochimie

Directeur : Mme C. FELIX

Département GEP

Directeur : M. Hassan HAMMOURI

Département Informatique

Directeur : M. le Professeur S. AKKOUCHE

Département Mathématiques

Directeur : M. le Professeur G. TOMANOV

Département Mécanique

Directeur : M. le Professeur H. BEN HADID

Département Physique

Directeur : M. le Professeur J-C PLENET

UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Directeur : M. Y. VANPOULLE

Observatoire des Sciences de l'Univers de Lyon

Directeur : M. B. GUIDERDONI

Polytech Lyon

Directeur : M. le Professeur E. PERRIN

Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique

Directeur : M. G. PIGNAULT

Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1

Directeur : M. le Professeur C. VITON

Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education

Directeur : M. le Professeur A. MOUGNIOTTE

Institut de Science Financière et d'Assurances

Directeur : M. N. LEBOISNE

Résumé

Mesure et suivi d'activité de plusieurs personnes dans un Living Lab en vue de l'extraction d'indicateurs de santé et de bien-être

Le vieillissement de la population est un phénomène mondial qui s'accompagne d'une augmentation du nombre de patients atteints de maladies chroniques, ce qui oblige à repenser le système de santé en amenant le suivi de santé et les soins au domicile et dans la cité. En considérant que l'activité est un signe visible de l'état de santé, cette thèse cherche à proposer un moyen technologique pour le suivi des activités de plusieurs personnes dans un living lab composé d'un appartement et de la cité qui l'entoure. En effet, le maintien d'une activité physique soutenue, et en particulier d'une activité sociale fait partie intégrante de la bonne santé d'une personne, il doit donc être étudié au même titre que les capacités à effectuer les activités de la vie quotidienne. Cette étude a permis la mise en place d'une plateforme de conception collaborative et de test grandeur nature autour de la santé à domicile et dans la cité : le living lab de l'INL. Ce dernier a été le théâtre de premières expérimentations permettant de valider la capacité du living lab à la fois de fusionner des données d'activité venant d'un ensemble de capteurs hétérogènes, mais également d'évoluer en intégrant des nouvelles technologies et services. Les scénarios collaboratifs étudiés permettent une première approche de l'analyse de la collaboration par la détection des présences simultanées de plusieurs personnes dans la même pièce. Ces résultats préliminaires sont encourageants et seront complétés lors de captures d'activité plus fines et incluant plus de capteurs dans les mois à venir.

Abstract

Activity measurement and monitoring of several people in a Living Lab in order to extract health and well being indicators

The ageing of the population is a global phenomenon which comes with an increase of the number of patients suffering from chronic diseases. It forces to rethink the healthcare by bringing health monitoring and care at home and in the city. Considering the activity as a visible indicator of the health status, this thesis seeks to provide technological means to monitor several people's activities in a living lab composed of an apartment and the surrounding city. Indeed, maintaining substantial physical activity, in particular social activity accounts for an important part of a person's good health status. Hence, it must be studied together with the ability to perform the activities of daily living. This study enabled the implementation of a platform for collaborative design and full-scale experimentation concerning healthcare at home and in the city : the INL living lab. The later was the theatre of preliminary experimentations which highlighted the living lab ability to perform activity data fusion from a set of heterogeneous sensors, and also to evolve by integrating new technologies and services. The studied collaborative scenarios enable a first approach of the collaboration analysis by detecting the simultaneous presence of several people in the same room. These preliminary results are encouraging and will be completed by more precise measurements which will include more sensors in the coming months.

Mots clés

E-santé, Capteurs biomédicaux, Traitement d'images de profondeur, Fusion de données, Suivi d'activités sociales

Keywords

E-health, Biomedical sensors, Depth Image Processing, Data fusion, Social activity monitoring

Le laboratoire INL

Cette thèse a été réalisée au sein du laboratoire Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL) UMR5270 <http://inl.cnrs.fr>, dirigé par Catherine Bru-Chevallier, et plus particulièrement au sein de l'équipe Capteurs Biomédicaux dirigée par Eric Mc Adams. Le laboratoire est présent sur les sites de l'École Centrale Lyon, de l'INSA de Lyon, de l'Université Claude Bernard Lyon 1 et de CPE Lyon. L'adresse du site de Lyon 1 est la suivante :

Bâtiment Léon Brillouin
6 rue Ampère
69621 VILLEURBANNE Cedex
France



Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier Guy Carrault, Professeur des Universités à l'Université de Rennes 1, ainsi que François Charpillet, Directeur de Recherches à l'INRIA Nancy qui ont accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs. Ces remerciements s'adressent également à Catherine Bru-Chevallier, Directrice de Recherche CNRS au laboratoire INL, pour avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je suis également très sensible aux présences de Thierry Dantoine, Professeur des Universités au CHU de Limoges, et de Anthony Fleury, Maître de Conférences à l'École des Mines de Douai qui ont accepté d'être examinateurs de mon jury.

Cette thèse n'aurait pas pu être réalisée sans le concours de nombreuses personnes que je tiens à remercier pour leur implication. En particulier, un grand merci à mes encadrants à commencer par Norbert Noury pour son investissement sans faille, son écoute attentive, son sens aiguisé de la synthèse, ses encouragements entre autres pour l'enseignement, et ses idées indénombrables et inspirantes. Merci à Nacer Abouchi pour ses conseils avisés, la motivation qu'il m'a transmise et ses recadrages minutieux et pertinents. Merci à Bertrand Massot, Fabrice Jumel et Jacques Saraydaryan pour leur implication dans des débats aussi variés que passionnants ainsi que pour leur expertise scientifique.

Je souhaite également remercier toute l'équipe capteurs biomédicaux qui m'a accueillie durant ces trois années très enrichissantes. Les échanges quotidiens furent un réel plaisir au sein de cette équipe dynamique, sympathique, motivée, ouverte et dont les compétences ne se limitent pas à la science, même si les panna cottas relèvent également de la chimie fine. Merci à Eric, Claudine, Arthur, Amalric, Lukas, Paco, Georges ainsi qu'aux nombreux stagiaires qui ont rythmé la vie de l'équipe, en particulier Romain et Jean-Baptiste qui m'ont aidé dans le développement logiciel pour le living lab.

Par ailleurs, je remercie chaleureusement le laboratoire INL, en particulier sa directrice Catherine Bru-Chevallier pour m'avoir fait confiance en m'attribuant cette bourse et pour son soutien dans l'organisation d'événements au sein du laboratoire comme les *journées des doctorants* ou la *fête de la science*. Un remerciement et un encouragement à poursuivre à l'Université de Lyon pour son implication dans la valorisation du doctorat, en particulier via le concours *Ma Thèse en 180 Secondes*, qui a été un véritable tremplin pour la poursuite de ma carrière.

Enfin, je souhaite remercier mon épouse, ma famille, mes amis qui m'ont soutenu, encouragé, questionné au cours de ce cheminement de trois ans à la fois passionnant, éprouvant et valorisant. Ce fut une aventure humaine dont je ressors avec plus de recul, énormément d'idées, des souvenirs plein la tête, une soif de connaissances et une volonté de les partager toujours plus grande, ainsi que des amitiés qui, j'en suis sûr, ne s'arrêteront pas à mon départ du laboratoire. Merci à tous !

Fais de ta vie un rêve, et d'un rêve une réalité.
Antoine de Saint-Exupéry

Table des matières

Introduction	9
1 État de l'art du suivi de l'activité et de la santé	12
1.1 Introduction	12
1.2 Quel est le lien entre activité et santé?	12
1.2.1 Qu'est-ce que la santé?	12
1.2.2 Le bien-être physique	13
1.2.3 Le bien-être mental et social	13
1.2.4 La grille AGGIR pour mesurer l'autonomie	13
1.2.5 L'homéostasie, équilibre du milieu intérieur	13
1.3 Les living lab et les appartements intelligents orientés santé	14
1.3.1 Que sont les living labs et les appartements intelligents?	14
1.3.2 Les différents types d'habitats intelligents en santé	15
1.4 Cahier des charges du suivi d'activité du living lab	21
1.4.1 Introduction	21
1.4.2 Contraintes techniques	21
1.4.3 Contraintes ergonomiques	22
1.4.4 Contraintes économiques	22
1.4.5 Bilan des contraintes du living lab	22
2 État de l'art des solutions de suivi de trajectoire à domicile	25
2.1 Introduction	25
2.2 Solutions de localisation embarquées	26
2.2.1 GPS	26
2.2.2 GSM et Wi-Fi	26
2.2.3 UWB	26
2.2.4 Beacons et RSSI	27
2.2.5 RFID passif	27
2.2.6 Ultrasons	28
2.2.7 Système hybride sur Wi-Fi	28
2.2.8 Système hybride RF et ultrasons	29
2.3 Solutions de localisation intégrées à l'habitat	30
2.3.1 Sol actimétrique	30
2.3.2 Capteurs infrarouge passifs	30
2.3.3 Caméra vidéo	30
2.3.4 Caméra stéréo et de profondeur	31
2.3.5 Imagerie Tomographique basée sur la Variance (VRTI)	32
2.4 Synthèse des solutions de localisation	32

3	Étude et caractérisation d'une solution à base de caméras de profondeur	34
3.1	Introduction	34
3.2	Les capteurs de la Kinect	34
3.3	Obtention des images de profondeur	35
3.4	Les logiciels utilisant la Kinect	37
3.5	Abstraction de la couche matérielle	38
3.6	Calibration pour localiser dans le référentiel de l'appartement	40
3.7	Fusion de trajectoires	44
3.7.1	Une distance pondérée pour échantillonnage variable	45
3.7.2	Comparaison des mesures de distance	45
3.7.3	Synchronisation des mesures	47
3.8	Synthèse de l'architecture logicielle et matérielle	47
3.9	Discussion	48
4	Un living lab pour le suivi des trajectoires de vie	50
4.1	Introduction	50
4.2	Le living lab comme exosquelette de ses occupants	51
4.3	Dépasser les limites de la localisation indoor	53
4.4	Étendre la localisation hors du domicile	53
4.4.1	Architecture évolutive du système de localisation indoor	53
4.4.2	Localiser à l'échelle nationale et mondiale	54
4.4.3	Le smartphone, un GPS dans toutes les poches	57
4.5	Intégration de capteurs physiologiques	57
4.6	Contextualisation par des capteurs d'environnement	59
4.7	Identifier les personnes détectées	60
4.8	Organisation des données stockées dans la base de données	61
4.9	Retour d'information en temps réel	63
5	Expérimentations	66
5.1	Introduction	66
5.2	Une première approche de détection d'activités collaboratives à domicile : l'unité spatio-temporelle	66
5.3	Fusion de données hétérogènes	73
5.3.1	Présentation de l'expérience	73
5.3.2	Lier les déplacements et la variation de la fréquence cardiaque	74
5.3.3	Influence de l'activité mentale sur l'activité cardiaque	77
5.4	Futures expérimentations à mener	78
	Discussion	78
A	Le modèle AGGIR	88
A.1	Les activités analysées dans le modèle AGGIR	88
A.2	Les groupes iso-ressources	88
B	Méthode alternative de projection des trajectoires des personnes dans un repère unique	90
B.1	Présentation de la méthode de projection en deux dimensions	90
B.2	Choix des points de calibration	91
C	Communications publiées durant cette thèse	93
C.1	Revue internationale	93
C.2	Conférences internationales	93
C.3	Conférence nationale	94
C.4	Autres communications nationales ou locales	94

Introduction

En 2060, l'Union Européenne comptera 30% de personnes de plus de 65 ans, c'est près de deux fois plus qu'aujourd'hui (18%) [EU, 2016]. Les taux de natalité et de mortalité baissent alors que l'espérance de vie augmente. En conséquence, la population européenne est de plus en plus âgée. Cette évolution démographique est visible sur la pyramide des âges qui s'inverse au cours du temps (Figure 1). En 1994, la population européenne était majoritairement jeune, la base de la pyramide était alors plus large. Au cours du temps, la tendance s'inverse avec une plus grande part de notre population âgée de 65 ans et plus.

Ce changement a plusieurs conséquences. On peut par exemple penser au système des retraites qui ne peut plus se baser sur un ratio de trois ou quatre actifs pour un retraité. Mais surtout, l'allongement de la durée de vie entraîne une évolution du système de santé. En effet, plus une personne est âgée, plus elle a de chance de souffrir d'une maladie chronique, voire de plusieurs de ces maladies (insuffisance cardiaque, diabète, maladie d'Alzheimer, maladie de Parkinson, etc.). Or, l'hôpital a été conçu pour traiter des crises. Dans l'idéal, un patient qui a un problème de santé est pris en charge pendant la durée de son traitement, puis retourne chez lui une fois guéri. Mais ce mode de traitement n'est pas adapté aux maladies chroniques qui s'étalent sur des durées très longues. Il est alors nécessaire que la personne malade puisse continuer à vivre avec sa maladie. Ceci est en partie facilité par les soins prodigués à domicile qui réduisent le besoin de séjours réguliers en milieu hospitalier.

En plus des soins à domicile, il est également souhaitable de pouvoir effectuer un suivi de santé régulier à domicile. Ce suivi pourrait servir à la fois à vérifier le rétablissement d'une personne suite à une opération ou à un traitement, mais aussi à prévenir l'apparition de problèmes de santé. En somme, il s'agit d'établir un indicateur global de l'état de santé de la personne au quotidien, sans que celui-ci ne nécessite la présence de personnel médical en continu. Cela permettrait aux personnes âgées de rester vivre plus longtemps à domicile, en bonne santé, en évitant un placement en maison de retraite souvent mal vécu. Par la même occasion, un tel système permettrait de réduire les hospitalisations d'urgence et les frais de santé importants qu'ils occasionnent.

Dans ce contexte, nous nous demanderons tout d'abord comment mesurer la santé à domicile et dans la cité. L'activité ne serait-elle pas un symptôme de l'état de santé ? Si oui, que mesurer de l'activité d'une personne et comment ? Par ailleurs, l'Homme vivant en société, ne faudrait-il pas également considérer les interactions qu'il peut avoir dans notre mesure d'activité ? Que peut apporter l'analyse des interactions sociales dans l'élaboration d'un baromètre de santé, et comment les mesurer ? L'analyse conjointe des trajectoires physiques des personnes peut-elle permettre d'extraire leurs trajectoires de vie, dont l'évolution pourrait être révélatrice d'anomalies ?

En supposant que ces trajectoires de vie puissent être analysées sur le long terme, c'est avant tout leur évolution qui compte. En effet, si une personne semble isolée socialement, cela n'est alarmant que si elle avait une vie sociale plus importante par le passé. Il n'existe pas de référence absolue d'une manière *normale* de se comporter au quotidien. Un système de suivi d'activité au quotidien doit donc être capable d'apprendre comment vivent les personnes suivies afin de dégager des tendances en fusionnant des informations variées reflétant l'activité humaine.

Au-delà du simple suivi d'activité, les lieux de vie de demain ne devraient-ils pas proposer des services innovants à leurs habitants (robotique de service, soutien aux aides de vie, etc.) ? Mais comment être au plus près du besoin des individus ? Les potentiels utilisateurs de ces innovations

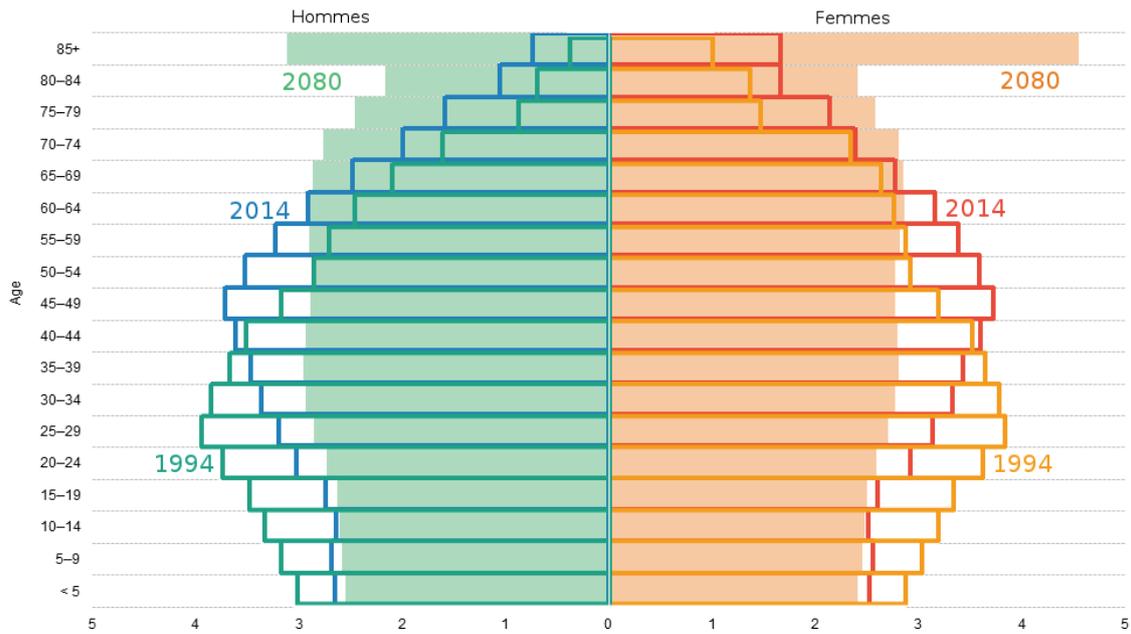


FIGURE 1 – Pyramides des âges de l’UE en 1994, 2014 et 2080 (estimations)

ne pourraient-ils pas être acteurs de l’innovation ? L’innovation collaborative et la co-conception avec des acteurs ayant des compétences et des appétences variées est au cœur du concept de living lab. C’est à la fois un lieu de vie intelligent et un laboratoire de recherche qui facilite l’émergence de nouvelles idées tout en permettant de les tester rapidement sur place. S’il est habituellement limité à l’appartement, nous avons choisi d’étendre son périmètre à la cité afin de couvrir une large partie des activités quotidiennes. Un tel environnement ne serait-il donc pas propice à améliorer le suivi de santé au jour le jour, tout en familiarisant les futurs utilisateurs aux technologies récentes qui seront demain dans tous les foyers ?

Cette réflexion nous amènera dans le premier chapitre à étudier le lien entre activité et santé, afin de savoir s’il est envisageable d’obtenir un baromètre de santé en se basant sur des mesures d’activité des personnes. Dans le deuxième chapitre, nous analyserons un des indicateurs d’activité à fort potentiel : la trajectoire physique des individus. Cette trajectoire pouvant être analysée à la fois relativement aux pièces d’un logement ou aux équipements (lit, douche, évier, etc.), mais également par rapport aux trajectoires des autres personnes pour inclure une composante sociale dans notre étude. Le troisième chapitre sera l’occasion de tester la pertinence de caméras de profondeur pour effectuer le suivi des trajectoires des personnes à domicile. Ce système sera intégré dans le cadre plus large du living lab au cours du quatrième chapitre. Cette intégration fera l’objet de réflexions sur la relation entre un appartement intelligent et ses habitants, pour les servir au mieux. En effet, d’autant plus qu’il sera facilement compréhensible par ses occupants, cet environnement intelligent sera également l’occasion de mettre à disposition d’utilisateurs variés des mesures d’activité permettant de susciter l’innovation dans le domaine de la santé à domicile. Enfin, le cinquième chapitre sera l’occasion d’utiliser le living lab au travers de scénarios de vie réalistes permettant de vérifier les capacités du living lab à suivre les trajectoires des personnes au quotidien. Ces expérimentations permettront également de mieux comprendre les points forts et les manques d’un tel système de suivi d’activité, afin de mieux orienter les recherches futures catalysées par un living lab évolutif, modulaire et dynamique.

1

État de l'art du suivi de l'activité et de la santé

1.1 Introduction

Le but de ce travail de thèse est d'extraire des indicateurs de santé et de bien-être à partir de l'activité de personnes. Ce chapitre présente tout d'abord les liens entre activité et santé qui permettent d'envisager un tel suivi. Les personnes âgées étant considérées comme une population à risque concernant l'évolution de leur état de santé, de nombreux exemples illustrant nos propos ciblent cette population. Cependant, afin de pouvoir analyser au mieux une évolution de l'état de santé de sujets, il est préférable de commencer l'analyse bien en amont. Cette étude ne se limite donc pas au cas des séniors.

Une fois ces liens entre activité et santé clairement établis, cet état de l'art se focalise sur le suivi de la santé et de l'activité à domicile. Dans ce cadre, les maisons intelligentes (*smart home*) et les living labs sont devenus les lieux d'expérimentations privilégiés pour le suivi de l'activité et de la santé. Un historique de ces maisons-laboratoires est proposé, ainsi qu'une comparaison des deux approches respectives qu'ils proposent.

Une fois les lieux d'expérimentation décrits, les différents paramètres qu'il est possible de suivre ainsi que les capteurs associés sont présentés. Ceux-ci peuvent être des paramètres physiologiques, physiques, environnementaux, etc. Une classification des Habitats Intelligents pour la Santé (HISs) en fonction des types de données mesurées et des services fournis est proposée.

En conclusion de ce chapitre, en prenant en considération les différents éléments de ce premier état de l'art, les contraintes imposées à notre système de suivi d'activité à domicile sont décrites.

1.2 Quel est le lien entre activité et santé ?

1.2.1 Qu'est-ce que la santé ?

Étant donné que cette étude cherche à mettre en place un suivi de la santé de plusieurs personnes, il est nécessaire d'objectiver la notion de santé. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), "la santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité" [WHO, 1950]. Par ailleurs, les activités de la vie quotidienne, ou *Activities of Daily Living (ADL)* en anglais, sont définies comme les activités nécessaires pour prendre soin de soi. Par exemple : se nourrir, se laver, aller aux toilettes, s'habiller,

ou prendre soin de son apparence. Dans ce cadre, activités de la vie quotidienne et santé sont-elles liées ?

1.2.2 Le bien-être physique

Le bien être physique de la définition de l’OMS est directement lié à l’activité. En effet, une personne souffrant physiquement va être moins encline à effectuer les ADL. Au contraire, une personne en bonne santé physique effectuera ces mêmes activités sans difficulté.

En allant plus loin, un entraînement physique de résistance musculaire appliqué, par exemple, à des personnes âgées permet d’augmenter significativement la masse musculaire, la force et la puissance. Il réduit ainsi les difficultés à réaliser les ADL [Hunter et al., 2012]. Une bonne santé physique permet donc non seulement d’effectuer plus facilement les ADL, mais elle est aussi entretenue par ces mêmes activités, surtout dans le cadre d’un entraînement plus poussé. La lutte contre l’obésité et le diabète passe également par le maintien, voire l’intensification de l’activité physique [Erlichman et al., 2002].

1.2.3 Le bien-être mental et social

Le bien-être mental défini par l’OMS apparaît clairement comme relié aux activités de la vie quotidienne par la notion d’estime de soi. Une personne capable, par exemple, de s’habiller seule ou de se verticaliser gardera une meilleure estime d’elle-même et un meilleur moral que si sa dépendance augmente. La relation avec le bien-être social est alors évidente puisque l’estime de soi est reliée à l’image de soi que l’on présente aux autres [Bonder and Dal Bello-Haas, 2008]. Ainsi, le bien-être social est très relié à la capacité d’un sujet à effectuer les ADL.

Par ailleurs, l’activité peut également aider au maintien d’une bonne santé mentale. En effet, une étude effectuée pendant deux ans sur des personnes de 65 à 69 ans a démontré l’efficacité de la marche quotidienne pour réduire les risques de dépression [Fukukawa et al., 2004]. Ces effets n’ont cependant pas été constatés chez les personnes plus jeunes (40 à 64 ans). Dans le cadre de notre étude qui vise plus particulièrement une population âgée, cet effet montre l’importance du lien entre l’activité et le bien-être mental et social.

À l’inverse, certaines maladies telles que la maladie d’Alzheimer ont des conséquences directes sur l’activité des personnes. En effet, un individu en bonne santé effectuera les ADL de manière cyclique. Ces rythmes circadiens ont été mis en évidence par Noury et al. [Virone et al., 2002, Noury et al., 2011a]. Ils montrent également qu’une personne souffrant de la maladie d’Alzheimer aura un comportement erratique, sans périodicité claire. Une dérive dans l’activité d’un individu pourrait-elle alors être un symptôme précurseur d’un problème de santé mentale ?

1.2.4 La grille AGGIR pour mesurer l’autonomie

En France, pour mesurer l’autonomie des personnes (principalement âgées), la grille AGGIR (Autonomie Gérontologique et Groupes Iso-Ressources) est utilisée [Assurance Maladie, 2008]. Celle-ci permet de classer le niveau d’autonomie des personnes entre GIR 1 : extrêmement dépendante et GIR 6 : complètement indépendante (voir annexe A). Le classement d’une personne en GIR 1 à 4 permet d’attribuer une *Allocation personnalisée d’autonomie (APA)*, de l’ordre d’un salaire pour une personne GIR 1 [France, 2016]. **L’autonomie est donc considérée par les pouvoirs publics comme un indicateur crédible du niveau de santé d’une personne.** L’hypothèse d’un lien entre l’activité et l’autonomie (et donc la santé) est ainsi renforcée.

1.2.5 L’homéostasie, équilibre du milieu intérieur

Ce lien avéré entre activité et santé est également à relier avec l’homéostasie. Ce nom vient de deux mots grecs : *homoios* qui signifie similaire, et *stasis* qui signifie stabilité, action de se tenir debout. Cette notion, décrite par Claude Bernard en 1865 [Bernard, 1865], est le processus visant à maintenir la stabilité interne du corps humain face aux changements de l’environnement. Ce physiologiste avait également démontré qu’un dérèglement de l’homéostasie se traduisait par des

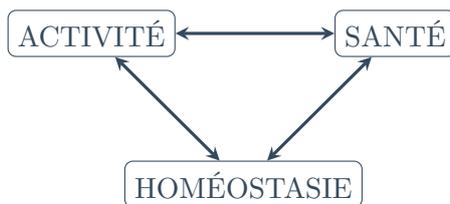


FIGURE 1.1 – Lien entre santé, activité et homéostasie

manifestations pathologiques. Être en bonne santé devient, selon Claude Bernard, une capacité dynamique de notre corps à déclencher des réactions appropriées, efficaces, et rapides aux variations extérieures.

Il y a donc un lien entre la santé, l'activité et l'homéostasie (Fig. 1.1). À la fois la santé influe sur l'activité, mais l'activité physique et mentale, potentiellement avec des interactions sociales, influe également sur la santé dans un équilibre global représenté par l'homéostasie.

Le fait que ces trois éléments soient interdépendants montre la pertinence de se baser sur le suivi d'activité pour effectuer un suivi de santé des acteurs puisque cela revient à se baser sur les symptômes visibles d'une variation de l'homéostasie et de l'état de santé. L'analyse de l'activité des sujets doit se baser sur les activités de la vie quotidienne, à commencer par celles effectuées au domicile, point central de la vie d'une personne, surtout chez les seniors qui sont plus concernés par ce type de suivi [Noury et al., 2011b, Noury, 2014].

Les living labs et les smart homes sont les plateformes de test privilégiées pour un tel suivi à domicile. Nous allons maintenant chercher à analyser leurs spécificités, leurs évolutions, leurs applications et les services qu'ils proposent.

1.3 Les living lab et les appartements intelligents orientés santé

1.3.1 Que sont les living labs et les appartements intelligents ?

Les living labs et les habitats intelligents (ou smart homes) se caractérisent par l'instrumentation de l'habitat pour le rendre plus intelligent et mieux servir ses occupants. Cependant, les approches méthodologiques et les objectifs respectifs diffèrent [Noury et al., 2015].

Les habitats intelligents ont vocation à ajouter de l'intelligence dans l'habitat, par des systèmes automatisés. Ceux-ci sont composés de capteurs et d'actionneurs connectés en réseau. Parmi les premiers exemples, on trouve les premiers interphones ou sonnettes déportées qui facilitaient la gestion des visites dans les grandes demeures. Ces maisons facilitaient la vie des habitants, mais n'avaient pas de vocation à effectuer un suivi de santé. La recherche sur les Habitats Intelligents pour la Santé (HISs) a commencé plus tard, au milieu des années 80 au Japon [Noury et al., 2011b]. De par sa population vieillissante, ce pays était logiquement précurseur dans cette démarche visant à permettre aux personnes âgées de continuer à vivre chez elles en bonne santé, le maintien prolongé de l'autonomie étant favorisé par des habitats intelligents proposant des services dans le domaine de la santé.

Les living labs sont une évolution du concept visant à en faire des lieux de recherche. Ils placent l'utilisateur final au centre du processus d'innovation pour les habitats intelligents. L'idée est de faciliter l'émergence d'idées, ainsi que d'offrir des fonctionnalités de prototypage rapide des solutions technologiques afin d'évaluer immédiatement l'impact de leur utilisation. Des focus groups (ou groupes de discussion) mis en place dans un living lab permettent de tester rapidement un produit en phase de conception, d'exprimer ou d'objectiver un besoin, etc. Ces living labs peuvent avoir différentes orientations. En particulier, les living labs spécialisés en santé permettent le prototypage rapide de systèmes de suivi de santé à domicile. Par exemple, il est ainsi possible de vérifier, très en amont du développement, l'acceptabilité ou la pertinence d'un nouveau lit médicalisé pour le domicile auprès des utilisateurs finaux.

Les systèmes de suivi de santé et d'assistance sont donc similaires dans les deux cas. La

différence se fera principalement sur les périodes où l'utilisateur final sera présent. Il influera sur la conception dans un living lab, alors qu'il ne sera qu'utilisateur du produit fini dans un habitat intelligent. L'état de l'art des différents types d'HIS et de living lab est donc en grande partie assimilable à celui sur les HISs.

1.3.2 Les différents types d'habitats intelligents en santé

En 2008, Demiris et al. [Demiris and Hensel, 2007] a proposé une classification des HISs en six catégories :

- Suivi Physiologique (Phys)
- Suivi fonctionnel, détection d'urgence et réaction (Fc)
- Suivi des risques et assistance (Ris)
- Suivi des menaces et assistance (Men)
- Suivi et soutien des interactions sociales (Soc)
- Aide cognitive et sensorielle (Cog)

Ces catégories correspondent à différents besoins des habitants d'un HIS. Elles permettent d'analyser les manières de répondre à un besoin en particulier, entre autres en identifiant les types de capteurs les plus pertinents. Ces différentes catégories sont décrites et illustrées par des exemples dans les parties qui suivent.

Suivi physiologique (Phys)

Le suivi physiologique est caractérisé par la collecte et l'analyse de données de mesures physiologiques telles que les signaux de battement cardiaque, respiration, température, tension artérielle, le taux de sucre dans le sang, etc. [Demiris and Hensel, 2007]. Ces données ont l'avantage d'être connues par les médecins. En effet, ce sont des paramètres qui sont utilisés pour établir des diagnostics en cabinet médical ou à l'hôpital. En revanche, les médecins ne sont pas ou peu formés sur le suivi de ces paramètres physiologiques sur le long terme. Ils savent analyser un signal ECG sur quelques minutes, mais auront beaucoup plus de mal à exploiter les mêmes données sur plusieurs jours. L'extraction automatique d'indicateurs de plus haut niveau à partir des signaux mesurés est donc nécessaire.

Ce type de mesures est proposé par le projet MPIGate [Cruz-Sanchez et al., 2012] qui intègre plusieurs capteurs physiologiques du commerce connectés en Bluetooth dont un oxymètre et un tensiomètre faisant des mesures au poignet, et un thermomètre tympanique. Ces mesures sont faites plusieurs fois par jour, mais pas en continu.

Les capteurs étant embarqués sur la personne, ils sont invasifs et limités en durée de vie par leur batterie. Un suivi en continu jour et nuit implique alors l'obligation de recharger le système pendant qu'il est porté par le patient. Il est à noter que cette limite n'est jamais atteinte car un capteur ne peut être supporté par un sujet en continu sur le long terme. La limite est alors l'impossibilité de conserver le capteur en continu. Cependant, ces capteurs ont l'avantage d'être pervasifs, ils suivent le sujet partout où il va. Ceci implique que ce type de suivi n'est pas forcément limité à l'intérieur des HIS, tout en pouvant y être associé. C'est le cas du capteur d'activité électrodermale développé par Ayzenberg et al. [Ayzenberg and Picard, 2014] qui permet des mesures tout au long de la journée. Le téléchargement des données vers le système central est alors effectué chaque soir au domicile. Une solution hybride a également été proposée par Massot et al. [Massot et al., 2015] où le capteur placé sur le torse (figure 1.2) communique les données de fréquence cardiaque, d'intervalle R-R¹ et de variabilité cardiaque en temps réel avec le téléphone du sujet. Celui-ci peut alors stocker les données ou les transmettre directement à un système central.

La fusion de données provenant de plusieurs capteurs embarqués au sein d'un Body Area Network (BAN), aussi appelé Body Sensor Network (BSN), peut permettre de proposer une analyse plus fine de l'état de santé. Il est par exemple possible d'associer la mesure d'ECG, de

1. L'intervalle R-R correspond à la période instantanée d'un signal électrocardiogramme (ECG). Elle se mesure entre les instants les plus repérables du signal, les pics, qui sont référencés comme les points R.

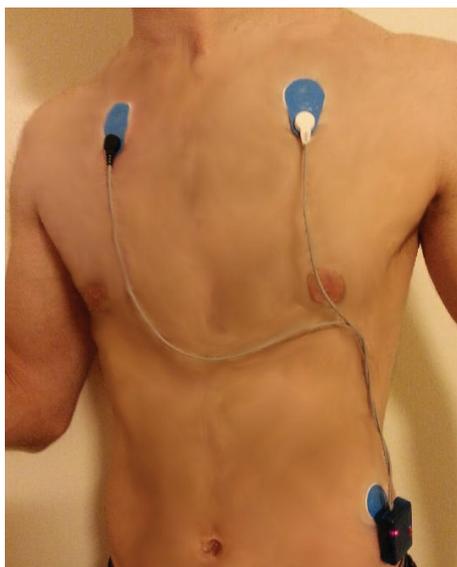


FIGURE 1.2 – Le capteur d’ECG REC@MED

température, d’humidité de la peau, et d’accélérométrie [Kantoch, 2013]. Kantoch et al. a ainsi montré la pertinence de ces données fusionnées pour mettre en place un service de télémédecine.

Suivi fonctionnel, détection d’urgence et réaction (Fc)

Cette catégorie est caractérisée par la collecte et l’analyse de données relatives à des mesures fonctionnelles telles que le niveau général d’activité, les mouvements, la marche, la prise de repas, et autres activités de la vie quotidienne (ADL). La détection d’urgence est rendue possible par la collecte de données indiquant des situations anormales ou critiques telles que la chute [Demiris and Hensel, 2007].

Cette définition fait apparaître deux types de services pouvant être apportés au sujet :

- Le suivi long terme de l’activité permettant de dégager des tendances.
- L’émission d’alertes en cas de situation critique.

Ce suivi peut donc avoir un rôle de prévention ou de traitement de l’urgence. Ces deux aspects sont assimilés par Noury et Al à différents niveaux de granularité de l’information [Noury et al., 2011b]. Les alarmes nécessitent un niveau de granularité microscopique pour permettre la détection d’événements se déroulant sur un temps très court comme la chute. Au contraire, l’analyse sur le long terme peut se faire avec une granularité macroscopique.

Il est ainsi possible de suivre un dérivé de l’activité d’une personne par un simple capteur placé sur le compteur électrique d’un appartement. L’analyse de la puissance instantanée indique les équipements en marche (ampoules électriques comprises), ce qui reflète l’activité de l’habitant [Noury et al., 2011a]. Il est à noter que ce type d’analyse est en cours de déploiement massif en France par ERDF via le compteur communiquant Linky (figure 1.3) qui équipera trente-cinq millions de foyers français à l’horizon 2021 et permettra une relève à distance de la consommation [Duplex et al., 2013]. Celui-ci profitera également de la fusion des données récupérées sur l’ensemble du territoire français pour affiner ses analyses. Le suivi d’activité peut également utiliser des capteurs plus précis, permettant par exemple de suivre plusieurs personnes dans un appartement. C’est le cas du projet Gator [Helal et al., 2005] qui utilise de nombreux capteurs disséminés dans l’habitat, dont un sol intelligent qui localise les personnes se déplaçant dessus (figure 1.4).

Concernant la détection de chute, qui nécessite une granularité microscopique, de nombreux systèmes ont été développés. Ceux-ci utilisent différents capteurs qui peuvent être embarqués comme les centrales inertielle [Noury et al., 2007], ou placés dans l’appartement comme des caméras vidéo [Cucchiara et al., 2007] ou de profondeur [Stone and Skubic, 2015]. Il est à noter que pour la remontée d’alarmes suite à une chute par exemple, l’existence de zones non couvertes



FIGURE 1.3 – Un compteur Linky

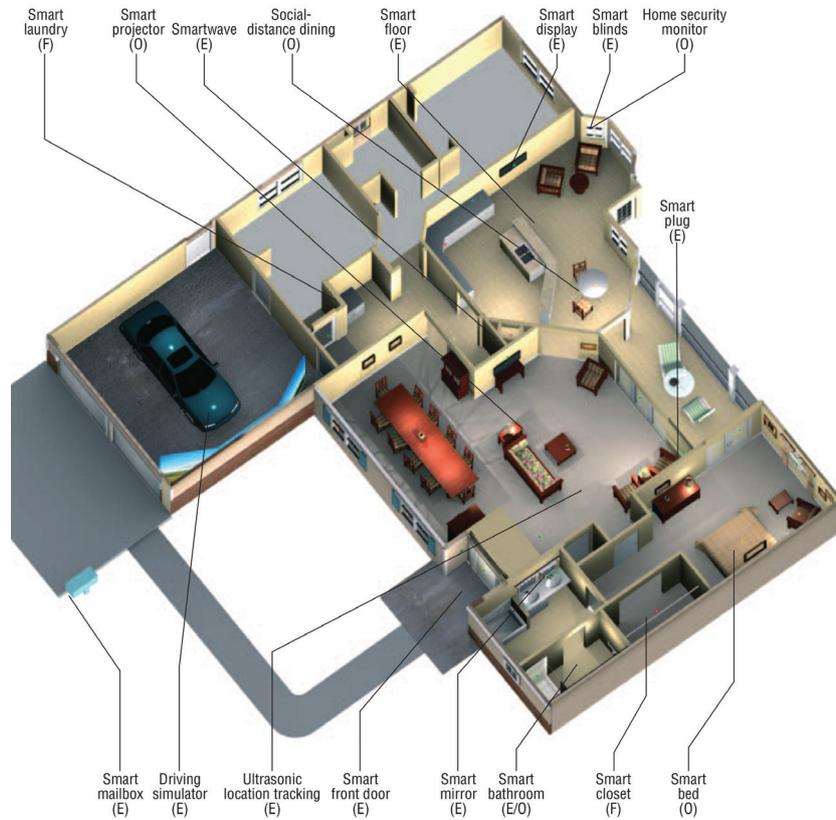


FIGURE 1.4 – La maison intelligente Gator

est rarement admissible car elle entraînerait un risque important de non détection (faux négatif). De ce fait, la détection d'urgence par caméra a des limites inhérentes à la quasi-impossibilité de couvrir l'intégralité d'un appartement.

Suivi des risques et assistance (Ris)

Le suivi des risques et assistance est caractérisé par la collecte et l'analyse de données relatives à des mesures de risques liés à l'environnement tels que les feux et les fuites de gaz. Les sécurités proposées incluent l'allumage des lumières de la salle de bain quand une personne se lève de son lit la nuit pour réduire le risque de chute. Les technologies de localisation visant la sécurité sont également incluses dans cette catégorie [Demiris and Hensel, 2007].

Cette partie met en avant l'importance de la mesure de paramètres environnementaux dans un souci de contextualisation, de fusion de données. Le fait qu'il fasse froid dans l'appartement ou que la lumière soit éteinte ne sont que des risques qui ne sont en rien alarmants en l'absence de l'occupant. Au contraire, quand l'habitant est mis en présence d'un risque, il peut être pertinent de déclencher une alarme. Le projet Gator propose par exemple de détecter les fuites de gaz ou la température de l'eau du bain [Helal et al., 2005]. Une alerte est émise quand un des acteurs est en situation de danger.

Cette analyse de capteurs environnementaux peut être transposée dans le suivi sur le long terme de l'activité puisqu'elle permet de situer les données dans leur contexte.

Suivi des menaces et assistance (Men)

Le suivi des menaces et assistance est caractérisé par les mesures détectant des menaces humaines comme des intrusions. Les assistances incluent les réponses aux menaces identifiées [Demiris and Hensel, 2007].

Les systèmes de détection d'intrusion peuvent par exemple se baser sur des systèmes de vidéosurveillance. Pour automatiser le système, l'identification des personnes est alors nécessaire pour éviter d'émettre une alerte quand les habitants de l'appartement sont à leur domicile. Une approche intermédiaire proposée par Withings propose de détecter toute présence dans des périodes de temps définies par l'utilisateur et d'enregistrer ou d'envoyer les images pour permettre de contacter les secours ou les services d'ordre en cas d'intrusion [Withings, 2016].

Cette catégorie est légèrement en marge des autres puisque non directement reliée à la santé du sujet. Cependant, un tel système peut tranquilliser une personne, ce qui lui permettra de se comporter plus librement.

Suivi et soutien des interactions sociales (Soc)

Le suivi et le soutien des interactions sociales est caractérisé par la collecte et l'analyse de données relatives aux interactions sociales comme les appels téléphoniques, les visiteurs, et la participation à des activités. L'aide aux interactions sociales inclut les technologies qui facilitent ces interactions, telles que les outils de communication vidéo avec des amis ou des proches, de téléprésence pour participer à des activités de groupe, etc. [Demiris and Hensel, 2007]. Cette catégorie peut donc être séparée en deux sous-parties :

- Suivi et soutien des interactions sociales directes (Soc Dir) où les interactions sont analysées entre des personnes se trouvant à proximité physique.
- Suivi et soutien des interactions sociales indirectes (Soc Ind) où les interactions virtuelles, à distance, sont analysées.

Les interactions sociales proposées et analysées les plus classiques sont des communications par vidéo [Junestrand et al., 2003]. Il est aussi possible d'améliorer l'immersion pour partager un dîner à distance [Helal et al., 2005]. Le lien social peut aussi être maintenu d'une manière plus pervasive par l'utilisation d'un robot de téléprésence qui suit l'habitant chez lui en proposant une conversation audio et vidéo avec des proches. C'est par exemple ce que propose le projet européen Giraffplus (figure 1.5) [Coradeschi et al., 2013]. Le living lab ActivAgeing propose un système similaire en partenariat avec le projet européen TERESA, et envisage même l'analyse



FIGURE 1.5 – Le robot Giraffplus permettant une interaction audio et visuelle avec des personnes distantes

des interactions sociales, sans pour autant préciser d’approche méthodologique ou technologique [Voilmy and Duchêne, 2013].

Au contraire, aucun HIS à notre connaissance n’analyse les interactions sociales lors d’activités collaboratives au sein de l’appartement.

Aide cognitive et sensorielle (Cog)

Les services d’assistance cognitive incluent ceux de rappel automatique (de prise de médicament par exemple), de localisation de clés, etc., pour des personnes ayant des troubles de la mémoire. Ces technologies incluent également les guides (vocaux par exemple) dans l’exécution de tâches. L’assistance sensorielle inclut les technologies aidant les personnes ayant des troubles de la perception pour la vue, l’ouïe, et le toucher (e.g. la température de l’eau du bain) [Demiris and Hensel, 2007].

Le projet Domus au Québec considère et traite quatre catégories de déficiences cognitives :

- déficience d’initiative
- déficience d’organisation et de planification
- déficience d’attention
- déficience de mémoire

Le comportement des habitants de l’appartement est analysé pour offrir de l’assistance face à ces déficiences. L’analyse du comportement est effectuée à l’aide de différents capteurs. Les portes et tiroirs sont équipés de capteurs de fermeture. Certains objets sont localisés par des tags Ultra-Wideband (UWB) et Radio-frequency identification (RFID). Les mesures de débit d’eau permettent d’analyser l’utilisation des robinets. La consommation électrique est également mesurée. Enfin, les habitants sont localisés à l’aide de détecteurs infrarouges, ainsi que de tapis localisant plus précisément sur les zones les plus importantes (devant l’évier par exemple). La fusion de données extraites de ces capteurs permet de détecter les Activities of Daily Living (ADL) effectuées par les habitants et de les contextualiser.

L’assistance cognitive est effectuée pour des tâches sélectionnées à l’avance et décomposées en sous-tâches à détecter. Ces détections peuvent alors déclencher une assistance. Lorsqu’une des déficiences citées ci-dessus est détectée, la personne est assistée par des messages vocaux et/ou visuels avec lesquels il est possible d’interagir. Le besoin d’assistance de la personne est alors précisé et validé. Par exemple, si la personne ne sait plus où elle a placé ses clés, la localisation par tags permet de solutionner le problème et de réduire l’impact de la déficience.

Répartition des projets par catégories

Afin d'analyser les catégories de HIS les plus développées, 27 projets de HIS débutés entre 1994 et 2012 ont été analysés et classés. Le résultat est proposé dans le tableau 1.1.

La variété des projets menés montre que le sujet des HISs existe depuis plus de 20 ans et a une ampleur mondiale. Il a atteint une certaine maturité, tout en restant complètement d'actualité. Ce constat est logique dans la situation de vieillissement de la population que le monde (surtout les pays développés) connaît en ce moment même, comme décrit dans le chapitre Introduction. Il est nécessaire de déplacer la gestion et le suivi de la santé de l'hôpital vers le domicile. Le nombre important de recherches et les budgets importants associés à ce sujet montrent que ce problème est loin d'être résolu. Le défi santé est d'ailleurs un enjeu majeur du programme européen Horizon 2020.

La liste des HISs analysée ici n'a pas vocation à être exhaustive. Les statistiques qui en sont tirées ne doivent pas être considérées comme absolues. Cependant, les projets référencés sont répartis sur plusieurs continents et plusieurs décennies afin d'obtenir une image relativement objective de la répartition des habitats intelligents en santé selon les catégories présentées.

Les statistiques sur la répartition de ces 27 HIS parmi les catégories proposées sont résumées dans le tableau 1.2.

La vie sociale d'un individu est un élément important de sa bonne santé. Nous l'avons déjà évoqué, entre autres par la définition de la bonne santé par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui parle de "bien-être social". La catégorie suivi et soutien des interactions sociales (Soc) revêt donc un intérêt majeur. Elle est d'ailleurs assez bien représentée parmi les projets de HIS cités (28% des projets, répartis entre 1999 et 2013). Parmi ces systèmes, il est intéressant de distinguer ceux analysant les interactions directes (quand des personnes sont physiquement présentes dans le même espace) de ceux analysant les interactions indirectes (à distance).

L'analyse des interactions directes apparaît intuitivement comme la plus pertinente des deux. En effet, la vie sociale d'un sujet est avant tout liée aux personnes qu'il côtoie physiquement. Il paraît donc pertinent de chercher à suivre les interactions sociales d'un sujet avec son entourage physique et pas seulement virtuel. C'est sur cette partie des interactions sociales que nous allons nous focaliser.

Remarquons que, comme précisé précédemment, l'intégralité des systèmes cités se focalisent sur les interactions indirectes. C'est effectivement l'analyse la plus simple à mettre en place. Par exemple, en mesurant le nombre de conversations téléphoniques ou les personnes avec qui le sujet communique, y compris via les réseaux sociaux. Aucun de ces projets ne cherche à analyser les interactions sociales entre les personnes vivant sous le même toit ou ayant une activité commune. L'étude des interactions sociales directes que nous proposons apparaît donc comme particulièrement novatrice, même si l'approche existante basée sur les interactions à distance apporte déjà des données pertinentes sur le niveau de socialisation d'une personne.

L'analyse d'activités collaboratives se base logiquement sur le suivi d'activité des différents acteurs au domicile. Une telle réalisation doit donc se baser sur des systèmes existants de suivi fonctionnel, physiologique et des risques déjà mis en place dans des living labs et HISs, afin de profiter au mieux des travaux précédents. Ces catégories étant bien plus représentées que le suivi des interactions sociales, la réutilisation et le détournement de systèmes existants devrait permettre une mise en place rapide d'un premier système de détection de coopération et de socialisation des individus dans leur lieu de vie. La réalisation d'un tel système au sein d'un living lab semble alors pertinente, d'autant plus qu'il servira de base pour de prochaines études menées au laboratoire dans les années à venir, lesquelles pourront porter sur l'analyse de la collaboration et des interactions sociales, sans pour autant y être limitées.



FIGURE 1.6 – Une activité sociale comme un repas implique des positions proches, contrairement à une activité solitaire

1.4 Cahier des charges du suivi d'activité du living lab

1.4.1 Introduction

L'état de l'art des HIS a montré le manque d'analyse des activités à caractère social dans le suivi d'activité et de santé d'une personne. Un tel suivi n'est pas complètement décorrélé des autres systèmes existants. En effet, l'analyse de la collaboration est liée à l'étude des activités effectuées. Il reste donc nécessaire d'identifier les ADL réalisées par les différents acteurs.

Partant du constat que nous dormons dans notre chambre, que nous mangeons dans la salle à manger, ou encore que nous nous lavons dans la salle de bain, il apparaît comme évident que la trajectoire d'une personne dans et hors de son logement est un indicateur majeur de son activité. Le lien avec les interactions sociales apparaît clairement sur la figure 1.6 où pratiquer une activité sociale comme un repas implique de se trouver à plusieurs autour de la table, donc est repérable par une analyse de trajectoires. De même, une personne seule devant sa télévision montre une absence d'activité sociale, aussi détectable par une analyse des trajectoires des personnes présentes.

La détection des positions des personnes est d'ailleurs utilisée dans plusieurs des HIS présentés dans la partie 1.3.2 [Giroux et al., 2008, Helal et al., 2005, Cook et al., 2003]. Le premier service que va fournir le living lab est donc un système de suivi des trajectoires des personnes dans l'appartement.

1.4.2 Contraintes techniques

Le living lab devra pouvoir analyser des collaborations, ou du moins la présence simultanée de plusieurs personnes proches les unes des autres. Il est donc nécessaire qu'un tel système puisse localiser plusieurs personnes simultanément, y compris dans la même pièce. La cible principale d'un tel système est un public de séniors vivant seuls ou en couple. En considérant, outre le sujet lui-même, son conjoint, son aide de vie, son infirmière et un visiteur, on voit que l'on peut couvrir la majorité des situations si l'on peut prendre en compte un maximum de 5 occupants de l'appartement à un moment donné. Ainsi, c'est cette contrainte du suivi de cinq personnes, présentes simultanément dans l'appartement, qui a été choisie empiriquement.

La localisation de personnes dans l'habitat se rapporte principalement à une classification spatiale (où chaque pièce est une classe) et à des interactions (avec des équipements ou d'autres personnes). C'est pourquoi nous avons besoin d'une résolution qui corresponde à la "sphère d'interaction" d'un sujet, c'est-à-dire une résolution d'un demi-mètre, cohérente avec la zone dans laquelle une personne interagit aisément et sans gêne avec d'autres [Kennedy et al., 2009].

Même si ce premier système cherchera à localiser les acteurs à l'intérieur du living lab, la localisation hors de l'appartement pourrait apporter des données complémentaires non négligeables. Le système de localisation indoor devra donc être compatible avec un système de localisation outdoor tel que le Global Positioning System (GPS).

1.4.3 Contraintes ergonomiques

Le living lab utilisé pour cette thèse sera une maquette d'appartement à taille réelle où les aménagements sont facilités. Personne ne vivra en permanence à l'intérieur, des faux plafonds seront aménagés, les sols pourront être changés, etc. Cependant, tout le système mis en place devra être facilement transposable dans un autre appartement, par exemple pour permettre des tests sur le long terme dans un véritable appartement existant, où changer complètement le sol n'est pas envisageable.

Afin d'éviter un rejet de la part des potentiels utilisateurs, il est également nécessaire de considérer l'acceptabilité du système final. Celui-ci devra donc être peu invasif en évitant tout appareil implanté sous la peau et, tant que possible, en limitant tout équipement que devrait porter un sujet. Le système devra également être peu intrusif. C'est à dire être discret de manière à ne pas modifier le comportement des acteurs, du moins à l'issue d'une période d'adaptation de quelques jours.

C'est aussi dans la gestion des données privées que l'intrusivité doit être jugée. En effet, quelle que soit la solution technique choisie, les données captées et analysées pourront relever de la vie privée des personnes suivies. Il est donc indispensable de garantir un haut niveau de confidentialité dans le cas de l'arrivée du produit final sur le marché. Les premières preuves de concept pourront s'affranchir partiellement de cette contrainte, mais sans la négliger afin d'être sûr de pouvoir ajouter cette sécurité par la suite.

1.4.4 Contraintes économiques

Pour finir, notre système devra répondre à plusieurs besoins. À la fois nos aînés souhaitent rester vivre chez eux le plus longtemps possible, mais c'est également un besoin financier. Le placement en maison de retraite coûte très cher, 2200€ par mois en moyenne pour le résident en plus de l'allocation personnalisée d'autonomie [Inspection générale des affaires sociales, 2009]. Il est alors primordial qu'un système de suivi de santé à domicile comme notre living lab réduise sensiblement ces coûts lors d'une installation chez l'utilisateur final.

1.4.5 Bilan des contraintes du living lab

Afin d'analyser l'activité de plusieurs personnes simultanément et de chercher à déceler des indicateurs de collaboration entre les acteurs, le living lab sera équipé en premier lieu d'un système de suivi de trajectoire des personnes au sein de l'appartement. L'ensemble des contraintes à respecter lors de la conception et de la mise en place de ce système est synthétisé dans la table 1.3. Ces contraintes vont maintenant permettre de sélectionner la solution de suivi de trajectoire la plus appropriée parmi celles présentées dans l'état de l'art du chapitre 2.

Nom, Région, Date de début	Phys	Fc	Ris	Men	Soc Ind	Soc Dir	Cog
ActivAgeing, France, 2013 [Voilmy and Duchêne, 2013]	✓	✓	✓		✓		
AILISA (HIS Grenoble), France, 2000 [Noury et al., 2000]	✓	✓	✓				
Assisted Interactive Dwelling House, UK, 1996 [Bonner, 1998]		✓		✓			
Aware Home, USA, 1999 [Kidd et al., 1999]		✓			✓		✓
BESTA project, Norway, 1994 [Cash, 2003]		✓	✓				
comHOME, Sweden, 1998 [Junestrand et al., 2003]			✓		✓		✓
Domus, Canada, 2006 [Giroux et al., 2008]		✓	✓		✓		✓
Eledia, Italy, 2010 [Viani et al., 2013]		✓	✓				
Enable Project, Europe, 2001 [Cash, 2003]			✓				✓
Gator Tech Smart House, USA, 2004 [Helal et al., 2005]	✓	✓	✓	✓	✓		✓
GER Home, France, 2007 [Anfosso and Rebaudo, 2011]		✓	✓		✓		
GiraffPlus, Europe, 2012 [Coradeschi et al., 2013]		✓	✓		✓		
Gloucester Smart House, UK, 2000 [Adlam et al., 2001]			✓				✓
MavHome, USA, 2001 [Cook et al., 2003]		✓					
MPIGate, France, 2012 [Cruz-Sanchez et al., 2012]	✓	✓					
Oatfield Estates, USA, 2000	✓	✓	✓		✓		
PlaceLab, USA, 2004 [Intille et al., 2006]	✓	✓					
PROSAFE, France, 1997 [Chan et al., 1999]		✓					
Safe-at-Home project, UK, 2000 [Woolham and Frisby, 2002]		✓	✓				✓
Smart House, USA, 2003 [PostGIS, 2015], [Duke University, 2016]	✓	✓	✓				
Smart Medical Home, USA, 2001 [Marsh, 2002]	✓	✓					✓
SmartBo and SmartLab, Sweden, 1998 [Elger and Furugre, 1998]			✓				✓
Smartest Home of the Netherlands, Netherlands, 2000 [Smart Homes NL, 2016]		✓	✓	✓			
Sylph, Spain, 2010 [Corchado et al., 2010]	✓	✓			✓		
Tiger Place, USA, 2003 [Marek and Rantz, 2000]	✓	✓	✓				
Vallgossen Project, Sweden, 1999 [Sandström et al., 2005]	✓		✓	✓			✓
Welfare Techno-House project, Japan, 1995 [Kawarada et al., 2000]	✓	✓	✓				

TABLE 1.1 – Répartition des projets de HIS par catégories

Catégories	Projets concernés
Suivi physiologique (Phys)	12 (44%)
Suivi fonctionnel, détection d'urgence et réaction (Fc)	22 (81%)
Suivi des risques et assistance (Ris)	19 (70%)
Suivi des menaces et assistance (Men)	4 (15%)
Suivi et soutien des interactions sociales indirectes (Soc Ind)	9 (33%)
Suivi et soutien des interactions sociales directes (Soc Dir)	0 (0%)
Aide cognitive et sensorielle (Cog)	10 (37%)

TABLE 1.2 – Répartition des projets de HIS par catégories

Contraintes techniques	résolution spatiale d'un demi-mètre localisation simultanée de 5 personnes dans l'appartement compatibilité avec un système de localisation outdoor
Contraintes ergonomiques	peu invasif peu intrusif transposable dans un appartement existant
Contraintes économiques	coût inférieur à celui d'une place en maison de retraite

TABLE 1.3 – Résumé des contraintes de notre système de suivi de trajectoires

2

État de l’art des solutions de suivi de trajectoire à domicile

2.1 Introduction

Le chapitre 1 nous a permis de déceler deux éléments principaux. Tout d’abord le suivi des activités collaboratives et de la socialisation des individus, entre autres au domicile, n’a été que très peu exploré. Second élément : le suivi de la trajectoire des personnes est une première approche qui apparaît comme pertinente pour effectuer un tel suivi.

En effet, la localisation et le suivi de trajectoire sont utilisés dans toutes les catégories citées précédemment, à l’exception des capteurs physiologiques. Par exemple, pour identifier les activités liées aux pièces de la maison, pour repérer des déficiences cognitives liées à l’indécision, ou encore pour repérer des intrusions. Les usages variés et complémentaires du suivi de trajectoire, associés à l’analyse de la présence simultanée de plusieurs personnes dans la même pièce en font une première étape pertinente vers l’analyse de la collaboration.

Les technologies de suivi de trajectoire à domicile sont ici classées en deux groupes :

- les solutions de localisation embarquées sur les acteurs,
- les solutions de localisation intégrées dans l’habitat.

Ces deux catégories se distinguent par plusieurs aspects. D’un côté, les systèmes de localisation embarqués sont pervasifs, ils suivent le sujet là où celui-ci se déplace. De plus, ils facilitent grandement l’identification d’une personne puisqu’on peut attribuer un équipement clairement identifié par personne. Cependant, cela impose qu’un système soit embarqué sur la personne. A part si le système est déjà utilisé (un téléphone portable par exemple), le système est donc plus intrusif et invasif qu’un système déporté dans l’appartement, d’autant plus qu’il faudra le recharger périodiquement. De plus, la localisation et l’identification ne concernent que les personnes équipées. Il est alors très complexe de prendre en compte d’éventuels visiteurs.

Ces deux catégories ont donc chacune leurs avantages et leurs inconvénients, dont certains dépendent de la technologie utilisée et pas seulement de la catégorie. Il semble donc nécessaire d’analyser plus précisément les différentes solutions technologiques proposées par ces deux catégories de systèmes de suivi de trajectoire indoor. Cela permettra de mieux cerner quels systèmes répondent à nos objectifs, tout en étant le moins possible limités par les aspects évoqués ci-dessus.

Cet état de l’art est effectué à raison d’une section pour chacune des deux catégories évoquées. Chaque catégorie présente plusieurs solutions technologiques. Les différents systèmes de localisation indoor sont analysés et comparés dans ce chapitre au regard des contraintes identifiées dans la partie 1.4.

2.2 Solutions de localisation embarquées

Les systèmes analysés dans cette catégorie comportent une partie embarquée sur la personne. Ils peuvent cependant nécessiter la mise en place d'équipements complémentaires au sein de l'habitat ou à l'extérieur.

2.2.1 GPS

L'exemple le plus utilisé de système de localisation est le Global Positioning System (GPS). Le coût de son utilisation serait quasi-nul puisque la majorité des européens en sont déjà équipés avec leur smartphone. Un récepteur GPS, en se connectant au minimum à quatre satellites du système, peut se localiser sur Terre avec une précision pouvant atteindre quelques mètres. Pour ce faire, le récepteur calcule les pseudo-distances¹ qui le séparent des satellites auxquels il est connecté et en déduit sa position, altitude comprise, à quelques mètres près [Samper et al., 2008].

Cette précision est insuffisante au regard des contraintes décrites précédemment. De plus, dès que le système est utilisé dans un bâtiment, la précision chute, voire la localisation devient impossible, et il n'est même plus possible de savoir dans quelle pièce se trouve le récepteur.

Le GPS est donc un système pertinent pour faire de la géolocalisation en extérieur, mais est très limité dans notre cas d'usage. Il pourra cependant être utilisé en complément d'un autre système plus précis en intérieur, lorsque les acteurs ne sont pas au domicile.

2.2.2 GSM et Wi-Fi

Une autre technique de localisation possible depuis un téléphone est celle utilisant les antennes GSM et les bornes Wi-Fi. En connaissant les positions des antennes formant le réseau de téléphonie mobile, ou celles de bornes Wi-Fi (c'est le cas de Google qui s'en sert pour les téléphones sous Android), il est possible d'estimer sa position à une centaine de mètres près au mieux. Pour cela, il suffit de savoir quelles antennes sont suffisamment proches pour que le téléphone puisse communiquer avec elles [Sun et al., 2005].

Cette précision peut être légèrement améliorée en utilisant de la triangulation avec plusieurs antennes ou la technique Time Difference of Arrival (TDOA). Cette technique compare les temps mis par les messages venant des différentes antennes pour arriver au téléphone. Cependant la précision visée du demi-mètre n'est pas atteignable, surtout en intérieur.

2.2.3 UWB

La localisation d'une balise embarquée sur la personne peut également être effectuée en Ultra-Wideband (UWB). C'est une technique de modulation radio qui est basée sur la transmission d'impulsions de très courte durée, ce qui rend la bande passante utilisée très grande. L'intérêt de cette modulation est la faible densité de puissance nécessaire pour communiquer (même si la puissance totale est importante). Ainsi, tant que les communications UWB ne dépassent pas la limite légale de puissance imposant l'achat de bandes de fréquences, la bande passante est gratuite. Par ailleurs, la faible durée des impulsions facilite la mesure du temps de propagation du signal, et donc la localisation du badge UWB.

Ubisense [Steggles and Gschwind, 2005] propose un tel système capable de localiser les balises à 15 cm près, 95% du temps (Fig. 2.1). Il utilise une méthode de triangulation des temps de transmission des signaux entre des récepteurs installés dans l'appartement et l'émetteur placé sur la personne. Les techniques utilisées sont le TDOA et le Angle of Arrival (AOA) qui permettent de localiser l'émetteur à partir de deux récepteurs captant le signal. Le TDOA se base sur la différence de temps de trajet d'un message entre l'émetteur et différents récepteurs. Le AOA se base sur le déphasage entre les signaux reçus par deux antennes proches pour déterminer l'angle par lequel le message est arrivé. Il n'est pas nécessaire qu'émetteur et récepteur soient en vision

1. Ces pseudo-distances ne représentent pas des distances réelles à cause de la désynchronisation des horloges et des phénomènes de propagation.



FIGURE 2.1 – Ubisense Dimension4 (localisation en UWB par TDOA et AOA)

directe et les trajets multiples des ondes entre l'émetteur et le récepteur peuvent être filtrés grâce à la faible durée des impulsions en UWB. Cependant, la mise en place d'un tel système coûte cher, 15000€ pour le kit de développement [Deak et al., 2012].

2.2.4 Beacons et RSSI

Le Received Signal Strength Indicator (RSSI) est une mesure basée sur le niveau de puissance du signal reçu par un équipement effectuant des communications sans-fil. Il permet d'estimer la qualité de réception d'un signal lors de communications à distance, ce qui le rend très couramment accessible, par exemple sur un téléphone communiquant en Bluetooth ou en Wi-Fi.

Il paraîtrait logique que plus un récepteur s'éloigne d'un émetteur, plus le RSSI diminue. Pourtant, Touvat et al. ont démontré que cette relation était inexacte, du moins sur des courtes distances [Touvat et al., 2014]. Ceci s'explique entre autres par les trajets multiples des ondes et par le fait que le RSSI ne soit pas directement un niveau de puissance, mais un indicateur issu de ce dernier, qui dépend entre autres du système de réception.

Pour localiser efficacement un récepteur en utilisant le RSSI, il est nécessaire de disposer d'une carte des niveaux de RSSI dans toute la zone à couvrir afin d'extraire les probabilités de présence. Cette carte est complexe à créer et surtout à maintenir. En effet, tout objet ou personne déplacé influe sur la diffusion du signal et donc change la carte qui doit être régulièrement mise à jour. Cette solution n'est pas envisageable dans un appartement du fait de la maintenance trop lourde de la carte des niveaux de RSSI.

Au final, la seule véritable information liée au RSSI est le fait qu'un équipement soit à portée ou pas d'un émetteur. Dans le cas d'une communication Bluetooth, la portée est limitée à quelques mètres, ce qui permet d'identifier la pièce dans laquelle se trouve la personne portant le capteur communiquant.

Les systèmes Ekahau [Kolodziej and Hjelm, 2006] et Stanley [Stanley-Healthcare, 2016] (Figure 2.2) qui se basent sur des tags RFID-over-Wi-Fi à 2,4 GHz atteignent ainsi une résolution de 1 à 3 m. Ils ont également l'avantage de reposer sur le système Wi-Fi d'un bâtiment, souvent pré-existant. De même, le système SpotOn [Hightower et al., 2000] qui utilise le RSSI de badges RFID actifs émettant à 916.5MHz obtient une précision de 3 m.

2.2.5 RFID passif

Les systèmes de localisation basés sur la technologie Radio-frequency identification (RFID) ou RFID-over-Wi-Fi qui viennent d'être évoqués nécessitent que l'émetteur et le récepteur soient auto-alimentés. C'est le principe des systèmes RFID actifs. Pour ne pas avoir besoin d'alimenter le lecteur et le tag, il est possible d'utiliser des tags RFID passifs.

Le principe du RFID passif est d'utiliser l'induction électromagnétique, comme dans un transformateur électrique. Des bobines sont placées dans le lecteur et dans le tag. Lorsque celles-ci sont proches l'une de l'autre, si celle du lecteur est alimentée, elle crée un champ électromagnétique



FIGURE 2.2 – badge Stanley (localisation en RSSI par RFID-over-Wi-Fi)

qui, lui-même, crée un courant électrique dans le tag qui est alors alimenté. Le tag peut alors communiquer avec le lecteur en modulant la charge qu’il représente pour le lecteur. Ainsi, les tags récupérant l’énergie fournie par le lecteur, ils n’ont pas besoin de batterie, ce qui leur confère une autonomie qui n’est limitée que par celle du lecteur. Cela réduit ainsi leur intrusivité car si un utilisateur doit recharger régulièrement un équipement, cela influe sur son activité.

Cette technologie impose que le lecteur et le tag se trouvent très proches l’un de l’autre (environ 20 cm au maximum). Si l’on peut détecter un tag avec le lecteur, c’est donc que l’on se trouve à moins de 20 cm de celui-ci. Ainsi, en plaçant des tags RFID passifs au sol selon un maillage connu, il est possible de localiser le lecteur RFID en sachant quels tags sont détectables, donc à proximité immédiate. Ce lecteur pourrait par exemple être intégré à la chaussure du sujet. Un tel système peut atteindre une résolution de 20 cm si les tags sont placés assez proches les uns des autres [Saab and Nakad, 2011, Ni et al., 2004].

À l’inverse, on pourrait placer des lecteurs RFID au sol et un tag passif sur l’objet à localiser. Mais il faudrait alimenter tous ces lecteurs, donc refaire tout le sol de la zone à couvrir. Cette dernière solution semble donc difficilement viable.

2.2.6 Ultrasons

La localisation de badges appelés “Bats” par ultrasons a été proposée par AT&T Cambridge [Addlesee et al., 2001]. Ce système se base sur un réseau de récepteurs placés au plafond à raison d’un par mètre carré. Comme illustré dans la figure 2.3 :

1. Le badge reçoit une demande de positionnement de la part du système
2. Le badge émet un signal ultrason
3. Les différents récepteurs au plafond mesurent le temps de parcours du signal ultrason et le communiquent au système central.

La comparaison des temps mis par un signal pour aller de l’émetteur aux récepteurs s’appelle le TDOA. En comparant les instants de réception du message de l’émetteur (le Bat) au niveau des récepteurs au plafond, le système central est capable de déterminer la position en trois dimensions du badge porté par la personne.

Le réseau de récepteur de ce système est très précis pour notre cas d’usage puisqu’il permet de localiser à 9 cm près, dans 95% des cas et ce pour une dizaine de personnes [Addlesee et al., 2001]. Cependant, ce réseau est à la fois coûteux et compliqué à mettre en place et à maintenir.

2.2.7 Système hybride sur Wi-Fi

Si le plus simple pour localiser une personne ou un badge est d’utiliser une unique technique de localisation sur un type de communications sans fil, il est parfois pertinent d’avoir une approche hybride. C’est le cas du système Aeroscout qui est basé sur les communications Wi-Fi, mais combine deux techniques de localisation, à savoir le RSSI et le TDOA déjà décrites dans les systèmes précédents. D’un côté, la technique du TDOA est utilisée dans le cas de localisation en extérieur ou dans de grandes salles. De l’autre, la technique du RSSI est utilisée pour localiser dans un périmètre réduit, proche de l’émetteur. Les tags Aeroscout émettent régulièrement un

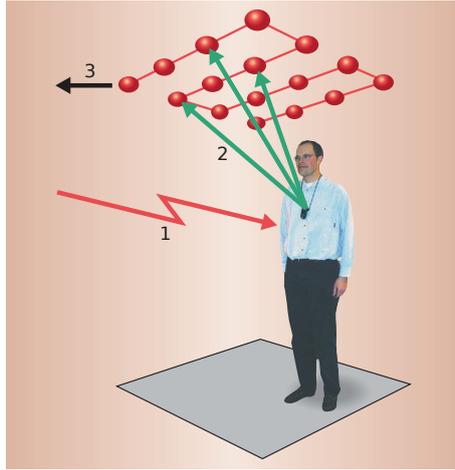


FIGURE 2.3 – Localisation de Bats par ultrasons, source : [Addlesee et al., 2001]

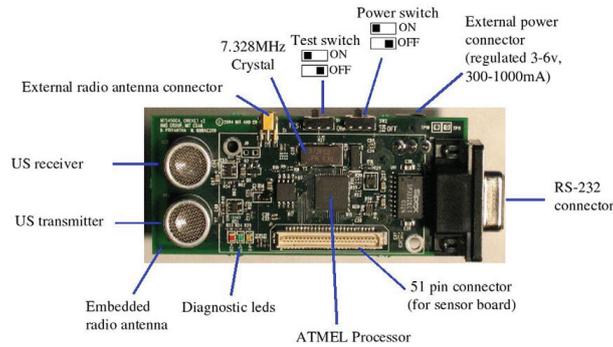


FIGURE 2.4 – Cricket, localisation par ultrasons et RF, source : [Addlesee et al., 2001]

message qui est reçu par les bornes Wi-Fi environnantes et permet de les localiser. Ces signaux utilisent très peu de bande passante, ce qui permet d'avoir une influence minimale sur le réseau.

2.2.8 Système hybride RF et ultrasons

Le système Cricket développé par le MIT utilise à la fois des signaux radiofréquence (RF) et ultrason [Priyantha et al., 2000]. Le récepteur est l'élément à localiser. Celui-ci capte les signaux RF des balises (figure 2.4) qui l'entourent. Chaque balise émet périodiquement, en RF, son identité et sa position. Le récepteur peut ainsi avoir une première estimation de sa position en sachant quelles balises il peut atteindre.

Quand une balise a envoyé le signal RF d'identification, elle émet, immédiatement après, un signal ultrason qui va aussi être capté par le récepteur pour lui permettre de préciser sa position. Pour cela, il utilise le fait que la vitesse de déplacement du son (environ 300 m.s^{-1} , soit $3,3 \text{ ms.m}^{-1}$) soit bien inférieure à celle des ondes RF (vitesse de la lumière dans l'air, environ 3.10^8 m.s^{-1} , soit $3,3 \text{ ns.m}^{-1}$). Le système considère donc que la transmission du signal RF est instantanée, l'instant de sa réception est considéré comme celui de l'envoi du message ultrasonore par la balise. Le temps entre la réception du signal RF et la réception du signal ultrasonore d'une même balise correspond donc au temps de propagation du signal ultrasonore entre la balise et le récepteur. La balise peut alors calculer elle-même sa position de manière autonome, sans pour autant devoir échanger avec un système central. La confidentialité des données est ainsi garantie.



FIGURE 2.5 – Capteur infrarouge passif

2.3 Solutions de localisation intégrées à l’habitat

Les solutions de localisation indoor décrites dans cette partie sont intégrées dans l’appartement. Elles ne nécessitent pas le port de balises ou de badges par les personnes à localiser.

2.3.1 Sol actimétrique

Un sol actimétrique est composé d’un ensemble de plaques indépendantes. Chacune d’elles est capable de détecter qu’une pression est exercée sur elle, par exemple par mesure capacitive [Valtonen et al., 2009].

Certaines plaques étant soumises à une pression permanente (d’un pied de table par exemple), il est nécessaire de faire une analyse temporelle des données de pression mesurées. À cela s’ajoute l’analyse des niveaux de pression et du nombre de points d’appui pour pouvoir différencier un chien d’une personne par exemple.

Ce système a l’avantage de couvrir tout l’appartement sans zone blanche, mais impose de refaire entièrement le sol de l’appartement. Ce sont donc des travaux long et coûteux.

2.3.2 Capteurs infrarouge passifs

Les capteur infrarouges passifs (Fig. 2.5) captent le rayonnement du corps humain dans l’infrarouge. Par un dispositif optique, ils segmentent l’espace en plusieurs zones indépendantes qui sont analysées séparément. Ainsi, quand une personne se déplace devant un tel capteur, celui-ci va mesurer un rayonnement infrarouge sur plusieurs zones consécutivement. Cette variation permet basiquement de savoir s’il y a ou non mouvement d’une personne, mais il est aussi possible de suivre la trajectoire de cette même personne.

De tels capteurs ont déjà été utilisés pour étudier les cycles circadiens de sujets à domicile [Noury et al., 2000]. Ils ont l’avantage d’être peu onéreux et sont efficaces dans le suivi d’une personne seule. Cependant, un tel système est vite limité lorsqu’il s’agit de suivre plusieurs personnes proches les unes des autres dans la même pièce. Kemper et al. dépassent ainsi les 50 cm d’erreur dès la localisation de 2 personnes dans une même pièce, dès lors qu’elles se trouvent à moins d’un mètre l’une de l’autre [Kemper and Hauschildt, 2010]. La résolution d’un demi-mètre n’est donc pas atteinte.

2.3.3 Caméra vidéo

Le suivi de personnes par caméra vidéo a été largement utilisé dans des systèmes de vidéosurveillance. Les algorithmes qui permettent ce suivi se basent tout d’abord sur l’évolution de l’image qui informe sur les éléments qui ont bougé, mais pas seulement. Un changement de luminosité peut, par exemple, largement influencer sur de tels algorithmes. De plus, les personnes ne sont pas les seuls éléments à se déplacer (porte, chaise, etc.), ce qui impose d’ajouter une classification pour séparer les personnes du reste de l’environnement. Cette séparation n’est pas nécessaire dans un métro ou un stade car les éléments mobiles sont en grande majorité des personnes. Cependant,



FIGURE 2.6 – Différents modèles de caméras de profondeur

nos cas d’usage imposent la prise en compte d’une plus grande variabilité des types d’éléments mobiles.

Cette classification peut être effectuée par une recherche des visages comme le proposent Zhao et al. [Zhao et al., 2009]. La difficulté étant ensuite d’avoir des personnes face à la caméra pour pouvoir faire cette analyse. Ce dernier point est à nuancer car les techniques d’analyse d’image se perfectionnent régulièrement. L’arrivée récente du deep learning apportant des améliorations majeures dans le domaine, même si les applications au suivi de trajectoire peinent à arriver [Schmidhuber, 2015].

Une fois la personne localisée sur l’image, il est nécessaire de la replacer dans l’espace, donc de connaître la distance entre la caméra et le sujet. Ceci implique l’utilisation de plusieurs caméras placées selon des angles différents et la fusion de ces données. Le plus simple pour faire ce type d’analyse est d’utiliser directement des caméras stéréo ou de profondeur détaillées ci-dessous.

2.3.4 Caméra stéréo et de profondeur

Les caméras stéréo telles que Triclops permettent d’ajouter une notion de profondeur aux données mesurées par une caméra couleur classique [Deak et al., 2012]. Elle permettent d’atteindre une précision de 10 cm dans le positionnement d’une personne, ce qui est très suffisant par rapport à notre cahier des charges établi précédemment (Section 1.4). De plus, elles permettent de détecter plusieurs personnes à condition de rester dans la zone de couverture des caméras. Plusieurs caméras sont ainsi nécessaires pour couvrir complètement une pièce, mais cela n’impose pas de modification majeure de l’appartement.

Cependant, ces caméras stéréo ou de profondeur avaient un défaut majeur : leur prix, en milliers d’euros qui les rendait très peu attractives. Un changement majeur s’est produit en 2011 quand Microsoft a sorti une suite logicielle permettant d’utiliser la Kinect sous Windows. La Kinect est une caméra de profondeur développée initialement comme périphérique de la console de jeu Xbox 360 qui coûte une centaine d’euros, ce qui est bien plus abordable. De plus, les outils logiciels fournis facilitent le développement rapide autour du capteur. C’est ce qui a guidé le choix technologique d’un système de suivi d’ouvriers sur un chantier, développé à partir de caméras Kinect en 2012 [Weerasinghe et al., 2012].

Des alternatives récentes à la Kinect existent, mais elles sont bien plus chères pour une précision similaire. Ainsi, quand la Kinect 2 est vendue à 90€ (comme la Kinect 1 précédemment), le Structure sensor coûte 340€ [Structure.io, 2015], le ZED stereo lab : 400€ [Stereo Labs, 2016], ou encore le Duo MC : 615€ [Duo 3D, 2016] (Fig. 2.6).

Les caméras peuvent être considérées comme un dispositif intrusif par les habitants d’un logement qui en serait équipé. Il est donc intéressant de remarquer que la caméra de profondeur

de la Kinect a la particularité de ne pas utiliser d'image couleur. Les images de profondeur qui en résultent sont bien moins gênantes pour la protection de la vie privée des sujets que des images de caméra couleur. Il n'en reste pas moins que la problématique de la vie privée doit être au cœur d'un tel système, ce qui rajoute des contraintes de sécurité des données et de transparence à propos des images utilisées et de la manière dont elles sont traitées.

2.3.5 Imagerie Tomographique basée sur la Variance (VRTI)

La fréquence de résonance des molécules d'eau est d'environ 2,4 GHz (d'où son utilisation dans les fours micro-ondes) et le corps humain est essentiellement composé d'eau. Ainsi, lorsqu'on émet une onde à 2,4 GHz en présence d'un corps humain, celui-ci va atténuer l'onde. Nous pouvons ici faire une analogie avec les tags RFID passifs, ces derniers apparaissant comme une charge du point de vue de l'émetteur.

Les ondes Wi-Fi étant également à 2,4GHz, en mesurant les variations du champ émis par une borne Wi-Fi depuis une pièce, il est possible de détecter et de localiser une personne se trouvant de l'autre côté d'un mur.

Cette méthode, bien que prometteuse, ne permet pour l'instant pas de suivre plusieurs personnes à la fois, ni d'atteindre une précision suffisante. Wilson et al. atteignent ainsi une erreur moyenne légèrement supérieure au mètre pour une personne seule se déplaçant selon un rectangle, dans une seule pièce [Wilson and Patwari, 2011].

2.4 Synthèse des solutions de localisation

Les différentes solutions de localisation évoquées sont synthétisées dans le tableau 2.1. Les solutions de localisation indoor embarquées sont nombreuses, mais celles qui permettent d'atteindre une précision d'un demi-mètre imposent le port d'un dispositif spécifique et ne se contentent pas du téléphone de la personne. Ceci impose que les seules personnes pouvant être détectées sont les habitants de l'appartement à qui l'on attribue un équipement de localisation. Dès lors, les interactions avec des visiteurs (amis, famille, aides de vie, médecins, etc.) ne peuvent que très difficilement être prises en charge par un tel système.

Les systèmes déportés dans l'appartement apparaissent donc comme une solution plus adaptée au suivi des activités collaboratives. C'est d'autant plus vrai qu'un de ces systèmes respecte toutes les contraintes imposées par le cahier des charges, à savoir les caméras de profondeur. En effet, ces dernières ont une résolution suffisante, un coût réduit (surtout la Kinect) et sont faciles à déployer dans un appartement existant en les plaçant au mur, une simple prise électrique suffit.

Comme décrit précédemment, l'intrusivité d'un tel système n'est pas négligeable car les caméras sont visibles pour les personnes dont l'activité est suivie. Il ne faut pas chercher à complètement cacher ces caméras par souci de transparence, mais un placement discret sera à privilégier. De plus, dans le cas de l'utilisation de la Kinect ou du capteur Structure, la localisation des personnes par la caméra ne nécessite que des images de profondeur qui sont peu gênantes pour la protection de l'intimité des habitants. À nouveau, il sera nécessaire de communiquer sur les données utilisées et sur leur traitement afin de rassurer les utilisateurs. Cette remarque serait d'ailleurs valable pour n'importe quel autre système de localisation car le suivi d'activité peut vite se transformer en fichage des individus, ce qui n'est pas leur souhait.

Les systèmes déportés sont cependant limités dans l'identification des personnes. Dans le cas des caméras de profondeur, potentiellement couplées à des caméras couleur, plusieurs éléments peuvent participer à cette identification comme l'analyse du visage, de la taille, de la couleur des vêtements, etc. mais cette capacité à identifier sera à valider. Le système de localisation de la Kinect étant capable de suivre des personnes dans son champ de vision, l'identification n'est pas nécessaire à tout moment, mais seulement de temps en temps pour associer une identité à une trajectoire. Ainsi, l'utilisation du téléphone portable de la personne, insuffisante dans le cas de l'utilisation d'un système embarqué seul pourrait être complémentaire, en utilisant le RSSI du module Bluetooth d'un smartphone par exemple.

technologie	résolution	coût	localisation de plusieurs acteurs	peu invasif	peu intrusif	déployabilité en habitat existant
GPS	10 m	faible	oui	oui	oui	facile
GSM	100 m	faible	oui	oui	oui	facile
UWB	15 cm	modéré	oui	modéré	oui	facile
RSSI	1 m	modéré	oui	modéré	oui	facile
RFID passif	20 cm	modéré	oui	modéré	oui	modéré
Ultrasons	9 cm	modéré	oui	modéré	oui	modéré
Hybride RF/US	10 cm	élevé	oui	modéré	oui	facile
Sol actimétrique	40 cm	élevé	oui	oui	oui	complexe
Infrarouge passif	0,5 m	faible	oui	oui	oui	complexe
Caméra de profondeur	30 cm	faible	oui	oui	modéré	facile
VRTI	1 m	faible	non	oui	oui	facile
Pression de l'air	pièce	faible	non	oui	oui	modéré

TABLE 2.1 – Comparaison des systèmes de localisation embarqués (avant le double trait) et déportés dans l'appartement (après le double trait), adapté de [Deak et al., 2012]

Par ailleurs, par soucis de pérennité, même si la Kinect apparaît comme le meilleur choix de système de localisation dans le cadre de cette thèse, elle ne le restera pas forcément. Il est donc nécessaire d'avoir une approche modulaire de notre système afin de le rendre interopérable avec d'autres systèmes de localisation. La multiplicité des caméras de profondeur évoquées et l'arrivée régulière de nouveaux modèles sur le marché encouragent également cette approche.

Enfin, le téléphone portable des sujets pourra être utilisé pour prolonger le suivi d'activité hors du domicile. En effet, le récepteur GPS intégré, qui est pertinent en extérieur, apporte cette continuité comme décrit précédemment. Il sera donc nécessaire de rendre compatibles différents systèmes de localisation entre eux (Kinect et GPS entre autres) via un référentiel commun.

3

Étude et caractérisation d'une solution à base de caméras de profondeur

3.1 Introduction

Notre étude vise à proposer un dispositif technologique permettant d'analyser les interactions sociales directes entre des sujets, principalement dans le cadre d'un suivi de santé à domicile. Le chapitre 1 nous a permis de valider la pertinence de cette approche, et nous a orienté vers une analyse de la trajectoire des personnes dans leur appartement.

Dans le chapitre 2, notre état de l'art des systèmes de suivi de trajectoire indoor nous a permis d'identifier les caméras de profondeur, en particulier la Kinect comme le choix technologique le mieux adapté à nos besoins en terme de résolution, de capacité à détecter plusieurs personnes, ou encore de faible invasivité et intrusivité.

Ce chapitre présente l'étude et la caractérisation d'une solution de suivi de trajectoire de plusieurs personnes à domicile à partir de caméras de profondeur Kinect. Dans un premier temps, les caractéristiques de la caméra de profondeur choisie sont décrites. Puis, les outils logiciels de localisation à partir des données de profondeur sont présentés, ainsi que les techniques à mettre en place pour fusionner les données de localisation de plusieurs caméras de profondeur. L'architecture permettant d'effectuer facilement cette fusion de données et le stockage dans une base de données est ensuite décrite. Enfin, la capacité à séparer des personnes proches, ainsi que les limites associées au choix des caméras de profondeur Kinect sont abordées. Cette partie des travaux a fait l'objet d'une publication dans le journal IRBM [Sevrin et al., 2015c].

3.2 Les capteurs de la Kinect

La Kinect est un capteur de mouvement, conçu par Microsoft Inc. et commercialisé en septembre 2010 pour être utilisé comme une alternative à la manette de jeu pour la console de jeu Xbox 360. Elle est composée d'un ensemble de capteurs (Figure 3.1) : une caméra couleur (Color CMOS, VNA38209015), une caméra de profondeur composée d'un projecteur infrarouge (OG12/0956/D306/JG05A) combiné à une caméra infrarouge (IR CMOS, Microsoft/-X853750001/VCA379C7130), et une grille de quatre microphones. La caméra infrarouge a une définition de 640×480 pixels et capture des images jusqu'à 30 Hz. Ses angles de vue sont de 60°

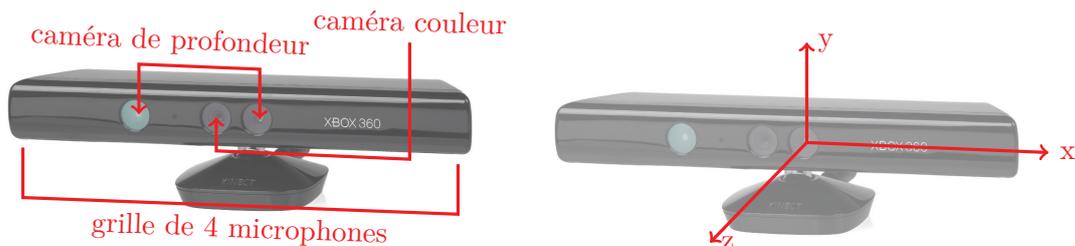


FIGURE 3.1 – Les capteurs de la Kinect et le repère associé

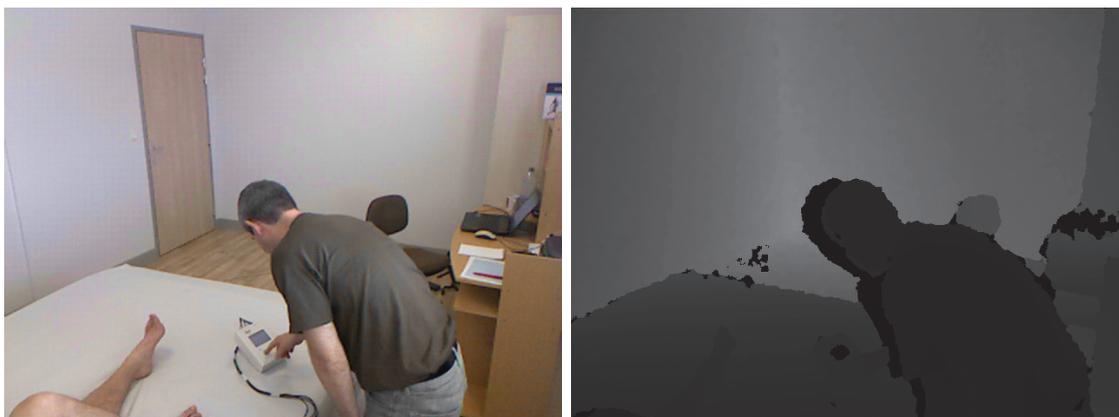


FIGURE 3.2 – Exemple de données brutes acquises par la Kinect : images couleur (gauche) et de profondeur (droite) de la même scène de la chambre du living lab.

en horizontal et 45° en vertical. Un exemple des images couleur et de profondeur fournies par la Kinect est présenté sur la figure 3.2. Cette caméra de profondeur est conçue pour être utilisée à une distance comprise entre 0,5 m et 5 m du capteur. Cela correspond à la position habituelle des joueurs si la Kinect est placée sous la TV utilisée par la console de jeu.

3.3 Obtention des images de profondeur

Comme nous venons de le voir, la Kinect produit des images de profondeur à partir de deux éléments : un projecteur infrarouge combiné à une caméra infrarouge. Pour ce faire, elle projette une mire infrarouge légèrement décalée par rapport à l'axe de la caméra infrarouge (Figure 3.3). Cette mire va épouser la forme de ce sur quoi elle est projetée comme le ferait une image d'un vidéo-projecteur (Figure 3.4).

La technique est illustrée sur la figure 3.5. Considérons un point de la mire. Ce point provient d'un rayon lumineux émis par l'émetteur infrarouge (en rouge sur la figure). Si le rayon atteint l'écran placé à une distance de référence, ce point apparaîtra sur la gauche de l'image. Au contraire, si l'on place un objet plus proche de la Kinect sur la trajectoire de ce même rayon, le point apparaîtra au centre de l'écran.

Ainsi, si l'on connaît une projection de référence de la mire à une certaine distance, et que l'on compare cette référence à l'image obtenue par le récepteur infrarouge, il est possible de déterminer la distance des différents points de l'image à la Kinect. C'est ce qui est illustré sur la figure 3.6. On y voit deux images captées par une caméra infrarouge équivalente à celle de la Kinect. Lorsqu'aucun obstacle ne se trouve entre l'émetteur infrarouge et le mur, l'amas de points est homogène. Au contraire, lorsqu'on place un livre au premier plan, les points qui apparaissent sur le livre sont décalés sur la droite. On observe alors logiquement une bande verticale noire sur la gauche du livre.

L'image est bien décalée vers la droite comme sur notre schéma. C'est cohérent puisque, lorsqu'on se place face à la Kinect, l'émetteur infrarouge se trouve sur la gauche (Figure 3.1),



FIGURE 3.3 – La mire de la Kinect projetée sur un mur, source : futurepicture.org

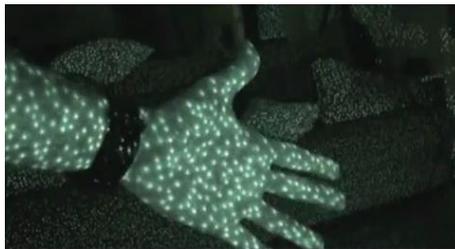


FIGURE 3.4 – La mire de la Kinect déformée sur une main

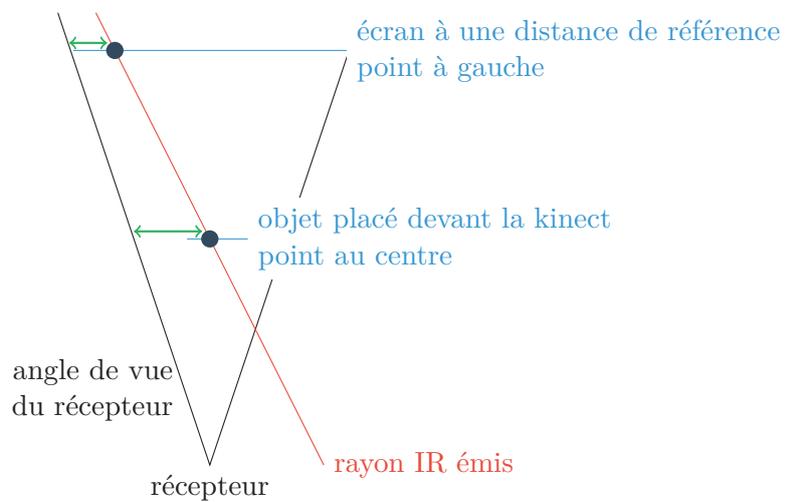


FIGURE 3.5 – Lorsqu'un objet est placé devant la Kinect, le point émis apparaît plus à droite de l'image

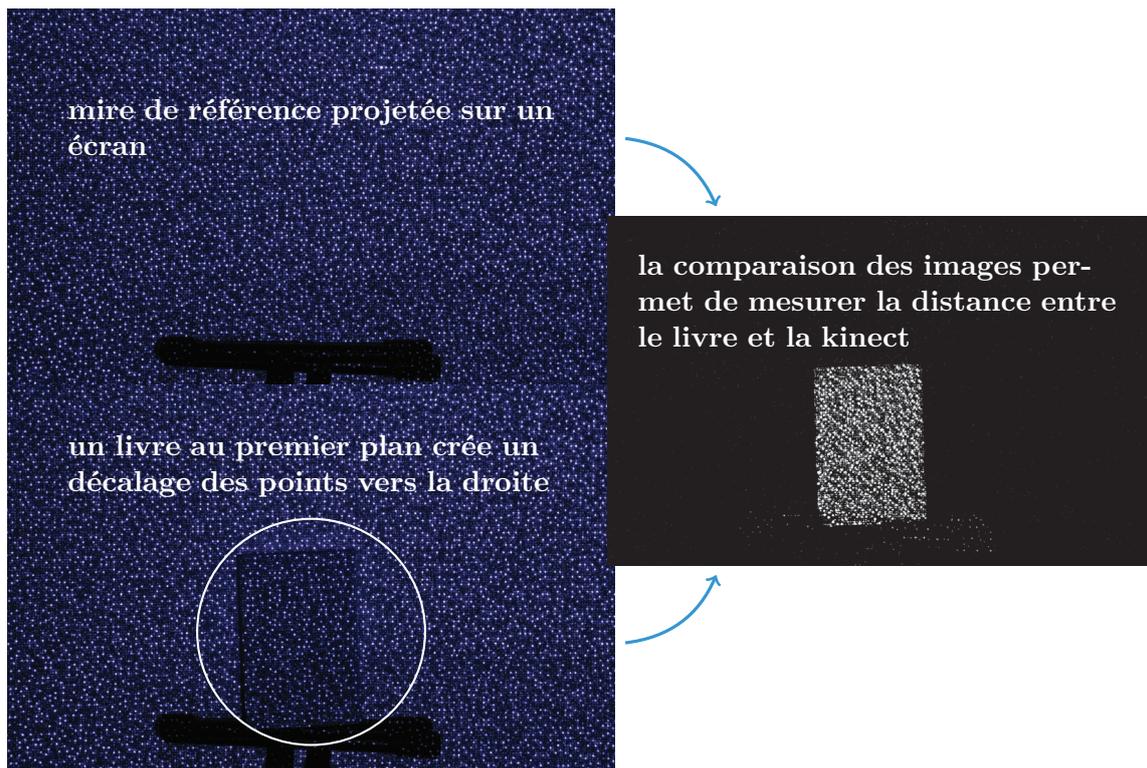


FIGURE 3.6 – Comparaison des images de la mire, avec et sans objet au premier plan

comme sur la figure 3.5.

Remarquons que cette technique ne fonctionne que parce que l'émetteur et le récepteur infrarouge ne sont pas au même endroit. Si tel était le cas, placer un objet devant la caméra ne déformerait pas la mire de l'émetteur. Toutefois, une différence serait toujours visible, les points les plus proches apparaissant comme plus lumineux. Cependant, cette différence est bien plus complexe à associer à une distance de façon fiable.

La distance entre l'émetteur et le récepteur infrarouge a donc été un choix important dans la conception de la Kinect. Plus cette distance est grande, plus les variations de la scène filmée sont mises en évidence (augmentation de la zone noire à gauche du livre dans la figure 3.6). Une distance trop courte entre émetteur et récepteur entraîne des variations trop faibles de l'image pour être détectées. Au contraire, une distance plus grande réduit la zone où les rayons émis atteignant un obstacle sont visibles par le récepteur. Ce qui revient à réduire la gamme de fonctionnement de la caméra de profondeur.

La composition exacte de la mire et la méthode de calcul de son décalage avec les obstacles entre autres n'ont pas été publiées par Primesense. De ce fait, les informations présentées ci-dessus ont été obtenues par des techniques de reverse engineering et nous ne pouvons fournir plus de détails fiables. Ajoutons néanmoins que la documentation de la Kinect annonce une résolution de 3 mm selon les axes x et y et de 1 cm selon l'axe z à 2 m de distance de la caméra, les axes étant ceux de la figure 3.1.

3.4 Les logiciels utilisant la Kinect

Bien qu'initialement développée uniquement pour être utilisée comme alternative aux manettes de jeu pour la Xbox 360, la Kinect a connu un essor important lors de la sortie en 2011 d'un kit de développement permettant l'utilisation de la Kinect sur un ordinateur sous Windows. À la même période, Primesense avait développé le même type de logiciel appelé OpenNI, qui de plus était compatible avec une autre caméra de profondeur développée par Asus, et pouvait être utilisé

sous les systèmes d'exploitation Linux et Windows. Une communauté de développeurs s'est alors organisée autour de ces deux projets : OpenNI et le SDK proposé par Microsoft.

Les développements opérés par Microsoft, Primesense, et la communauté de développeurs qui s'est formée autour de ces projets, ont permis de disposer librement d'un ensemble d'outils effectuant des traitements sur les mesures des capteurs de la Kinect. Les données brutes des images couleur et de profondeur sont ainsi disponibles, mais pas seulement. Un de ces outils nous intéresse tout particulièrement puisqu'il permet de localiser des personnes dans le champ de vision de la caméra. En effet, effectuer le traitement directement sur les données brutes nous demanderait un développement important alors que ce n'est pas le cœur de notre étude. Ainsi, l'outil NITE, développé par Primesense localise jusqu'à 6 personnes simultanément dans le champ de vision d'une caméra Kinect. Ceci uniquement en utilisant les images de profondeur et non pas celles en couleurs. Le logiciel de localisation n'est certes pas parfait, mais tenter de l'améliorer est très optimiste, surtout dans notre cas où ce n'est pas l'objet principal de notre travail. Une telle amélioration de la localisation de personnes a été tentée par Cormier et al. qui arrivent à des résultats similaires à ceux de NITE malgré une grande partie d'une thèse consacrée à ce travail [Cormier et al., 2015]. Les données de positionnement fournies par OpenNI et NITE sont les coordonnées en millimètres des personnes dans le repère de la caméra de profondeur, mesurées à environ 10Hz. La précision de la localisation n'est pas millimétrique, mais cela permet de transmettre des nombres entiers, plus faciles à traiter. Cette brique logicielle est capable non seulement de localiser les personnes, mais aussi de les suivre tant qu'elles restent dans le champ de vision de la caméra. Ainsi, un identifiant est attribué à chaque personne visible, et la suit jusqu'à sa disparition de l'image. Il n'est donc pas nécessaire de recréer une trajectoire à partir d'un simple ensemble de points. L'analyse des trajectoires est ainsi facilitée.

Primesense ayant été racheté par Apple en 2015 pour être supprimée quelque mois plus tard, le développement autour de OpenNI a été un temps ralenti. Cependant, comme le projet est open source, il a été repris par Structure.io qui assure sa pérennité, avec le reste de la communauté de développeurs qui existait déjà autour de la Kinect. Un dépôt GIT de référence où le code source est accessible a été créé à l'occasion [Structure.io, 2015]. Même si l'accès au code source assure la pérennité du système, ces changements de directions des projets rappellent à quel point la technologie évolue rapidement. Il n'est donc pas souhaitable de se lier à une technologie. Au contraire, notre système devra s'abstraire de la couche matérielle que représentent les Kinect pour travailler à un plus haut niveau d'information. En considérant la position des personnes comme une information indépendante des briques technologiques qui la fournissent, il serait possible de conserver le traitement fait sur les données de localisation, même si le système de suivi de trajectoire change.

3.5 Abstraction de la couche matérielle

L'évolution régulière de la technologie utilisable dans un living lab encourage grandement à ne pas dépendre d'une technologie, mais au contraire de s'en abstraire. L'objectif est alors de mettre en place un système intéropérable, modulaire, composé d'un ensemble de briques technologiques qui puissent être interchangeables sans que cela influe sur le reste du système.

Une telle modularité permettrait également d'agréger des informations venant de capteurs hétérogènes, avec des protocoles hétérogènes, mais sans que le traitement sur ces informations dépende des capteurs ou des protocoles. Tout ceci permettra d'assurer la pérennité du living lab, qui évoluera ainsi avec la technologie.

Dans le domaine des communications entre équipements domotiques, le standard KNX est une référence. Il est compatible avec des milliers d'appareils allant des ampoules à LED aux capteurs de présence produits par des leaders industriels [KNX, 2015]. Cependant, la mise en place d'un système basé sur KNX est chère et lourde. De plus, il faut anticiper les potentielles évolutions du système avec l'intégration de capteurs supplémentaires pour le suivi de l'activité bien au-delà du suivi de trajectoires. Si le KNX est très pertinent pour faire de la domotique, il l'est beaucoup moins lorsque l'on souhaite le connecter à des Body Area Network (BAN) communiquant en

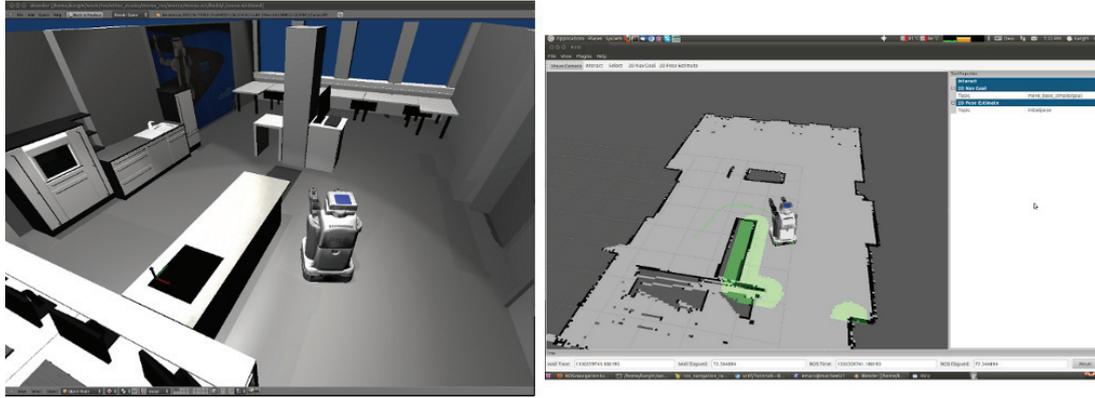


FIGURE 3.7 – Représentation d’environnement 3D à l’aide des outils disponibles dans ROS, source : openrobots.org

Bluetooth ou en ZigBee [Cao et al., 2009]. Par ailleurs, dans le cas de notre living lab orienté vers l’étude des interactions directes entre les personnes, il pourra être intéressant d’aller jusqu’à l’analyse des interactions entre les hommes et les robots. Ceci suppose que notre système soit compatible avec des environnements de robotique, contrairement à KNX.

Pour atteindre ce large spectre de perspectives, certains habitats intelligents ont été conçus en se basant sur le Robot Operating System (ROS) [ROS, 2016]. C’est un ensemble d’outils et de bibliothèques logicielles qui facilitent la réalisation d’applications, principalement dans le domaine de la robotique, mais pas seulement. Ainsi, le projet MPIGate qui est basé sur ROS, crée des ponts entre plusieurs protocoles de communication tels que le Bluetooth ou le Zigbee et le système ROS [Chehaider et al., 2013]. De la même manière, ce système serait également capable d’intégrer un sous-réseau KNX.

Le projet ROS est open source et bénéficie d’une large communauté de développeurs participant à son développement. Grâce à elle, ROS dispose de nombreux outils facilitant la mise en place d’applications logicielles et matérielles. Parmi ces outils figure Rviz [ROS, 2015], un logiciel de représentation 3D capable de représenter une scène en temps réel pouvant impliquer des équipements (tables, murs, portes), des personnes sous forme d’avatars, des robots, etc. comme le montre la figure 3.7.

De nombreux industriels soutiennent également le projet ROS, en plus de la communauté de développeurs existante. On y retrouve Bosch, Google, la DARPA (Défense américaine) ou encore la NASA (Figure 3.8). Ces partenaires prestigieux montrent l’importance de ROS pour l’industrie, et garantissent sa pérennité sur le long terme.

La contrepartie à ces nombreuses possibilités est principalement le surplus d’échange de données imposé par ROS si on le compare au protocole KNX. Ce surplus est fortement lié au fait que ROS utilise des communications sur IP [Jaime et al., 2013]. Le surplus de données qu’il engendre n’est cependant pas un problème. En effet, tout d’abord, le réseau local du living lab propose un haut débit de plusieurs mégabits par seconde en Wi-Fi, pour lequel le surplus de données est négligeable. De plus, même si ce surplus ajoute quelques millisecondes de retard dans la transmission du signal, cette durée est négligeable lorsqu’on traite des données d’activité humaine. Par ailleurs le protocole IP, qui a été développé pour Internet, s’est largement popularisé ces dernières années, au point que plusieurs protocoles comme le Bluetooth cherchent à s’intégrer à des réseaux IP [SIG, 2014].

D’autres appartements intelligents et living labs ont utilisé des outils logiciels spécifiquement développés pour l’occasion. C’est le cas du projet SYLPH [Corchado et al., 2010] qui propose des fonctionnalités similaires mais manque d’une communauté de développeurs pour soutenir le projet. En effet, la communauté est révélatrice du dynamisme d’un projet open source. Elle permet le maintien à l’avant-garde des outils logiciels du projet pour qu’il reste pertinent. En effet, un système pertinent à un instant t le sera bien moins deux ans plus tard si aucune maintenance n’a été opérée. Le soutien de partenaires industriels à ROS est une fois de plus un atout.



FIGURE 3.8 – Plusieurs sponsors prestigieux de ROS

En résumé, ROS apporte à la fois une grande flexibilité, une compatibilité avec de nombreux robots et capteurs, des outils facilitant le développement autour du living lab, et une communauté active de développeurs et d'industriels pour dynamiser le projet. Tout ceci est possible au prix de performances légèrement inférieures à celles des systèmes dédiés à la domotique comme KNX, mais sans que cela ait d'impact dans nos cas d'usage. Pour cela, nous avons choisi de baser notre système de suivi d'activité sur ROS.

3.6 Calibration pour localiser dans le référentiel de l'appartement

Comme nous venons de le voir, grâce à la boîte à outils de logiciels constituée de OpenNI et de NITE, nous obtenons la position de plusieurs personnes (jusqu'à six) dans le champ de vision d'une caméra de profondeur Kinect. Ces positions sont données dans le repère de la Kinect (Figure 3.1). Les informations obtenues sont des coordonnées en millimètres, en trois dimensions pour un point de vue donné (Figure 3.9).

Or, pour couvrir un appartement dans sa globalité, il est nécessaire d'utiliser plusieurs caméras de profondeur. La gamme des distances compatibles avec la localisation de personnes par une caméra (entre 0.5 m et 5 m) impose même d'utiliser plusieurs caméras par pièce dès lors que la pièce dépasse une trentaine de mètres carré. Il est donc nécessaire de fusionner les données de localisation fournies par les différentes caméras de profondeur.

Pour cela, il est tout d'abord nécessaire d'établir un repère tri-dimensionnel lié à l'appartement, sur lequel projeter toutes les coordonnées des personnes localisées par une ou plusieurs caméras. Ainsi, les trajectoires pourront être mises en relation et comparées plus facilement.

La méthode décrite ici se base sur les coordonnées en millimètres des personnes détectées par la caméra. Elle suppose donc que les mesures sont correctement calibrées. Il est également possible, au prix d'une limitation à deux dimensions au lieu de trois, de se passer de cet a priori. La méthode en question est décrite en annexe B.

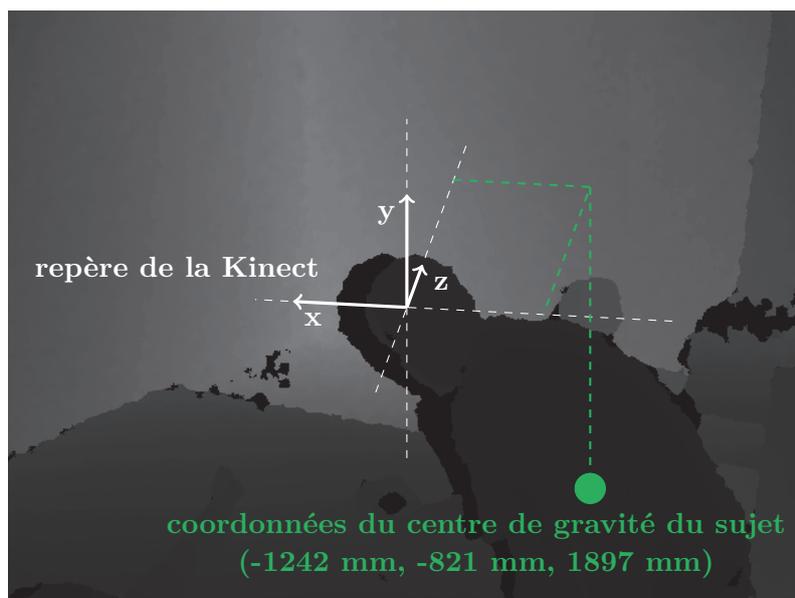


FIGURE 3.9 – Coordonnées du centre de gravité d’une personne dans le repère d’une Kinect



FIGURE 3.10 – Axes de roulis, de tangage et de lacet de la caméra

Pour être capable de passer du repère d’une caméra à celui de l’appartement (ou inversement), nous avons besoin de six paramètres qui localisent la caméra dans le repère de l’appartement. Ces paramètres sont :

- Les coordonnées tridimensionnelles (x, y, z) de la caméra dans le repère de l’appartement,
- Les angles d’Euler donnant l’orientation de la caméra. Nous considérerons les angles utilisés dans l’aviation autour des axes de roulis ψ , de tangage θ et de lacet ϕ (Figure 3.10).

Étant donné que les caméras sont considérées comme droites, au sens qu’elles sont posées sur un plan orthogonal à la verticale, la rotation d’angle ψ autour de l’axe de roulis est toujours nulle. Ceci nous ramène à cinq paramètres à déterminer pour pouvoir passer d’un repère d’une caméra à celui de l’appartement.

Tout d’abord pour mesurer les coordonnées tri-dimensionnelles (x, y, z) de la caméra dans le repère de l’appartement, il nous suffit de mesurer dans l’appartement où se trouve la caméra (Figure 3.11).

Reste alors à déterminer les deux angles de rotation manquants. Pour ce faire, étant donné que nous connaissons déjà les coordonnées tri-dimensionnelles de la caméra, il suffit de connaître un point qui est au centre du champ de vision de la caméra. La droite portée par ce point et la position de la caméra donnent la direction dans laquelle regarde la caméra. On peut représenter cette direction par une cible au centre d’une image filmée par la caméra (Figure 3.12).

Pour identifier le lacet, nous plaçons une colonne verticale dans la pièce de manière à ce qu’elle soit dans l’axe de la cible au centre de l’image de la caméra. En considérant une vue de dessus, la rotation autour de l’axe de lacet est facilement repérable (Figure 3.13). Il est alors possible de calculer les coordonnées du vecteur \vec{z}_c dans le repère de l’appartement à partir des coordonnées de la caméra et de la colonne dans le même repère. Ces coordonnées permettent de retrouver l’angle

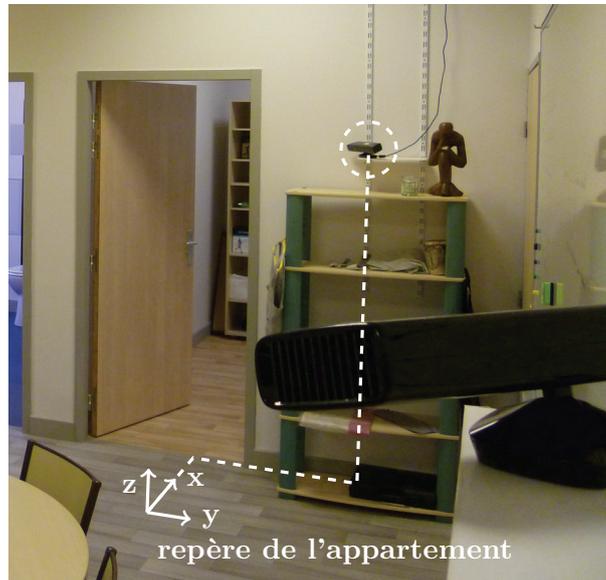


FIGURE 3.11 – Coordonnées de la caméra dans le repère de l'appartement

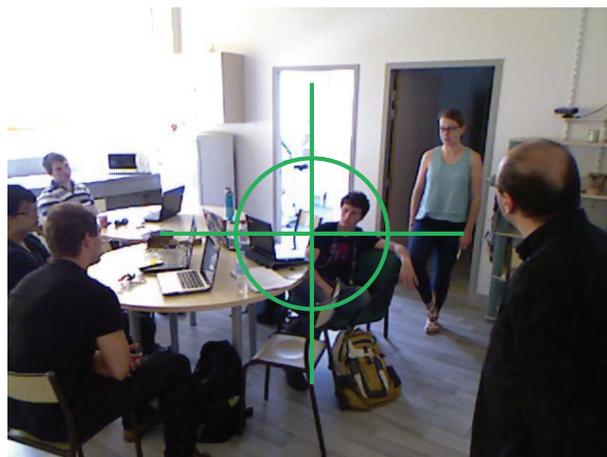


FIGURE 3.12 – cible représentant la direction dans laquelle regarde la caméra de profondeur

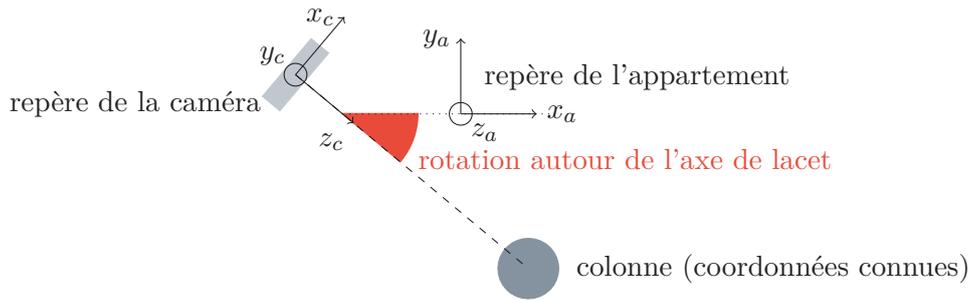


FIGURE 3.13 – Mesure de l’angle de rotation de la caméra autour de l’axe de lacet (vue de dessus)

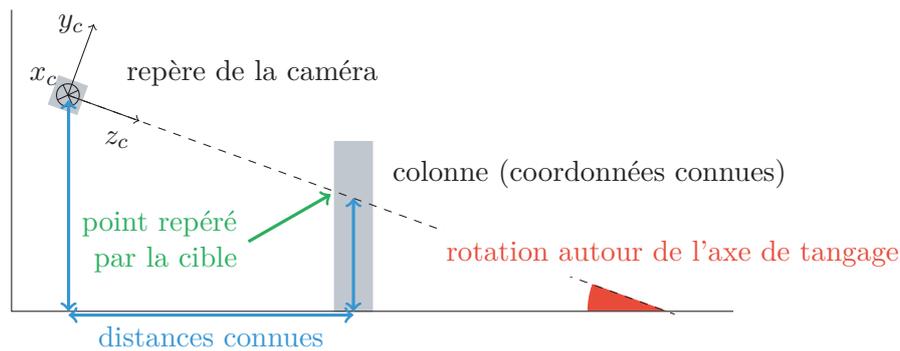


FIGURE 3.14 – Mesure de l’angle de rotation de la caméra autour de l’axe de tangage (vue de côté)

de rotation autour de l’axe de lacet par trigonométrie.

Pour identifier le tangage, la même colonne verticale est utilisée, mais cette fois-ci, nous avons également besoin de savoir l’altitude du point de la colonne qui est dans l’axe de la cible de la caméra présentée sur la figure 3.12. Sur la vue de côté proposée sur la figure 3.14, ce point est repéré en vert. La rotation autour de l’axe de tangage est facilement repérable (en rouge sur la figure). À partir des trois distances connues repérées en bleu sur la figure, il est alors possible de calculer la tangente de l’angle θ de rotation autour de l’axe de tangage, et donc d’obtenir l’angle recherché par trigonométrie.

Au final, nous avons eu besoin de connaître les positions en trois dimensions de la caméra et du point de la colonne qui se trouve dans l’axe central du champ de vision de la caméra. À partir de ces six coordonnées, il est donc possible de passer du repère d’une caméra à celui de l’appartement et inversement. Ceci nous permet de localiser une personne depuis plusieurs caméras et de projeter les trajectoires sur un repère commun.

Cette projection sera largement facilitée par l’utilisation d’un des outils proposés par ROS : *tf* [Foote, 2013]. Cette brique logicielle est justement faite pour convertir des coordonnées depuis un repère tri-dimensionnel vers un autre. C’est un outil très utilisé en robotique puisqu’il permet par exemple de choisir son point de vue en fonction de la tâche à accomplir. Si un robot humanoïde doit se déplacer, le repère associé à sa tête semble le plus pertinent pour se repérer, mais s’il doit saisir un objet, un repère lié à son avant bras peut s’avérer plus pratique. Dans notre cas d’usage, l’outil *tf* permettra, sans aucun développement logiciel supplémentaire, d’obtenir les coordonnées des personnes détectées dans le repère de l’appartement, à partir des données dans les repères des caméras. Il suffit pour cela de décrire les positions des repères les uns par rapport aux autres par la méthode décrite dans cette section.

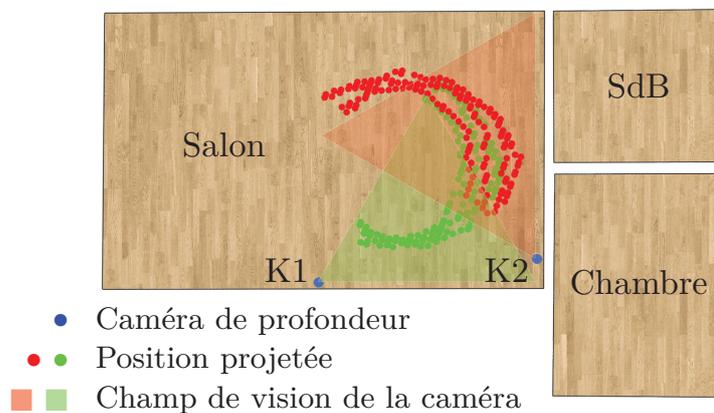


FIGURE 3.15 – Projection de trajectoires vues par deux caméras de profondeur Kinects, K1 (vert) et K2 (rouge) dans notre living lab

3.7 Fusion de trajectoires

Les données de localisation obtenues à partir des caméras de profondeur, via le logiciel OpenNI, sont donc projetées sur un repère commun. Cette projection est facilitée par l'utilisation de la brique logicielle *tf* disponible au sein de l'environnement ROS. Les positions obtenues peuvent maintenant être tracées sur une carte de l'appartement comme le montre la figure 3.15. La projection dans un repère commun permet d'identifier immédiatement une grande corrélation entre les trajectoires détectées séparément par les deux caméras de profondeur représentées.

Sur cette figure, les positions successives d'une personne faisant le tour d'une table sont représentées. La scène peut se découper en quatre étapes :

1. La personne entre dans le champ de vision de la Kinect K1 (en bas),
2. Elle entre dans la zone commune aux champs de vision des deux caméras de profondeur K1 et K2 (à droite),
3. Elle sort du champ de vision de la caméra de profondeur K1 et n'est plus visible que par K2 (en haut),
4. Elle sort également du champ de vision de K2.

Afin de pouvoir analyser la trajectoire complète d'une personne dans l'appartement, il est alors nécessaire de fusionner ces trajectoires si elles correspondent à une seule et même personne vue par plusieurs caméras de profondeur. Afin d'arriver à un tel résultat, la zone commune aux champs de vision des deux caméras de profondeur a été utilisée. Dans cette zone, il est en effet possible de comparer les positions mesurées par les différentes caméras. Si la corrélation entre les deux trajectoires est suffisamment importante, les deux trajectoires pourraient correspondre à la même personne, ce qui permettrait de les fusionner. Il est donc nécessaire de mesurer une distance entre des trajectoires vues par plusieurs caméras.

Tout d'abord, se pose la question de la méthode d'échantillonnage. En effet, les positions mesurées par la Kinect le sont à une fréquence proche de 10Hz, mais la période entre deux échantillons est loin d'être constante. De plus, le début de détection d'une trajectoire n'étant pas le même pour toutes les caméras, même si les positions étaient échantillonnées à la même fréquence, celles-ci ne seraient pas simultanées. Nous avons donc deux possibilités de gérer cette spécificité :

- Interpoler les échantillons et utiliser une métrique classique
- Utiliser une métrique qui prenne en compte un échantillonnage variable

Plusieurs métriques comme la distance Euclidienne ou le Dynamic Time Warping (DTW) [Chen et al., 2005] peuvent être utilisées dans le premier cas. Celles-ci comparent des trajectoires sans considérer le temps comme un paramètre de leur algorithme. Pour éviter de devoir interpoler les échantillons et réduire la puissance de calcul nécessaire au calcul de distance, nous avons proposé une méthode utilisant à la fois l'instant d'échantillonnage et la distance euclidienne entre les positions.

3.7.1 Une distance pondérée pour échantillonnage variable

Cette méthode que nous avons développée est appelée “Dynamic Spatiotemporal Correlation” (DSC) [Sevrin et al., 2015c]. Celle-ci calcule une distance pondérée D^W . La distance pondérée D_i^W entre deux positions de deux trajectoires différentes est le produit d’un facteur de qualité $Q_i \in [0, 1]$ où 1 représente la meilleure qualité et un facteur de longueur $L_i \in [-1, +\infty]$. Les deux positions ne sont pas échantillonnées au même instant. De ce fait, le facteur de qualité considère le délais entre les deux mesures : $Q_i = \max(0, 1 - 2\Delta t^2)$ où Δt est en secondes. Le facteur de longueur L_i est défini comme suit : $L_i = d_{\text{entre points}} - 1$ où la distance est en mètres. Finalement, le DSC entre deux trajectoires est la somme des distances pondérées en considérant tous les points des deux trajectoires : $D^W = \sum_i 1 + D_i^W = \sum_i 1 + L_i \times Q_i$. Le facteur D_i^W est incrémenté de 1 afin que D^W soit toujours positif et plus facile à comparer avec les autres méthodes de calcul de distance.

Pour comprendre la méthode du DSC, trois cas sont à considérer. Tout d’abord, si deux échantillons sont proches en terme d’instant d’échantillonnage et de coordonnées, cela tend à montrer que les deux trajectoires relèvent d’une seule personne. Dans ce cas, Q_i sera proche de 1 et L_i sera proche de -1 . Ainsi, D_i^W sera proche de -1 , la distance pondérée est augmentée. Ensuite, si les deux échantillons sont proches en terme d’instant d’échantillonnage, mais pas de coordonnées, cela tend à montrer que les trajectoires ne correspondent pas à la même personne. Dans ce cas, Q_i est proche de 1 et $L_i \gg 0$. Ce qui donne $D_i^W \gg 0$, la distance pondérée augmente. Enfin, si les deux échantillons sont éloignés en terme d’instant d’échantillonnage, leur comparaison a peu de valeur. Dans ce cas, Q_i est proche de 0, donc D_i^W aussi, la distance pondérée n’évolue pas.

Comme dans les autres mesures de distance, plus les trajectoires sont proches, plus la distance pondérée est faible. Grâce au facteur de qualité, seules les comparaisons des échantillons proches en terme d’instant d’échantillonnage influent sur la mesure du DSC et elles influent d’autant plus qu’ils sont proches temporellement. Si la distance pondérée atteint un seuil (défini empiriquement à partir de données d’expériences), les trajectoires sont considérées comme ne correspondant pas à une même personne. Si au contraire, la DSC est sous ce seuil, et si une seule solution de fusion est possible, celle-ci est opérée. Mais si plusieurs trajectoires d’une caméra K1 peuvent correspondre à une trajectoire mesurée par une caméra K2 (sous le seuil dans les deux cas), la fusion est opérée uniquement entre les trajectoires les plus proches.

3.7.2 Comparaison des mesures de distance

Trois métriques ont été envisagées pour permettre la fusion des trajectoires d’une même personne vue par plusieurs caméras en se basant sur une zone commune aux champs de vision des trajectoires : la distance euclidienne, le Dynamic Time Warping (DTW) et le Dynamic Spatiotemporal Correlation (DSC). Afin de choisir la méthode la plus pertinente, leurs capacités à séparer les trajectoires de deux personnes qui se suivent ont été comparées. Pour effectuer cette comparaison, la trajectoire d’une personne (A) a été enregistrée lorsqu’elle passe devant deux caméras de profondeur. La trajectoire d’une seconde personne (B) est simulée par l’ajout d’un offset temporel sur les instants d’échantillonnage de la même trajectoire. Ainsi, non seulement ce cas est le pire envisageable puisque les personnes suivent exactement le même chemin, mais de plus il est possible de moduler la distance séparant les deux personnes en jouant sur l’offset temporel.

Un scénario simple, similaire à celui décrit sur la figure 3.15 est joué selon trois trajectoires différentes, répétées quatre fois chacune. Dans ce scénario, une personne entre dans le champ de vision d’une première caméra, puis continue son chemin dans la zone commune aux champs de vision des deux caméras, pour finir par arriver dans le champ de la seconde caméra uniquement et sortir de la zone couverte. Pour les deux caméras de profondeur, la trajectoire de la personne réelle est enregistrée, et celle de la seconde personne (B) est simulée par l’ajout d’un offset sur les instants d’échantillonnage. De ce fait, nous obtenons quatre trajectoires T1A, T1B, T2A, T2B décrites dans la table 3.1. Le résultat attendu est l’association de T1A avec T2A et de T1B avec T2B.

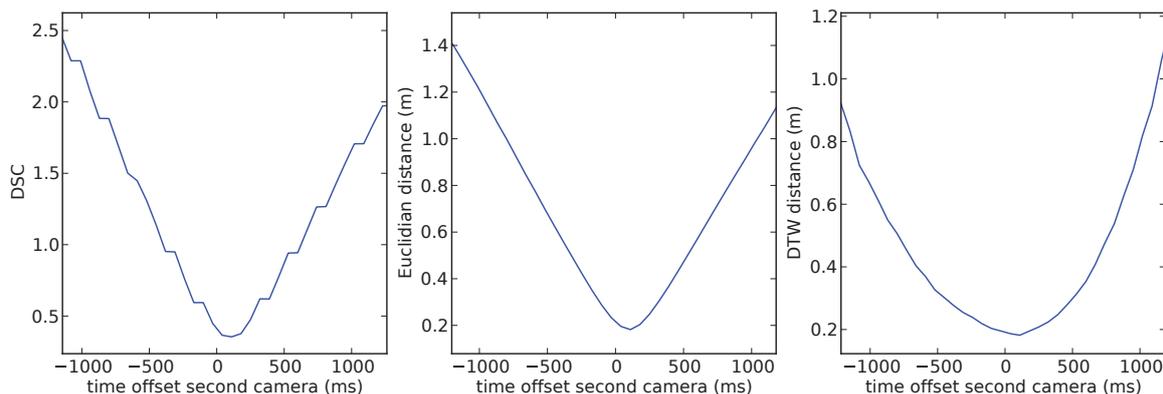


FIGURE 3.16 – Comparaison des métriques montrant des résultats similaires

La distance entre T1A et T2A est comparée à la distance entre T1A et T2B pour différentes valeurs d’offset temporel, et ceci pour les trois méthodes évaluées. La méthode DSC se base sur les données brutes fournies par la Kinect, alors que les autres méthodes nécessitent un pré-traitement pour interpoler les données et obtenir un simulé d’échantillonnage régulier, qui rajoute également des erreurs car l’interpolation linéaire des positions ne correspond pas exactement à ce qu’aurait mesuré une caméra de profondeur. L’analyse effectuée sur les différentes répétitions des scénarios a donné des résultats similaires concernant la comparaison des métriques. Une de ces comparaisons est présentée sur la figure 3.16.

Les trois figures montrent les distances entre T1A et T2B pour différentes valeurs d’offset. Ces distances sont équivalentes à celle entre T2A et T1B pour des valeurs opposées d’offset, ce qui veut dire que les graphes seraient identiques à une symétrie axiale près. Quand l’offset est nul, T2B est égal à T2A. Ainsi, toutes les associations de trajectoires sont bien analysées en considérant uniquement les distances entre T1A et T2B. En fonction de l’offset utilisé, le nombre de positions pouvant être comparées varie. Les données ont donc été normalisées.

Cette comparaison montre que les trois métriques donnent des résultats similaires. Plus l’offset est grand, plus les personnes qui se suivent sont virtuellement éloignées, et plus la distance entre les trajectoires T2B et T1A est grande. La valeur absolue des distances n’a pas d’intérêt ici, seule compte la variation de la distance permettant ou non de séparer des trajectoires distinctes.

Deux personnes se suivant proche l’une de l’autre (à un mètre de distance) seront séparées au minimum par un délai d’une seconde à une vitesse de marche moyenne (3,6 km/h). La trajectoire T1A est bien plus proche de T2A (offset nul sur la figure 3.16) que de T2B pour un offset temporel d’une seconde. Dans ce cas, ce sont donc bien les trajectoires T1A et T2A qui seront fusionnées, ainsi que T1B et T2B comme attendu.

En considérant cet offset de référence d’une seconde, les trois métriques considérées sont capables de séparer deux personnes qui se suivent avec des performances similaires. Le choix entre les techniques est donc motivé par la simplicité d’utilisation et la quantité de calculs nécessaire. Parmi ces trois méthodes, le calcul par distance euclidienne est le plus simple, mais nécessite l’interpolation des données. Or, l’outil tf que nous avons déjà utilisé pour faire les projections depuis les repères des caméras vers le repère de l’appartement, est nativement capable d’interpoler les

TABLE 3.1 – Trajectoires

Trajectoire	Kinect	Personne
T1A	1	A (réelle, pas d’offset)
T1B	1	B (simulée, offset variable)
T2A	2	A (réelle, pas d’offset)
T2B	2	B (simulée, offset variable)

données de positions qu'il mesure. L'interpolation peut donc se faire pour un coût de développement nul (il suffit d'utiliser l'outil `tf`). De plus, l'interpolation effectuée par `tf` est optimisée pour ROS, ce qui garantit des performances élevées. Enfin, cela permet d'utiliser la distance euclidienne qui est la plus simple en terme de calcul, donc la plus rapide. Sans l'outil `tf` de ROS, la méthode DSC aurait eu un grand intérêt, mais ici, c'est finalement la distance euclidienne qui est choisie pour permettre de décider de fusionner ou non des trajectoires mesurées par différentes caméras de profondeur.

3.7.3 Synchronisation des mesures

Le choix des caméras de profondeur Kinect a imposé une contrainte importante à l'architecture de notre système de suivi de trajectoire, qui est d'avoir un ordinateur par Kinect. En effet, que ce soit avec le logiciel fourni par Microsoft ou en utilisant OpenNI, il est très compliqué d'obtenir les images couleur et de profondeur de plusieurs caméras Kinect connectées à un même ordinateur, et impossible de récupérer les données de position. Dans le cas d'OpenNI, le logiciel choisit aléatoirement un des deux dispositifs connectés, ce qui n'est pas viable. Connecter chaque Kinect à un ordinateur dédié est donc indispensable.

Chaque ordinateur du réseau ayant sa propre horloge, les données mesurées ne sont pas synchronisées a priori. Ceci est très gênant puisque notre fusion de trajectoire se base sur les instants d'échantillonnage.

Pour y remédier, une première méthode consiste à n'utiliser que l'horloge de l'ordinateur principal qui reçoit les positions. L'instant d'échantillonnage considéré est alors l'instant de réception de la donnée. Cela présuppose que les données mettent toutes le même temps à arriver jusqu'à l'ordinateur central. Or les délais peuvent beaucoup varier, surtout en cas de charge importante du réseau, si l'on échange des données vidéo par exemple. De ce fait, cette méthode n'est pas assez fiable pour notre système.

Une deuxième méthode consiste à synchroniser les ordinateurs entre eux. C'est un processus plus lourd qui implique la mise en place d'un serveur de temps au sein du réseau d'ordinateurs et l'utilisation d'outils de synchronisation tels que *chrony* [Chrony, 2016]. De cette manière, les horloges des ordinateurs du réseau sont synchronisées avec une précision autour du centième de seconde. Cette deuxième solution, bien que plus lourde, a donc été choisie pour permettre une confiance dans les instants d'échantillonnage reçus par l'ordinateur central qui les stocke tels quels.

3.8 Synthèse de l'architecture logicielle et matérielle

Le système décrit dans cette partie est donc capable de

- Récupérer les positions des personnes depuis les Kinect,
- Projeter les coordonnées obtenues dans le repère de l'appartement,
- Stocker ces données dans une base de données géographiques,
- Fusionner les trajectoires appartenant à une même personne.

Toutes ces fonctions sont présentées dans le schéma d'architecture représenté sur la figure 3.17. En partant du haut du schéma, nous voyons que les coordonnées des personnes sont obtenues à partir de la Kinect, puis projetées sur le repère de l'appartement. Elles sont ensuite transmises à l'ordinateur central où elles sont stockées dans une base de données et analysées.

Les nœuds ROS représentés en bleu sont des briques logicielles indépendantes qui ont été développées dans le cadre de cette thèse. Il est tout d'abord intéressant de remarquer que les fonctions principales du système ont été clairement séparées, ce qui facilite la compréhension, le test et surtout la flexibilité sur le long terme. En effet, ces briques communiquent entre elles via une interface standardisée de ROS. Cette méthode a la particularité d'utiliser des topics, qui sont des sortes de registres sur lesquels n'importe quel nœud ROS peut écrire un message (Figure 3.18). Pour les coordonnées projetées, un topic spécifique a donc été créé avec les champs suivant :

- identifiant caméra (nombre entier)
- identifiant personne (nombre entier)
- instant d'échantillonnage (date au format ROS)

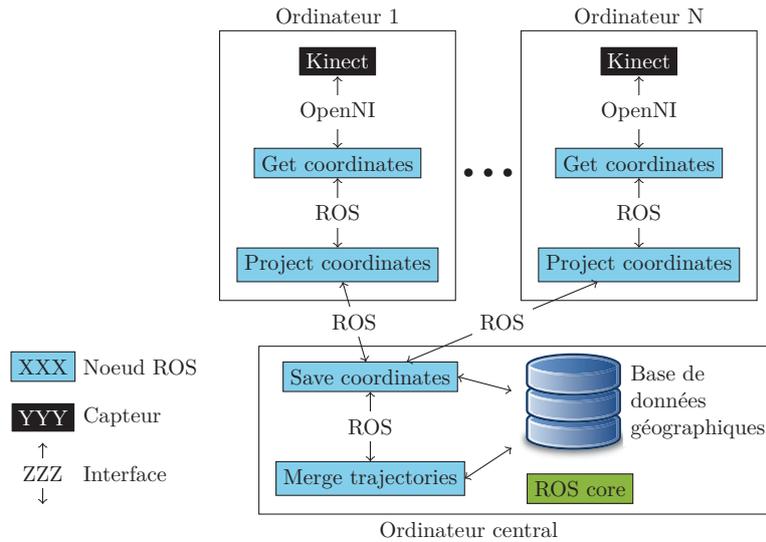


FIGURE 3.17 – Architecture du système de localisation

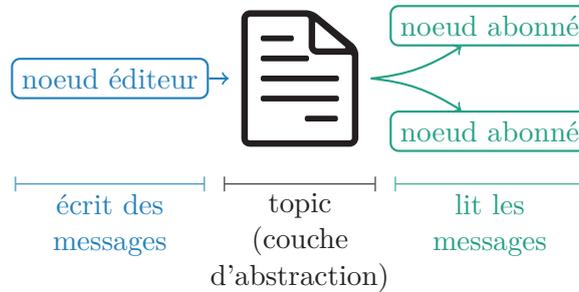


FIGURE 3.18 – Protocole de communication de ROS, basé sur des topics

- coordonnée selon x (nombre réel)
- coordonnée selon y (nombre réel)
- coordonnée selon z (nombre réel)

Tous les nœuds ROS peuvent alors publier des coordonnées sur ce topic ou les lire. En particulier dans notre cas d'usage, les nœuds **project coordinates** écrivent les coordonnées sur le topic (représenté par des interfaces ROS), qui est lu par le nœud **save coordinates** (Figure 3.17). De cette manière, le nœud qui reçoit les données ne sait pas d'où vient l'information, il sait juste qu'elle est publiée sur le topic. Ainsi, si un nouveau système de localisation est envisagé pour remplacer les Kinects, et que celui-ci permet également d'obtenir des données projetées dans le repère de l'appartement, les nœuds traitant ces données projetées pourront être conservés intacts. La flexibilité de ROS permettant sa pérennité dans le temps apparaît ainsi de manière éclatante.

3.9 Discussion

La localisation dans un appartement basée sur des caméras de profondeur est donc possible. Comme décrit dans l'état de l'art, cette solution s'intègre dans l'appartement sans nécessiter de modifications majeures. En effet, une prise électrique suffit, les données étant transmises sur un réseau Wi-Fi. La précision de la caméra de profondeur largement sous le demi-mètre a été validée, elle permet même de séparer les trajectoires de deux personnes se suivant à un mètre de distance.

Pour autant, la Kinect a aussi ses limites. Comme cela avait déjà été évoqué, ce système ne peut couvrir raisonnablement un appartement entier. Des zones blanches, non couvertes limitent la détection et l'analyse des trajectoires. Quand bien même un appartement serait entièrement couvert, il existera toujours des cas où deux personnes se masqueront l'une l'autre, où une porte ou

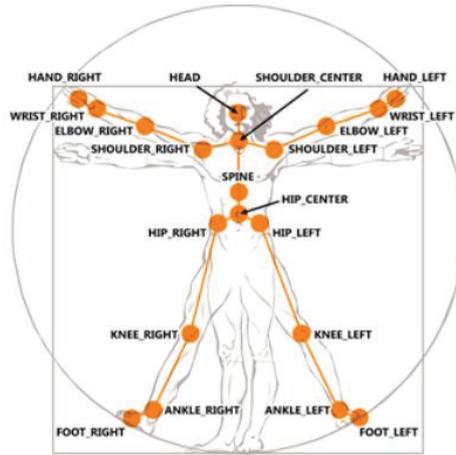


FIGURE 3.19 – Squelette détectable par la Kinect

un meuble masquera un individu, autant de cas qui montrent qu’il ne faut pas chercher à couvrir tout l’appartement, mais à bien couvrir les zones d’activité. Par exemple, un couloir est rarement le théâtre d’activités, surtout d’activités collaboratives, et il est possible de reconstruire une trajectoire en sachant d’où part une personne et où elle arrive. Même sans réussir à reconstruire, nous analysons l’évolution de l’activité sur le long terme. La granularité grossière des données suffit donc, contrairement à une détection de chute par exemple.

Par ailleurs les tests effectués ont également montré que l’algorithme de localisation était imparfait. Il arrive régulièrement que celui-ci considère un frigo ou une porte comme étant une personne. Ces erreurs sont très liées à la technologie choisie qui tente d’identifier un corps à partir d’une forme pouvant être une personne debout les bras balants. Un traitement supplémentaire sur les données devra donc être effectué pour réduire ces fausses détections. Par exemple, en se basant sur la quantité de mouvement d’une détection. En effet, si un frigo est détecté comme une personne, cela ne le fera pas se déplacer. Il devrait donc être immobile du début à la fin de sa détection. Reste alors à ne pas éliminer une personne regardant un film sur le canapé ou en train de dormir car ces situations n’entraînent pas de déplacements.

Ces limites pourraient être réduites par la détection du “squelette” des personnes. Cette fonction, proposée par NITE, permet de localiser, non seulement le centre de gravité des personnes, mais aussi différents point du corps (mains, coudes, genoux, etc.) comme le montre la figure 3.19. Cependant, cette analyse est à la fois bien plus lente à se mettre en place (il faut attendre plusieurs secondes avant d’être détecté) et nécessite que la personne se place dans une position particulière en levant les bras.

Enfin, dans le cas du suivi de plusieurs personnes au domicile, il est nécessaire d’identifier ces personnes. Ainsi, si elles pénètrent dans une zone non couverte, puis reviennent, il sera possible de compléter les trajectoires. Cette identification n’est pas proposée par OpenNI, cependant, un outils de reconnaissance faciale, qui utilise la caméra couleur de la Kinect, est disponible de manière intégrée à ROS. La reconnaissance faciale étant peu fiable, surtout lorsque les personnes ne sont pas en face de la caméra à une distance réduite. De ce fait, il pourra être pertinent de compléter cette information par l’analyse de la couleur des vêtements portés ou encore par l’utilisation de systèmes complémentaires comme des tags Bluetooth, capables d’identifier les téléphones se trouvant à moins de deux mètres du tag.

4

Un living lab pour le suivi des trajectoires de vie

4.1 Introduction

Afin de suivre les activités, en particulier collaboratives, de plusieurs personnes au quotidien, nous avons mis en place une plateforme de test : un living lab appelé LivINLab en référence au laboratoire INL où cette thèse est effectuée (figure 4.1). Ce living lab propose une approche originale, à la fois par son orientation vers le domaine de la santé, mais aussi par son périmètre. En effet, l'activité d'un individu ne s'arrête pas lorsqu'il sort de son domicile. En conséquence, notre living lab a été conçu pour être une plateforme de suivi de l'activité étendue à la cité, c'est-à-dire à la fois au domicile, mais aussi lors des déplacements en dehors.

Ce living lab orienté en santé doit proposer un espace de travail qui ne soit pas réservé aux chercheurs, mais où des groupes de personnes pourront échanger leurs idées, les tester, les améliorer, etc. Le fonctionnement du living lab doit donc être facilement compréhensible par des utilisateurs non spécialistes. Il doit avoir une forte affordance, c'est-à-dire qu'il doit susciter naturellement sa propre fonction.

Ce chapitre présente ainsi tout d'abord l'approche bio-inspirée du LivINLab qui vise à augmenter son affordance. Puis, l'intégration du système de localisation qui a été caractérisé dans le chapitre précédent, ainsi que de nouveaux capteurs permettant de pallier les limites associées à la localisation par caméras de seront décrits. L'agrégation des données hétérogènes et non plus seulement de position sera également discutée. Pour finir, un exemple de retour direct proposé aux utilisateurs du living lab et faisant intervenir des capteurs variés sera décrit. Cet exemple permettra d'illustrer la manière dont la plateforme cherche à susciter l'innovation chez les utilisateurs, et de montrer la capacité du système à intégrer de nombreux capteurs par une approche modulaire, flexible et évolutive.



FIGURE 4.1 – Logo du living lab de l'INL

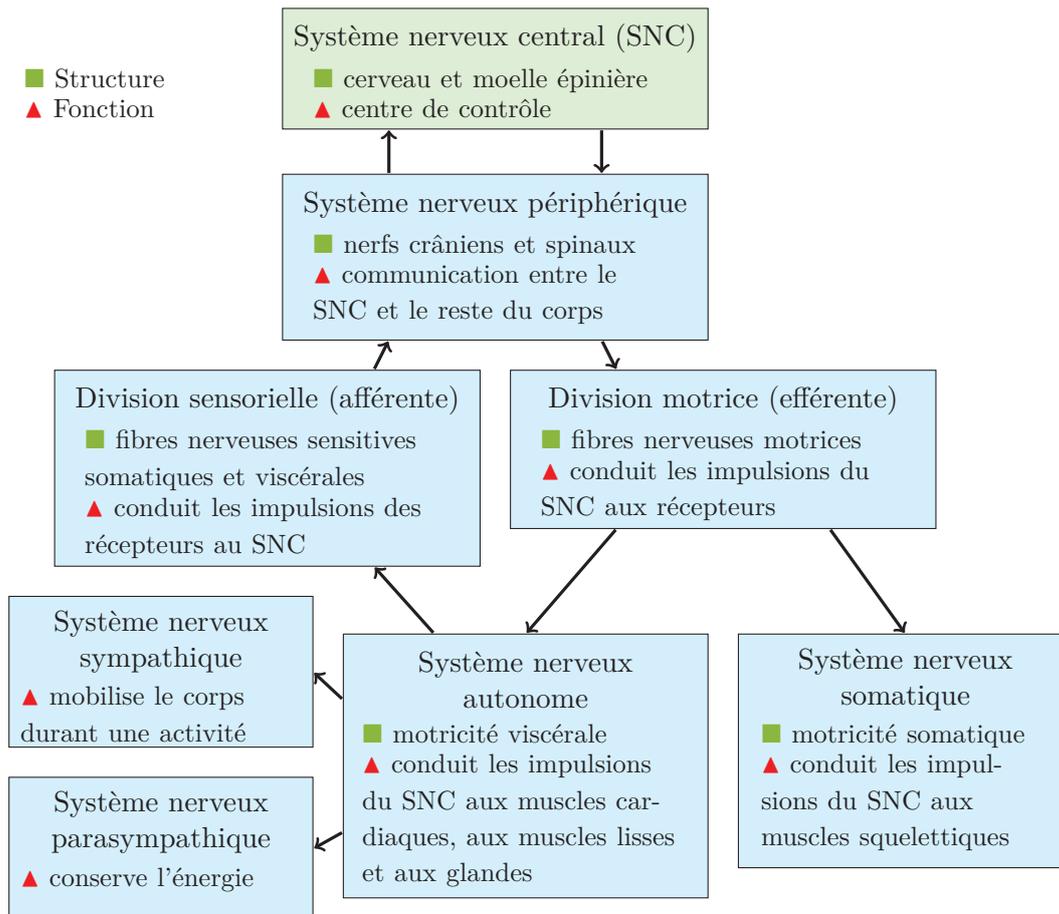


FIGURE 4.2 – Système nerveux humain

4.2 Le living lab comme exosquelette de ses occupants

Le living lab doit avoir une affordance importante pour être facilement compris, assimilé, maîtrisé par ses occupants. En effet, ceux-ci peuvent venir de tous horizons pour s'en servir comme d'un espace de réflexion et de co-conception de systèmes pour la santé à domicile. Les possibilités offertes par la plateforme doivent aller bien au-delà des cas d'usage qui peuvent être envisagés aujourd'hui lors de la conception. Il est ainsi nécessaire de permettre l'évolution de la plateforme avec l'arrivée de nouvelles idées, de nouvelles technologies, de nouveaux besoins. Ces travaux ont été présentés lors de la conférence HealthCom 2015 [Sevrin et al., 2015a].

Le living lab a ainsi été pensé comme une extension, un exosquelette de ses occupants. Pour favoriser cette affordance, nous décidons d'adopter une approche "bio-inspirée", l'habitat étant pensé comme un robot "exosquelette". Cette inspiration du fonctionnement du corps humain permet une perception plus naturelle de ses possibilités par des utilisateurs d'horizons et de niveaux de formations très variables. Pour cela, il nous faut faire référence au système nerveux humain présenté schématiquement sur la figure 4.2. On y voit que notre système nerveux contient des mécanismes de régulation qui font intervenir une division sensorielle (afférente) et une division motrice (efférente). Pour permettre une analogie avec notre robot bio-inspiré que doit être le living lab, notre environnement intelligent utilise un ensemble de capteurs (division sensorielle) qui envoient les données vers un système central (système nerveux central), lequel peut déclencher des actions via des actionneurs (division motrice). Les communications entre ces différents éléments en réseau sont alors équivalentes à celles gérées par le système nerveux périphérique. Cette analogie est synthétisée sur la figure 4.3. En pratique, cette approche se présente sous la forme d'un ensemble de capteurs et d'actionneurs communiquant avec un système central commun capable de fusionner les données (Figure 4.4).

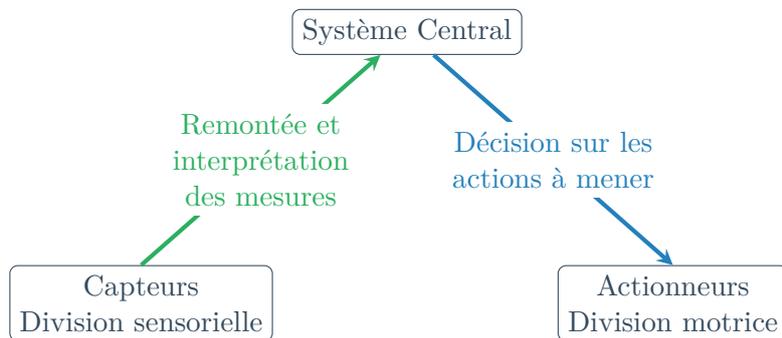


FIGURE 4.3 – Le fonctionnement bio-inspiré du living lab

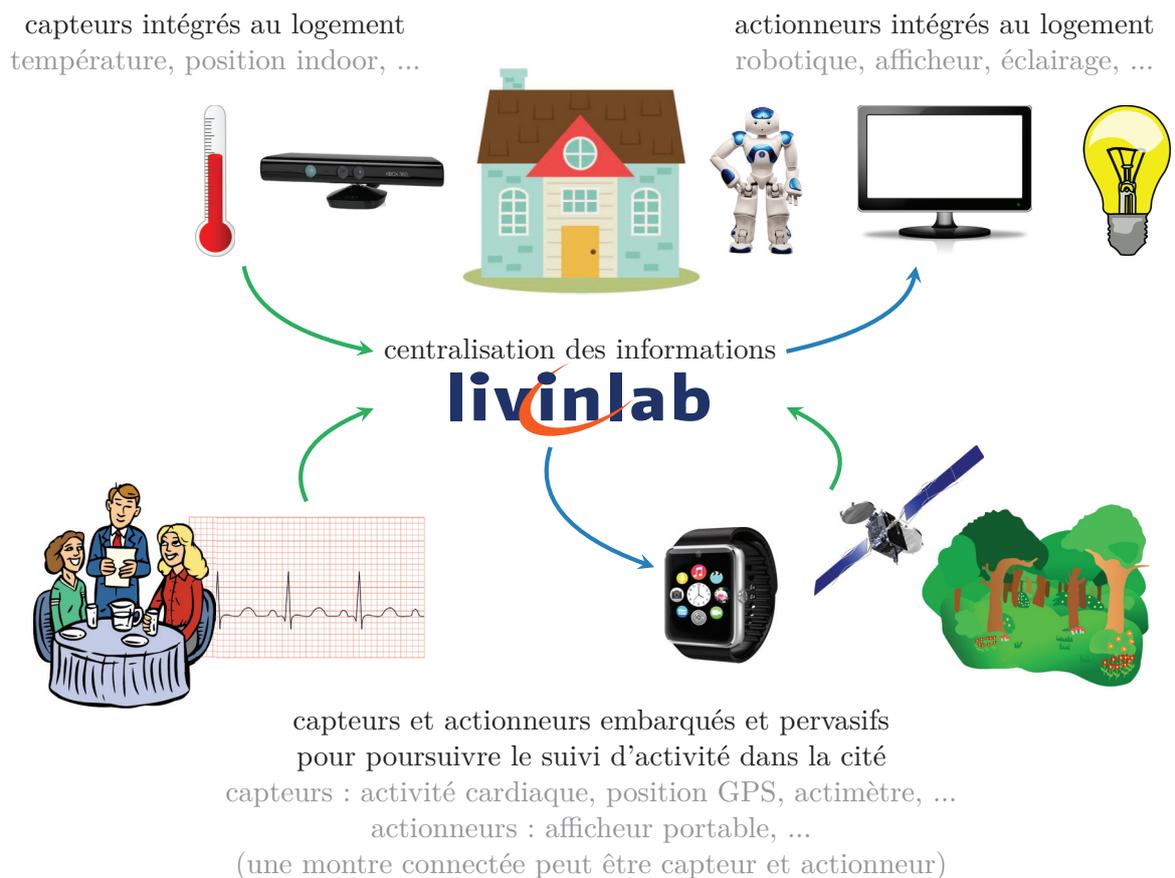


FIGURE 4.4 – Un ensemble de capteurs et d'actionneurs variés et évolutifs pour suivre au mieux l'activité au domicile et dans la cité

Les liens entre les données mesurées et les actions effectuées suivent des règles modifiables par les utilisateurs du living lab. Le but est alors, en gardant à l'esprit que l'appartement est un exosquelette de ses occupants, que ces derniers l'adaptent à leurs besoins, non seulement en changeant les règles de fonctionnement, mais aussi en ajoutant, en modifiant, en créant des capteurs et des actionneurs. Ceux qui sont en place dans le living lab représentent un point de départ permettant l'analyse de scénarios d'activités variés, mais ne couvrent pas l'ensemble des possibilités de la plateforme qui dépendra des futurs utilisateurs. Cette capacité du living lab à évoluer, à intégrer facilement de nouvelles idées et de nouveaux équipements créerait alors un univers de possibilités extrêmement vaste, où la limite ne serait plus la technologie ou le manque de lien entre un lieu de vie et ses habitants, mais deviendrait la seule créativité des occupants.

4.3 Dépasser les limites de la localisation indoor

Dans le but de favoriser la mobilité, donc l'autonomie des futurs occupants du living lab, mais aussi pour améliorer encore l'affordance de ce dernier et permettre l'intégration de nouveaux dispositifs, il paraît pertinent d'enrichir vers l'extérieur (outdoor) notre système de localisation limité à l'intérieur (indoor). Considérons le scénario suivant : une personne est à son domicile, regarde la télévision, puis sort faire les courses. Elle rentre à son domicile, puis ressort pour se promener en forêt avec des amis. La personne est donc sortie deux fois, mais dans deux endroits différents pour des activités différentes, sans que l'on puisse faire de différence en suivant les seules trajectoires au domicile. Ces sorties peuvent représenter une part non négligeable des interactions sociales et plus généralement de l'activité d'une personne. Il paraît donc pertinent de suivre l'activité de la personne hors de son logement au même titre qu'à l'intérieur. Ceci revient à chercher un continuum entre le suivi à domicile et hors du domicile. Nous avons envisagé plusieurs moyens d'assurer ce continuum, dont le simple suivi de trajectoires hors du domicile, ou encore le suivi de l'activité cardiaque de l'individu qui varie pour s'adapter à l'effort physique produit ; par exemple celui fourni lors d'une promenade est supérieur à celui enregistré lors d'une discussion calme autour d'un café.

À cela s'ajoute le besoin de contextualiser la mesure d'activité par l'analyse de paramètres environnementaux. Prenons l'exemple des fortes chaleurs, peu propices à l'activité. Il est normal qu'une personne soit globalement moins active que d'habitude s'il fait 10°C de plus dans son appartement. Pour se rafraîchir, elle peut potentiellement prendre plus de douches que d'habitude. Ces scénarios montrent la pertinence de l'utilisation de capteurs complémentaires aux caméras de profondeur. Ces capteurs doivent permettre à la fois le continuum entre le suivi à domicile et à l'extérieur, et la contextualisation des mesures faites au domicile.

4.4 Étendre la localisation hors du domicile

4.4.1 Architecture évolutive du système de localisation indoor

Tout d'abord l'architecture que nous avons adoptée, basée sur les nœuds ROS, nous permet d'abstraire la fonction de localisation et donc de bénéficier de toute une panoplie de moyens de localisations mis à notre disposition. En effet, les différentes opérations nécessaires à la localisation ont été clairement séparées à l'aide de nœuds ROS indépendants. Ces nœuds ROS sont des briques logicielles qui peuvent être programmées principalement en Python ou en C++, sachant que l'écosystème ROS s'ouvre progressivement à d'autres langages comme Java et Javascript pour toucher une plus grande communauté de développeurs. Même si ces nœuds ont été développés avec des langages de programmation différents, ils peuvent communiquer entre eux très facilement au travers de *topics*. Ce sont des registres sur lesquels il est possible pour un nœud d'écrire un ensemble de données, lequel sera ensuite accessible à tous les nœuds du réseau qui auront souscrit à ce topic. Ces communications sont standardisées et gérées par le ROS core, une brique logicielle à la base du système ROS.

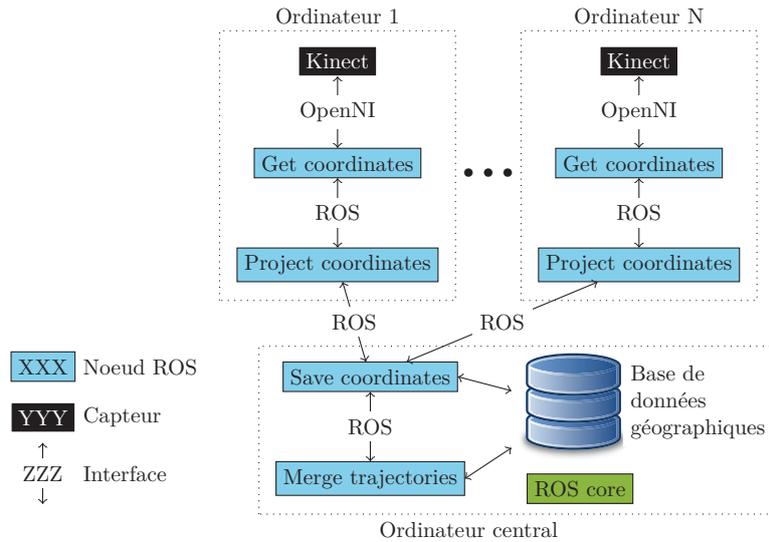


FIGURE 4.5 – Architecture du système de localisation, ROS permet de s’abstraire de l’architecture matérielle

Les possibilités offertes par ce standard de communication vont même bien plus loin puisque les fonctions permettant de lire et d’écrire sur des topics fonctionnent indépendamment de l’ordinateur du réseau sur lequel sont exécutés les nœuds. En résumé, grâce à ROS, un réseau d’ordinateurs sur lesquels sont exécutées des briques logicielles qui souhaitent communiquer entre elles, devient un nuage de nœuds totalement abstraits de l’infrastructure matérielle et qui communiquent via des topics sans contrainte de topologie.

Le schéma de la figure 4.5, déjà évoqué dans le chapitre précédent, pourrait ainsi être représenté sans les séparations liées au matériel, ici représentées en pointillés.

4.4.2 Localiser à l’échelle nationale et mondiale

Comme nous l’avons explicité en introduction, l’objectif n’est plus de se limiter au seul logement, mais de voir bien plus loin avec une localisation dans la cité et dans le monde. Une conséquence directe d’un tel changement serait la compatibilité avec d’autres systèmes de localisation tels que le GPS. Ce continuum a déjà été évoqué dans le chapitre 2 où nous avons insisté sur le besoin de poursuivre le suivi hors de l’appartement.

L’objectif est donc de passer d’un repère lié à l’appartement à un repère géographique standard, appelé projection. Il existe des centaines de systèmes de projection différents couvrant chacun des besoins variés [EPSG.io, 2015]. La terre ayant une forme de sphère aplatie aux pôles, un repère en mètre n’est pas adapté pour couvrir le globe. C’est pourquoi les systèmes de projections utilisables sur toute la planète utilisent des coordonnées en degrés (latitude et longitude). C’est le cas du repère utilisé par le système GPS : EPSG :4326, aussi appelé WSG84. Une autre projection célèbre est celle du Mercator (Figure 4.6. C’est celle qui est utilisée sur la grande majorité des planisphères. Elle a la particularité de conserver les angles, d’où son intérêt pour la navigation, mais modifie largement les distances.

Dans notre cas, nous souhaitons travailler sur des interactions entre les personnes, lesquelles peuvent être liées à des proximités géographiques (distances). C’est d’ailleurs la sphère d’interaction évoquée dans le chapitre 1 qui a défini l’objectif d’une résolution de localisation d’un demi-mètre. De ce fait, pour faciliter les calculs et ne pas devoir utiliser de coordonnées en degrés, il serait préférable d’utiliser une projection en mètres, tout en conservant les angles. Ce type de projection n’est pas possible à l’échelle du globe comme nous venons de le voir, mais existe à des échelles plus locales. C’est le cas de la projection EPSG :27572, aussi appelée Lambert zone II. Cette projection couvre la France métropolitaine hors Corse (Figure 4.7). Elle est compatible avec la projection du système GPS, mais uniquement dans la zone où elle est définie. Au-delà, l’erreur

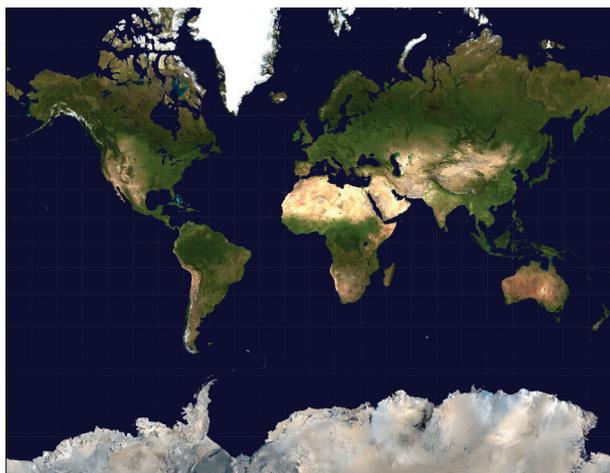


FIGURE 4.6 – Projection du Mercator

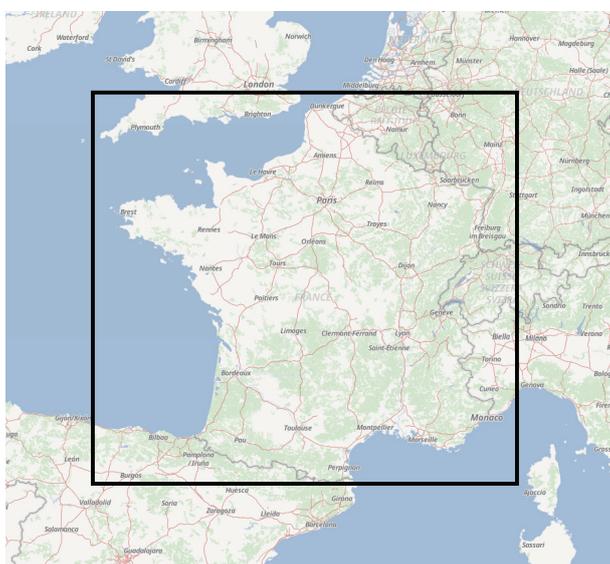


FIGURE 4.7 – Zone de couverture de la projection EPSG :27572

due à l'utilisation de coordonnées en mètres n'est plus négligeable (plus d'un mètre de décalage entre la projection GPS et la Lambert zone II).

Cette projection est donc particulièrement adaptée pour des personnes vivant et se déplaçant en France. Si l'on souhaite adapter ce système à des personnes vivant dans un autre pays, il suffit de choisir un autre repère local intégrant la zone de vie des personnes en question. Notre living lab étant localisé à Lyon, nous baserons notre système sur la projection EPSG :27572.

La projection nationale choisie est définie par un repère dont l'origine est localisée au centre de la zone de couverture, non loin de la ville de Châteauroux. Pour passer du repère de l'appartement au repère national, il nous suffit alors de localiser le repère de l'appartement dans le repère national. Pour cela, il est possible d'utiliser les informations délivrées par le site epsg.io qui fournit les coordonnées du centre de notre living lab dans le repère choisi (797365 ; 2090044). Cependant, le plus précis est de tracer directement le plan de notre appartement sur une carte de France utilisant la projection. Cette fonctionnalité est par exemple fournie par le logiciel de cartographie QGIS [QGIS, 2015] (Figure 4.8).

L'utilisation de QGIS pour tracer l'appartement dans le repère national devient encore plus pertinente lorsqu'on couple le logiciel à une base de données géographiques comme PostGIS. Ce logiciel permet de stocker des positions tracées sur une carte dans PostGIS, en utilisant directement la projection voulue, dans notre cas EPSG :27572. Non seulement, cela nous permet de



FIGURE 4.8 – Captures d’écran du logiciel de cartographie QGIS avec le plan du living lab depuis différents niveaux de zoom (National en haut à gauche, régional en haut à droite, local en bas à droite, intérieur en bas à gauche)

connaître précisément la position du repère de l’appartement dans le repère national, mais cela offre également de nombreuses fonctionnalités de traitement de données géographiques. Il est ainsi possible de créer des zones dans l’appartement, d’effectuer des recoupements entre des ensembles de points, de segments, et d’aires, parmi d’autres possibilités. Ces fonctions seront détaillées lors de leur utilisation dans la suite de ce document.

Une fois les deux repères positionnés l’un par rapport à l’autre, il serait optimal de pouvoir disposer directement des coordonnées des personnes dans le repère national sans passer par le repère de l’appartement utilisé jusqu’alors. Pour cela, une fois de plus, l’outil *tf* de ROS s’avère extrêmement précieux. En effet, en déclarant dans *tf*, la relation entre les deux repères sus-cités, l’outil est capable de passer directement de la position d’une personne dans le repère d’une caméra aux coordonnées dans le repère national. Pour cela, *tf* utilise un arbre de repères (Figure 4.9).

Dans cet arbre, on associe un repère à l’appartement, aux caméras, et même aux personnes détectées. De cette manière, connaître la position d’une personne dans le référentiel d’une caméra permet de déclarer la position du repère associé à cette personne par rapport au repère de la Kinect. C’est le cas pour la personne A de la figure 4.9, sa position est déclarée par rapport à la Kinect 1 (*tf3*) et mise à jour dès qu’une nouvelle position est envoyée par le logiciel qui extrait les coordonnées des images de profondeur. Les transformées *tf1* et *tf2* sont, quand à elles, fixes et déclarées une seule fois. En composant les trois transformées (*tf1*, *tf2* et *tf3*), l’outil *tf* est ainsi capable de donner la position de la personne A dans le repère national (EPSG :27572). Comme nous l’avons évoqué dans la section 3.7, *tf* conserve un historique d’une dizaine de secondes des transformées déclarées, ce qui lui permet d’interpoler les positions, y compris lorsqu’on lui demande des coordonnées dans le repère national. Le travail dans des repères variés est ainsi extrêmement simple et performant, ce qui conforte encore notre choix de baser le système d’information du living lab sur ROS.

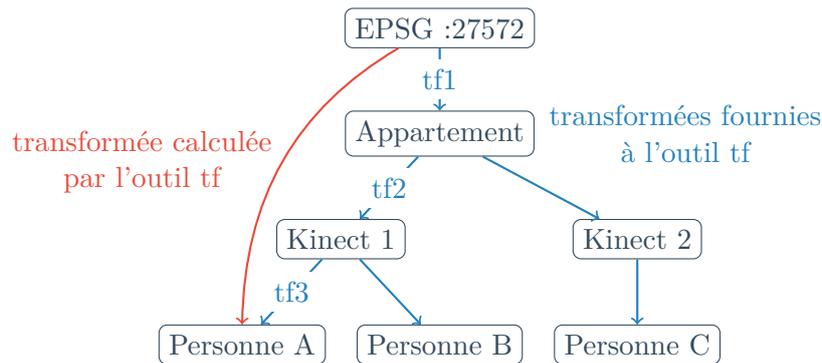


FIGURE 4.9 – L'arbre tf des repères

4.4.3 Le smartphone, un GPS dans toutes les poches

Au final, l'utilisation d'un côté d'outils géographiques (base de données PostGIS et logiciel de cartographie QGIS) et de l'autre côté, des outils de ROS (*tf*, protocole de communication), a permis d'étendre largement les possibilités de notre système de localisation en le rendant interopérable avec tout autre système de localisation utilisant une projection géographique standard. Si l'on dispose d'un GPS embarqué sur une personne par exemple, il est maintenant possible de coupler les données de localisation indoor fournies par les Kinect, avec les données de localisation outdoor fournies par le GPS. Or, les smartphones intègrent tous une puce GPS et une majorité des français, ainsi que de plus en plus de seniors en sont équipés. Pour peu que la personne emporte son smartphone avec elle lors de ses déplacements hors du domicile, il est alors possible d'insérer directement les données de localisation de son GPS dans notre base de données, en utilisant notre système de localisation dans un repère national.

Remarquons ici que séparément, les outils utilisés n'ont rien d'original. Cependant, c'est leur utilisation conjointe, dans le cadre d'un living lab qui apporte une réelle innovation C'était déjà l'approche proposée par l'utilisation de la Kinect à des fins de localisation : être disruptif en détournant un outil de son usage initial. Le but est d'avoir une approche transversale, en faisant se croiser des domaines et des spécialités qui se considèrent historiquement disjointes, comme la cartographie et la santé à domicile.

4.5 Intégration de capteurs physiologiques

Les scénarios d'activité présentés dans la section 4.3 incluent une part qui se déroule hors du domicile, pour une promenade par exemple. Ils ont mis en évidence le besoin d'un continuum indoor-outdoor, mais aussi la nécessité de l'ajout de capteurs supplémentaires permettant d'affiner notre analyse d'activité. En particulier, l'analyse de l'activité cardiaque d'une personne permet d'identifier plusieurs éléments pertinents.

Le premier paramètre physiologique que nous analyserons est la fréquence cardiaque. En effet, chez la plupart des individus celle-ci augmente avec l'effort physique, ce qui permet d'accéder à l'intensité d'un effort, et surtout à son évolution au cours du temps. Le second paramètre que nous chercherons à analyser est la variabilité cardiaque qui reflète la fluctuation temporelle de l'intervalle entre deux contractions du cœur. Ce paramètre est moins usité car il demande une mesure précise de la durée entre deux battements et ne peut se contenter de l'estimation approximative de fréquence cardiaque proposée par des montres connectées comme le Fitbit par exemple [Edward and Brett A., 2016]. Cette variabilité augmente avec le relâchement (parasympathique) et diminue avec le stress et l'effort physique (sympathique). Nous pourrions ainsi tenter d'estimer l'impact émotionnel d'une activité collaborative via le suivi de la variabilité cardiaque.

Le projet REC@MED, porté par Bertrand Massot [Massot et al., 2015], consiste en la réalisation d'un ensemble de capteurs embarqués, formant un réseau, aussi appelé Body Sensor Network (BSN). Ce système inclut un capteur d'électrocardiogramme (ECG) composé de trois électrodes

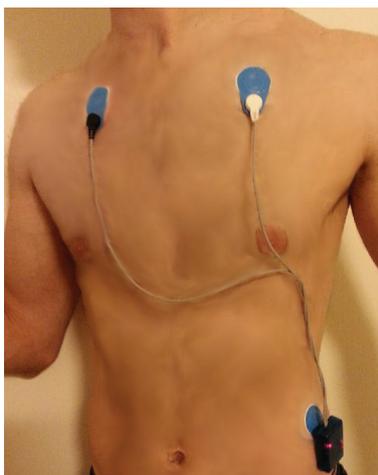


FIGURE 4.10 – Le capteur d’ECG de REC@MED [Massot et al., 2015]

reliées à un module de traitement des signaux (Figure 4.10). À partir de l’ECG mesuré, le capteur calcule de manière autonome la fréquence cardiaque et la variabilité cardiaque. Il communique ces informations en Bluetooth au téléphone du sujet qui centralise les données. Ainsi, la personne conservant son téléphone sur elle, les données de fréquence cardiaque sont enregistrées quelle que soit la localisation du sujet à son domicile ou en dehors. Les données qui sont stockées sur le téléphone doivent ensuite être rapatriées sur le système d’information du living lab basé sur ROS. Deux protocoles ont été envisagés pour effectuer ce transfert.

La première solution était de connecter le téléphone en Wi-Fi au réseau du living lab. ROS étant compatible avec le système d’exploitation Android du téléphone, il est alors possible d’exécuter un nœud ROS sur le téléphone. Le nœud ROS en question peut alors lire la base de données du téléphone et la synchroniser avec celle du living lab. Même si cette solution semble optimale car facile à mettre en place et proposant un haut débit de transfert grâce au Wi-Fi, elle a un inconvénient majeur : les interférences entre Bluetooth et Wi-Fi au sein du téléphone. En effet, ces deux protocoles utilisent des bandes voisines qui se superposent (autour de 2,4 GHz), ce qui permet d’utiliser la même antenne. Les téléphones intègrent ainsi, le plus souvent, une puce compatible Bluetooth et Wi-Fi, ce qui rend très peu fiable l’utilisation des deux protocoles en même temps.

Une seconde solution a donc été mise en place pour pallier ce problème. Étant donné que le téléphone communique déjà en Bluetooth avec le capteur, et que l’utilisation du Wi-Fi est à proscrire pour éviter les interférences, on choisit de faire communiquer le téléphone avec le living lab en Bluetooth. Toutefois, les communications au sein de l’environnement ROS se font sur des réseaux IP, incompatibles avec le Bluetooth. Cependant, développer un nœud ROS pour servir de pont entre ROS et un périphérique Bluetooth tel que le téléphone permet de pallier le problème. Cette brique logicielle que nous avons développée est basée sur la bibliothèque logicielle fournie par BlueGiga, que ROS permet d’utiliser sans contrainte. C’est donc avec un développement réduit que nous avons étendu ROS aux périphériques Bluetooth, ce qui montre à nouveau sa grande flexibilité.

Cette seconde solution ajoute cependant une contrainte de débit liée à l’utilisation du Bluetooth Low Energy. En effet, selon la norme, il est limité à 0,27 Mbit/s en théorie dans sa version 4.0, et encore moins en situation réelle. À titre de comparaison, le Wi-Fi (dans sa norme IEEE 802.11ac sortie en 2014) permet d’atteindre des débits jusqu’à 1 GBit/s. Or, les données de fréquence cardiaque seules génèrent, en comptant l’horodatage et les identifiants standards Bluetooth, environ 350 Bit/s (pour 40 octets par échantillon à une fréquence cardiaque de 66 bpm). Ceci implique qu’une journée de données de fréquence cardiaque représente 29 Mbit. Ainsi, à 0,27 MBit/s, il faut près de 2 minutes pour transférer 24 heures de données cardiaques au living lab. Si l’on ajoute à cela les données de position GPS et que l’on considère un débit plus réaliste, un quart d’heure peut être nécessaire pour décharger les données. C’est totalement réalisable, la



FIGURE 4.11 – Capteur de température Everspring (gauche) et multi-capteur Aeotec MultiSensor 6 (droite)

nuit par exemple, mais cela pourrait surprendre des utilisateurs de plus en plus habitués à des échanges instantanés.

En plus de la possibilité de télécharger les données du téléphone vers la base de données du living lab au bout de plusieurs heures de mesure, un mode temps réel a été développé conjointement par Bertrand Massot côté plateforme REC@MED et moi-même, côté plateforme ROS. Ce mode permet, lorsqu'une donnée d'un capteur est reçue par le téléphone, de l'envoyer immédiatement vers la base de données du living lab. Ainsi, il est possible de disposer en temps réel (avec une latence de l'ordre d'une seconde) des données de fréquence cardiaque des personnes portant le capteur quand ils sont dans l'appartement. Ces données peuvent ainsi être affichées dans le living lab via des tablettes ou une télévision comme nous le verrons par la suite.

L'application Android développée pour REC@MED est également capable de récupérer la position GPS du téléphone. C'est donc elle qui enregistre la trajectoire des personnes disposant de l'application lorsqu'ils quittent le domicile. L'application transmet ensuite ces données au système d'information du living lab, en considérant le GPS comme un capteur supplémentaire du système REC@MED, même s'il ne communique pas en Bluetooth. Grâce à l'intégration des capteurs du projet REC@MED, le living lab dispose désormais d'un système de localisation indoor et outdoor, ainsi que de mesures relatives à l'activité cardiaque de ses occupants. Le projet REC@MED intégrera bientôt également des capteurs d'activité électrodermale et d'actimétrie qui seront ainsi directement utilisables par le living lab.

4.6 Contextualisation par des capteurs d'environnement

Afin de permettre une contextualisation des données mesurées par les différents capteurs du living lab, des capteurs environnementaux ont été ajoutés. Ce sont des capteurs de température, de luminosité, de mouvement et d'hygrométrie (Figure 4.11) qui ont été placés dans les différentes pièces du living lab.

Ces capteurs utilisent le protocole de communication Z-Wave conçu pour les applications de domotique, et permettant d'atteindre une très basse consommation énergétique. Un réseau Z-Wave est composé d'un ensemble de modules (aussi appelé nœuds). Ces nœuds incluent :

- Au moins un contrôleur qui cartographie le réseau et gère le routage des paquets (les chemins que prendront les messages échangés),
- Des esclaves qui ne connaissent que leurs voisins immédiats

Le réseau formé est de type mesh, c'est-à-dire que les nœuds peuvent servir de relais pour transmettre un message à son destinataire (sauf s'ils sont alimentés par une batterie), ce qui permet d'étendre largement la portée du réseau (Figure 4.12).

Pour atteindre une autonomie bien supérieure à celles proposées par le Bluetooth ou le ZigBee par exemple, le Z-Wave est basé sur une approche originale : l'esclave décide quand communiquer avec le réseau, il est impossible de le réveiller depuis un autre nœud du réseau. De cette manière,

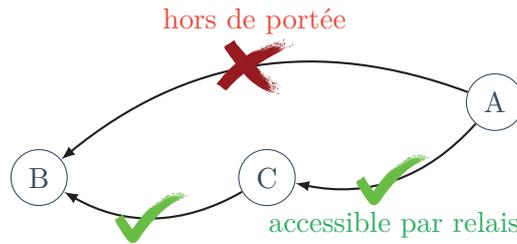


FIGURE 4.12 – Dans un réseau mesh, les nœuds servent de relais pour étendre le réseau



FIGURE 4.13 – Dongle Z-Wave UZB par Sigma Design

la plupart du temps, la puce de communication des capteurs ne consomme même pas pour savoir si l'on tente de la joindre ou pas. Dans le cas d'un capteur de température, on définit une période T_1 entre deux réveils (une demi-heure par exemple). Tous les T_1 , le capteur se réveille, mesure la température, la transmet, puis écoute pendant cinq secondes. C'est sur les quelques secondes suivant l'émission d'un message par le capteur qu'il est possible de communiquer avec lui, par exemple pour lui spécifier un changement de période entre deux réveils. Dans ce cas évoqué, le capteur est réveillé pendant moins de trois millièmes du temps. L'autonomie peut ainsi être très importante, deux ans selon Aeotec pour le MultiSensor 6, même si cette autonomie se mesure plutôt en nombre de cycles d'éveil qu'en temps. La conséquence de l'utilisation d'un tel protocole est le très faible débit de données, typiquement de quelques octets par heure.

On voit ici que des types de données différents (vidéo, fréquence cardiaque, température d'une pièce) sont échangés par des protocoles différents, adaptés en terme de débit, de portée, d'autonomie, etc. Il n'y a pas de protocole universel performant partout. Les ponts entre ces protocoles, proposés par ROS, permettent ainsi une architecture flexible pour des réseaux hétérogènes nécessaires à la variété des fonctions que peut et pourra offrir le LivINLab.

Dans le cas du Z-Wave, le pont avec ROS est extrêmement simple à mettre en place puisqu'il ne nécessite aucun développement. En effet, OpenHAB, un logiciel open source de gestion de périphériques de domotique, permet de communiquer avec des modules communiquant en Z-Wave via un dongle compatible (Figure 4.13) [OpenHAB, 2016]. Un nœud ROS fourni par la communauté de développeurs, librement utilisable, permet de publier automatiquement les données captées par OpenHAB dans le réseau ROS. Les données issues des capteurs d'environnement sont ainsi directement accessibles depuis l'ensemble des nœuds du réseau ROS.

Nous venons au passage, de démontrer la capacité du living lab, basé sur ROS, à intégrer des périphériques hétérogènes, utilisant des protocoles hétérogènes. Les données sont toutes remontées à un haut niveau d'abstraction : les topics de ROS, où elles sont librement accessibles à l'ensemble du réseau ROS pour être stockées ou traitées. À propos de stockage, nous allons maintenant voir comment sont organisées les données dans la base de données.

4.7 Identifier les personnes détectées

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, si la technique de localisation des personnes a été validée, il est nécessaire de pouvoir identifier ces personnes lorsque plusieurs sont présentes dans l'appartement. Dans ce but, Jean-Baptiste Versini, que j'ai encadré durant une partie de

sujet	images capturées	personne détectée	identification correcte
1	148	126	61 (48%)
2	147	51	49 (96%)
3	204	30	23 (76%)
4	213	28	25 (89%)

TABLE 4.1 – Résultats des tests d’identification à partir des images couleur et de profondeur de la Kinect

son stage de fin d’étude d’ingénieur, a mis en place un outil de reconnaissance faciale utilisant les images couleur et de profondeur d’une caméra Kinect. Cet outil a été développé par le Fraunhofer Institute et est directement intégré à ROS [Bormann, 2016].

L’identification fonctionne via une phase d’apprentissage. Chaque personne susceptible d’être identifiée doit se placer devant une Kinect pendant 30 secondes en orientant la tête dans différents directions afin que l’outil découvre les différents points du vue du visage. Une fois cette opération faite, l’algorithme est capable d’identifier les personnes en temps réel, sous réserve que celles-ci passent suffisamment de temps devant la caméra. C’est justement ce point qui a posé problème puisque les personnes ne cherchant pas à interagir avec la caméra, elles passent généralement rapidement devant l’objectif, ce qui limite l’analyse sur plusieurs image. Pour pallier ce problème, nous avons capturé une image statique au moment où une personne passe devant la caméra, et l’avons envoyé au logiciel comme s’il s’agissait d’une vidéo. L’algorithme est alors capable de reconnaître la personne, même si celle-ci est passée rapidement. La détection du moment à choisir pour prendre la photo de la personne passant devant la caméra est basé sur les positions extraites par OpenNI à partir des images de profondeur.

Afin de valider l’utilisation de cet outil, les visages de quatre sujets ont été enregistrés dans la base de données. Par la suite, d’autres images instantanées des mêmes sujets ont été fournies à l’algorithme de reconnaissance. Cet algorithme commence par détecter les visages sur l’image puis, s’il en détecte, il tente de les reconnaître. Les résultats sont donnés dans la table 4.1. On y différencie le nombre d’images contenant le visage du sujet qui ont été analysées, le nombre de cas où une personne est détectée, et le nombre de cas où la personne identifiée est la bonne.

Remarquons que lors de ces tests, les sujets ont été contraints à des angles maximum de rotation de la tête d’environ 30°en latéral et 20°en vertical (par rapport à la position visage face à la caméra). Par ailleurs, les sujets étaient placés entre 0,5 m et 1,5 m de la caméra. En effet, sans respecter ces contraintes, presque plus aucune détection n’est réalisée. Malgré ces limitations, les résultats sont encourageants puisque nous dépassons largement les 50% de bonnes détections pour trois sujets sur quatre. Cet outil pourrait donc être utilisé pour labelliser certaines trajectoires par le sujet identifié, d’autant plus que cela ne nécessite pas de matériel supplémentaire. Cependant, les contraintes sur la position et l’orientation des personnes pour qu’elles soient correctement identifiées indiquent qu’il serait préférable de coupler cette méthode avec d’autres complémentaires comme la reconnaissance des couleurs des vêtements ou de la proximité entre un téléphone et une balise Bluetooth de l’appartement.

4.8 Organisation des données stockées dans la base de données

La base de données utilisée par le living lab s’appuie sur le logiciel PostgreSQL, un système de gestion de base de données relationnelle et objet auquel a été ajoutée la capacité de gérer des informations géographiques sous forme de géométries (points, lignes, polygones), conformément aux standards établis par l’Open Geospatial Consortium [OGC, 2016]. Le résultat de cette extension de PostgreSQL est le logiciel PostGIS que nous avons déjà évoqué [PostGIS, 2015]. L’intérêt de l’utilisation de cet outil est de pouvoir gérer des données géographiques comme des positions dans une projection standard (EPSG :27572 dans notre cas), tout en gardant toutes les fonctionnalités de la base de données relationnelle PostgreSQL.

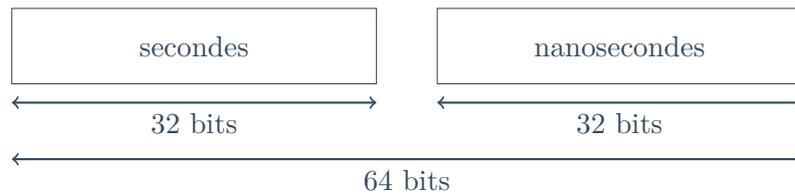


FIGURE 4.14 – Format de stockage des dates

Le stockage des instants d'échantillonnage des données a une grande importance, puisqu'il permet de synchroniser les données venant des caméras, du GPS, du capteur d'ECG, ou encore des capteurs d'environnement. Il était donc nécessaire d'avoir une manière de stocker les dates qui soit à la fois assez précise, triable rapidement, et facilement interopérable avec ROS.

ROS dispose d'un format pour stocker les données temporelles. Les dates sont enregistrées sous la forme du nombre de secondes écoulées depuis le premier janvier 1970 en temps universel coordonné (UTC). C'est le même format de temps qui est utilisé sur les systèmes UNIX. Il est ensuite possible grâce à différentes fonctions standard de retrouver l'heure à laquelle correspond ce temps, y compris en heure locale. À cette date en secondes s'ajoute un temps en nanosecondes qui permet d'atteindre une précision qui va au-delà de celle nécessaire pour mesurer l'activité humaine que nous pourrions faire dans un appartement. Ces deux nombres sont stockés sur des entiers signés de 32 bits. Pour les stocker en une seule valeur, nous avons choisi de concaténer ces deux entiers en un seul de 64 bits, ce qui est permis par notre système d'exploitation et par PostGIS (Figure 4.14). En considérant des valeurs positives, et avec les bits de poids fort en premier (MSB first), on observe que

- le stockage est fait sur un simple entier 64 bits,
- la résolution d'une nanoseconde est conservée,
- l'ordonnancement des dates est conservé pour le tri,
- le passage depuis et vers le format ROS se fait avec des opérations binaires simples (masque et décalage).

La base de données est organisée en tables qui utilisent ce format pour stocker les instants d'échantillonnage. La table permettant de stocker les positions des personnes détectées comporte les champs suivants :

- `id` : l'identifiant de la position dans la table
- `time64` : l'instant d'échantillonnage au format data défini ci-dessus
- `id_camera` : identifiant de la caméra
- `id_user` : identifiant de la personne, tel que fourni par OpenNI
- `x` : position selon x en mètres dans le repère national
- `y` : position selon y en mètres dans le repère national
- `z` : altitude en mètres par rapport au sol
- `geo` : position en 2D sous forme géométrique (point) dans le repère national

Les champs `x` et `y` sont redondants avec le champ `geo`, mais permettent un traitement plus rapide lorsqu'on souhaite accéder aux coordonnées directement. Les identifiants de caméra et de personne permettent de reconstituer les trajectoires détectées par OpenNI, à partir des images de profondeur des caméras Kinect. Le champ `geo` utilise un format standard, ce qui le rend interopérable avec d'autres logiciels, tels que QGIS ou Geoserver. Ces logiciels permettent par exemple d'obtenir un rendu comme celui présenté en figure 4.15 en les laissant simplement accéder à la colonne `geo` de la base de données.

Cette table des positions contient rapidement des millions de lignes, qui ne peuvent être facilement triées par date. En effet, plusieurs positions peuvent être échantillonnées à la même date qui ne peut donc pas être la clé primaire. Il est alors nécessaire de faciliter la recherche au sein de la table des positions. Deux tables ont été créées à ce propos : `sequences` et `id_date`.

La première table, `sequences`, contient les instants de début et de fin d'une séquence de positions détectées par une caméra de profondeur. Ce sont ces sous-trajectoires qui ont été utilisées pour effectuer la fusion de trajectoires dans la partie 3.7.

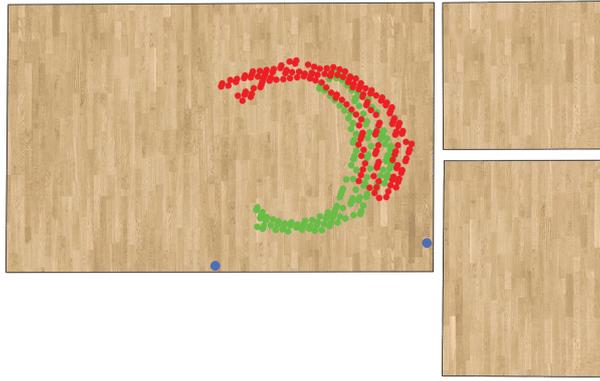


FIGURE 4.15 – Rendu de trajectoires effectué par Geoserver directement à partir des données de la base (sauf fond en imitation parquet)

La seconde table, *id_date*, contient le premier identifiant de la table des positions correspondant à une date, et ceci pour des dates tous les 2000 échantillons, ce qui revient à environ trois minutes lorsqu’une personne seule est détectée. Avec cette table, si l’on souhaite trouver les positions qui correspondent à une période donnée, on cherche d’abord une gamme d’identifiants de position réduite à partir de la table *id_date*, puis on cherche plus précisément, parmi les identifiants de position sélectionnés, dans la table des positions. Cette organisation permet de diviser par un facteur dix le temps de recherche des positions d’une séquence de cinq minutes, pour une table *positions* contenant plus de 20 millions de lignes.

Les autres tables de la base permettent de stocker les positions GPS, les fréquences cardiaques, et les données des capteurs environnementaux. Ces tables sont séparées, mais toutes les données étant placées sur le même axe temporel, elles sont synchronisées pour être analysées conjointement. À ces tables s’ajoutent celles contenant les pièces, les portes, les positions des caméras et des points de calibration qui sont des données géographiques fixes, utilisées pour contextualiser les mesures de position entre autres.

4.9 Retour d’information en temps réel

Le living lab est un lieu de recherche collaborative, de co-création, qui doit faciliter l’innovation de ses acteurs qui le perçoivent comme un exosquelette. Pour cela, il est nécessaire que les utilisateurs du living lab comprennent de quoi l’appartement est capable et ce qu’il fait en la présence de visiteurs, le plus possible en temps réel. Remarquons que la notion de temps réel annoncée ici n’est pas exacte puisque le temps de transmission des données n’est pas garanti par le système. Cependant, l’expérience montrant que le temps d’affichage des données étant inférieur à la seconde en général, nous nous permettrons donc cet abus de langage.

Pour faciliter l’affordance du living lab, nous avons ainsi mis en place un système de retour d’information en temps réel qui permet de visualiser les captations faites par le living lab et ce qu’il peut en tirer. Ce système s’appuie sur des écrans disposés dans l’appartement, à raison d’une télévision, de deux tablettes, et potentiellement bien plus. En effet, l’interface proposée s’appuie sur les technologies du web (langages HTML, CSS et JS). Le rendu qui sera affiché sur la télévision via un navigateur web (Mozilla Firefox par exemple) peut ainsi être affiché sur n’importe quel téléphone ou tablette, quel que soit le système d’exploitation de l’équipement.

Tout d’abord, cette interface graphique permet de visualiser l’appartement en 3D, avec les positions en temps réel des personnes détectées, ainsi que leurs dernières trajectoires (Figure 4.16). Ce rendu 3D est effectué à l’aide de Rviz, un outil de représentation 3D intégré à ROS. Cet outil est capable de prendre en compte les transformations tf que nous avons utilisées dans la section 4.4 pour effectuer des changements de repère et localiser les personnes dans une projection nationale. Les positions des personnes, (boules bleues) sont automatiquement mises à jour par Rviz en fonction des tf. La complémentarité des multiples outils de ROS facilite ainsi le développement.

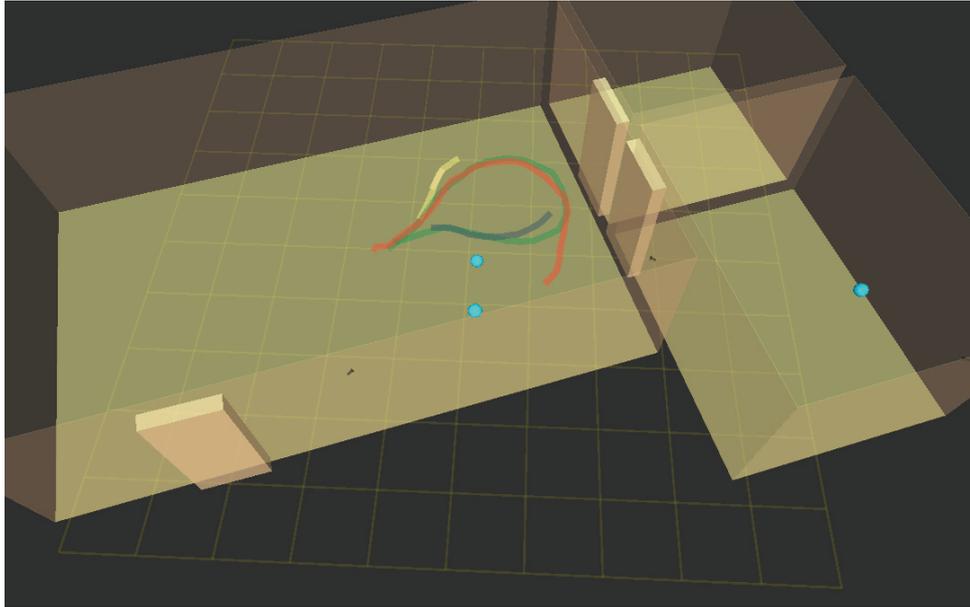


FIGURE 4.16 – Représentation de l’appartement en 3D avec les positions en temps réel (boules bleues) et les trajectoires (courbes de plusieurs couleurs) en utilisant le logiciel Rviz de ROS



FIGURE 4.17 – Vidéo de trois caméras avec les positions des personnes en surimpression (rond blanc)

Les murs et portes sont des pavés droits générés à partir de leurs positions enregistrées dans la base de données via QGIS (Section 4.4).

Ensuite, il est possible d’afficher les vidéos couleur ou de profondeur des caméras (Figure 4.17). Sur ces vidéos, on peut voir en surimpression les positions des personnes (ronds blancs). Ceci permet aux personnes présentes dans le living lab de comprendre que le système est capable de suivre les occupants de l’appartement via les caméras. De plus, lorsqu’on affiche ces vidéos et que l’on masque physiquement la caméra couleur d’une Kinect, on observe que le suivi de trajectoire fonctionne toujours (les points localisant les personnes sur l’image continuent de les suivre). Ceci permet de prouver que la caméra couleur n’est pas utilisée pour le suivi de trajectoire et qu’il est donc possible de s’en passer si l’on s’en tient à cette application. Cela peut rassurer les utilisateurs du living lab quant au respect de leur vie privée.

Notons au passage que l’utilisation d’une interface web impose des contraintes pour la diffusion de vidéos. En effet, si le standard HTML5 permet d’intégrer très facilement un flux vidéo à une page web, une latence de quelques secondes est introduite par le navigateur [Daoust et al., 2010]. Cette latence ne pose pas de problème dans la plupart des cas, y compris lors d’une retransmission sportive en direct, tant que l’on n’assiste pas en parallèle à la scène filmée. Sauf que si une vidéo de l’appartement est diffusée aux personnes se trouvant dans l’appartement, une latence de quelques secondes serait considérée comme énorme et ne relèverait plus du temps réel. Pour pallier ce problème, les vidéos ont été remplacées par des images actualisées deux fois par seconde. Ainsi, l’image perd légèrement en fluidité, mais sans que cela n’empêche de bien

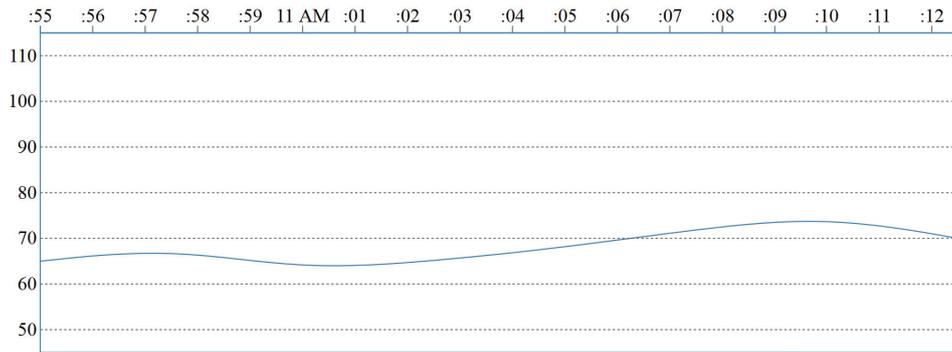


FIGURE 4.18 – Visualisation de la variation de la fréquence cardiaque d’une personne en battements par minute

comprendre ce que fait le système de suivi de trajectoire, et la latence entre ce qui se passe dans l’appartement et son apparition à l’écran passe sous la seconde pour retrouver une impression de temps réel. Il serait possible d’obtenir une véritable vidéo fluide avec une faible latence en utilisant un nouveau standard du web : WebRTC [Patil and Buchade, 2014]. Ce dernier est conçu pour la visioconférence, donc avec une faible latence, mais n’a pas encore été intégré à ROS. Pour éviter de devoir développer nous-même l’intégration de WebRTC à ROS, nous avons donc préféré utiliser des images régulièrement mises à jour et qui suffisent à nos besoins, comme précisé ci-dessus.

Enfin, les données de fréquence cardiaque peuvent être affichées sous la forme de tracés temporels (Figure 4.18) qui évoluent dynamiquement au cours du temps. La fréquence cardiaque d’une personne est particulièrement intéressante lorsqu’elle est affichée à l’écran, puisqu’elle permet un bio-feedback. Les personnes visualisent l’influence de leur respiration et de leur niveau d’excitation sur leur rythme cardiaque, en tentant de se calmer, ou de faire un effort physique.

Nous voyons ainsi que le living lab permet non seulement de suivre les trajectoires des personnes dans l’appartement grâce au système mis en place au chapitre précédent, mais qu’il va bien au-delà. Ce système bio-inspiré est capable d’agréger les informations provenant d’un ensemble de capteurs hétérogènes communiquant via des protocoles hétérogènes. Ces capteurs permettent d’étendre le suivi d’activité à des scénarios collaboratifs plus complexes, pouvant comprendre des périodes hors du logement. Les capteurs et les actionneurs mis en place ne sont qu’une première étape. Les évolutions techniques et fonctionnelles du living lab dépendront des idées qui émergeront des utilisateurs. On pourrait par exemple envisager l’ajout de modules de robotique de service pour assister les personnes au quotidien ou être moteur d’interactions. Le living lab démontre ici sa grande capacité à servir ses habitants par des approches innovantes, y compris pouvant venir de ses utilisateurs dans le cadre d’ateliers multi-disciplinaires propices à la créativité. Dans cet objectif, le retour d’information en temps réel proposé sur différents écrans permet aux utilisateurs de mieux appréhender le système et d’imaginer les divers services qu’il pourrait délivrer. Ces informations variées sont exploitées dans le chapitre suivant, via le traitement de données captées lors de l’exécution de scénarios dans et hors du living lab.

5

Expérimentations

5.1 Introduction

Le living lab présenté dans le chapitre précédent permet de par sa conception même, d'agréger des informations variées, ainsi que de les présenter en temps réel sur des écrans. De nombreux capteurs, actionneurs et fonctionnalités seront ajoutées par la suite pour répondre aux besoins des utilisateurs de cet environnement intelligent. Cependant, les capteurs en place permettent déjà d'effectuer un suivi d'activité à domicile et dans la cité par des mesures de position indoor et outdoor, d'activité cardiaque et de conditions environnementales (température, luminosité, humidité). Dans ce chapitre, ces capteurs sont utilisés pour suivre l'activité de plusieurs personnes au travers de la réalisation de scénarios incluant des parties collaboratives dans le cadre d'activités au domicile et à l'extérieur.

5.2 Une première approche de détection d'activités collaboratives à domicile : l'unité spatio-temporelle

Comme nous l'avons explicité dans le chapitre 1, notre living lab est orienté vers le suivi de la santé via l'analyse de l'activité, et plus spécifiquement des activités sociales que l'on pourrait également qualifier de collaboratives. Pour cela, rappelons que les pièces d'un logement sont chacune associées à un ensemble d'activités. Ainsi, nous dormons dans la chambre, nous lavons dans la salle de bains et dînons dans la salle à manger. Or une activité collaborative est l'exécution simultanée d'une tâche similaire par plusieurs personnes, ces personnes se trouvant donc généralement dans la même pièce, comme autour d'une table pour un repas. Au contraire, lors d'une activité solitaire, une personne se trouvera plutôt seule dans la pièce associée à l'activité (Figure 5.1). Ainsi, la détection de la présence simultanée de plusieurs personnes dans une pièce donne une première approche de la détection de la collaboration entre des individus. Ces travaux ont fait l'objet d'une communication, acceptée à l'oral lors de la conférence internationale IEEE EMBC 2016 [Sevrin et al., 2016].

Ici, les pièces sont définies par les fonctions qui leurs sont associées et non pas par les murs qui les délimitent qui pourraient mener à des approximations assez grossières. Par exemple, dans le cas de notre appartement de test, la pièce principale contient à la fois l'entrée, le salon, la salle à manger et la cuisine. De ce fait, nombre d'activités différentes et indépendantes peuvent être effectuées dans cette pièce au sens des murs. Nous avons donc délimité, au sein de notre living lab, différentes zones (Figure 5.2) correspondant à

- la cuisine,



FIGURE 5.1 – Une activité sociale comme un repas implique des positions proches, contrairement à une activité solitaire

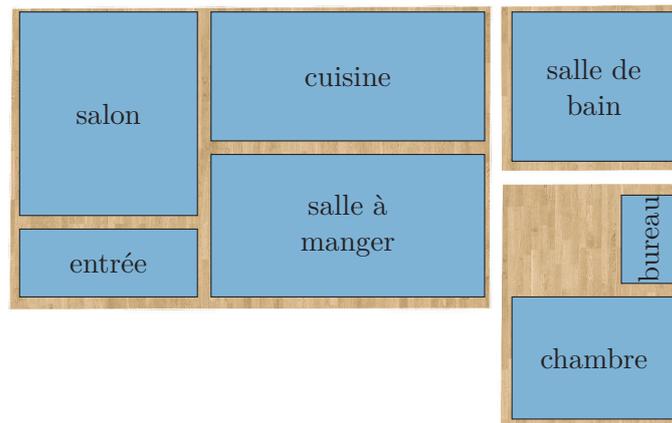


FIGURE 5.2 – Carte des zones de l'appartement

- la salle à manger,
- le salon,
- l'entrée,
- la salle de bains,
- la chambre,
- le bureau.

Pour détecter les positions dans l'appartement, le système de localisation indoor basé sur des caméras de profondeur Kinect est utilisé. Ces caméras sont positionnées et orientées tel que décrit sur la figure 5.3. On y voit que certaines zones de l'appartement ne sont pas couvertes. À savoir la salle de bains, le salon et l'entrée. Une couverture plus complète de l'appartement serait souhaitable mais n'a pu être mise en place dans le cadre de cette thèse. Des aménagements sont envisagés pour les expériences futures.

Pour valider notre système de suivi d'activité collaboratives, un scénario d'une journée complète (24 heures) a été conçu et joué à trois reprises en 24 minutes. Un scénario ainsi compressé (60 fois plus rapide que la réalité), permet de mettre en évidence plusieurs transitions entre différentes activités dans un temps relativement court. La répétabilité d'un scénario aussi complet, d'origine très long, est ainsi améliorée, ce qui est particulièrement pertinent pour l'analyse préliminaire des performances de notre système. Le scénario démarre à 01 :00 afin d'être dans une phase statique puisque la personne seule habitant l'appartement est en plein sommeil. Le descriptif complet des actions est présenté dans la table 5.1.

Lorsque le scénario est joué, les positions des personnes présentes dans les champs de vision des caméras sont enregistrées dans la base de données dans le repère national utilisé pour toutes les données géographiques de la base de données (Lambert zone II). Par ailleurs, les pièces de l'appartement définies précédemment sont également enregistrées dans la base de données géographique via une interface graphique (QGIS) facilitant le travail. La base de données permet d'effectuer des

Heure	Action/Activité	Localisation
1 :00	Le sujet dort	Chambre
2 :00	Le sujet se réveille pour aller aux toilettes	Salle de bain
2 :15	Le sujet boit un verre d'eau	Cuisine
2 :45	Le sujet retourne se coucher	Chambre
7 :00	Le sujet se réveille et se lève.	Chambre
7 :05	Toilettes	Salle de bain
7 :20	Pesée	Salle de bain
7 :45	Préparation du petit déjeuner	Cuisine
8 :00	Petit déjeuner dans la cuisine	Cuisine
8 :30	Salle de bain	Salle de bain
9 :00	Il va faire les courses	Sortir de l'appartement
10 :30	Retour dans l'appartement	Entrer dans l'appartement
10 :35	Le sujet range	Cuisine
11 :00	Lecture sur le canapé	Salon (Canapé)
11 :30	Préparation du repas	Cuisine
12 :15	Repas	Cuisine
12 :45	Vaisselle/nettoyage	Cuisine
12 :50	Toilettes	Salle de bain
13 :00	Informations à la télé	Salon (Canapé)
14 :00	Sieste	Chambre
14 :30	Sortir de l'appartement (sport)	Sortir de l'appartement
16 :30	Retour à l'appartement	Entrer dans l'appartement
16 :35	Le sujet mange dans la cuisine	Cuisine
16 :45	Le sujet prend une douche	Salle de bain
17 :10	Préparer un café	Cuisine
17 :20	Un invité frappe à la porte. Le sujet vient ouvrir	Entrée
17 :30	Les deux personnes discutent	Salon
18 :30	Toilettes (invité)	Salon(sujet)/Toilettes(invité)
19 :00	L'invité quitte l'appartement	Entrée
19 :05	Toilettes	Salle de bain
19 :10	Le sujet fait la cuisine	Cuisine
19 :40	Le sujet mange à table	Cuisine
20 :00	Télévision	Salon (Canapé)
20 :40	Vaisselle	Cuisine
21 :00	Le sujet se met à son bureau	Chambre
21 :30	Le sujet se prépare pour la nuit	Salle de bain
21 :45	Le sujet se prépare un thé	Cuisine
22 :00	Lecture dans le lit	Chambre
22 :50	Prise de la tension	Chambre
23 :00	Le sujet se couche	Chambre

TABLE 5.1 – Scénario d'une journée de 24 heures jouée en 24 minutes incluant un visiteur dans l'après-midi

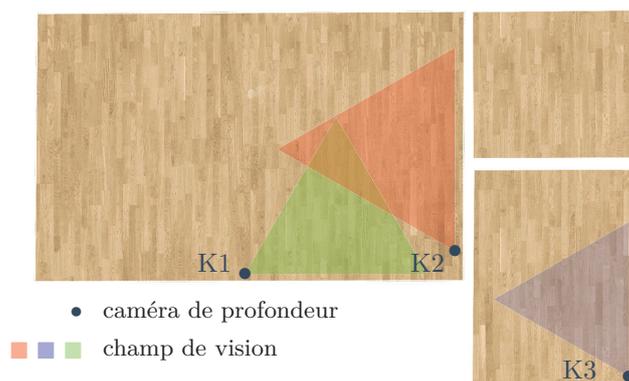


FIGURE 5.3 – Carte des positions et orientations des caméras de profondeur

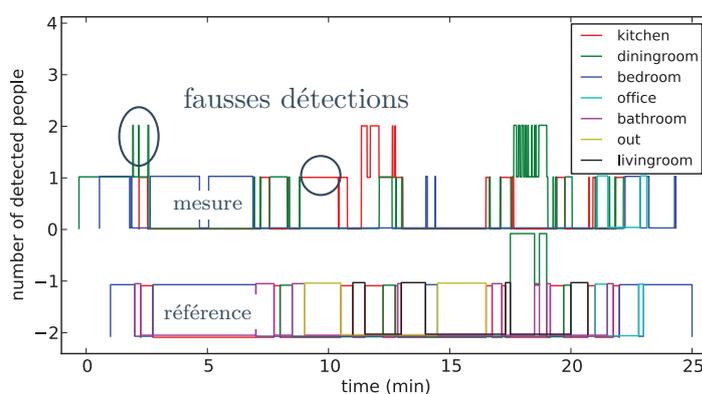


FIGURE 5.4 – L'ambulatoigramme brut (haut) et la référence (bas)

traitements directement sur ces données de zones et de positions afin de les recouper.

Il est ainsi possible de faire une requête à la base de données afin d'obtenir l'ensemble des positions à l'intérieur d'une des zones définies, durant la durée de l'expérience. Si l'on demande les séquences temporelles correspondant à ces positions, on obtient l'ambulatoigramme présenté en figure 5.4. Ce type de diagramme a été proposé en 2011 par LeBellego et al. dans le cadre de l'analyse de l'activité au domicile d'une personne suivie par de simples détecteurs infrarouges de présence [LeBellego et al., 2006]. Ces diagrammes ne représentant l'activité que d'une personne seule, il suffisait alors de représenter le temps en abscisse et les pièces occupées en ordonnée. Ici, nous pouvons suivre plusieurs personnes simultanément, ce qui nous amène à remplacer les pièces de l'axe des ordonnées par le nombre de personnes détectées. Les différentes pièces étant alors représentées chacune par une couleur (Figure 5.4).

La corrélation entre les données mesurées et la référence est visible. Il est à noter que puisque les caméras ne couvrent qu'une partie de l'appartement, lorsque la ou les personnes présentes se trouvent dans des zones non couvertes, il est normal qu'aucune détection n'apparaisse sur la mesure. Ainsi, à 15 minutes sur la figure, la personne est sortie de l'appartement. Sur le diagramme de référence, c'est la zone "out" qui est active, alors que cette position hors du logement n'est logiquement pas détectée par le système, nous ne considérerons donc pas cette situation comme un faux négatif.

Au contraire, on relève plusieurs faux négatifs lorsque les logiciels traitant les images de profondeur des caméras (OpenNI et NITE [Structure.io, 2015]) considèrent une chaise, une porte, le réfrigérateur, etc. comme une personne. C'est le cas aux minutes 2 et 10, sur les parties entourées en noir sur la figure 5.4. Ces erreurs peuvent paraître grossières, pourtant le traitement efficace de données de profondeur est loin d'être évident. Ainsi, une tentative d'amélioration a été développée en 2015 par Cormier dans le cadre de sa thèse, pour un résultat final comparable [Cormier et al.,

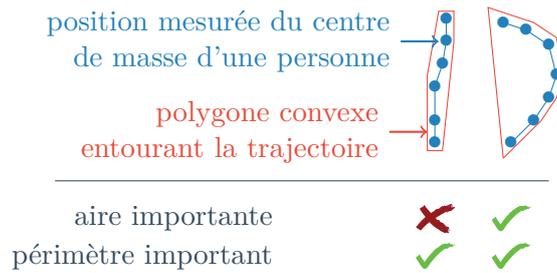


FIGURE 5.5 – Le périmètre identifie plus sûrement que l’aire les déplacements pour une trajectoire rectiligne

2015]. Le traitement de données de profondeur n’étant pas le cœur de cette thèse, nous nous sommes contentés d’utiliser les outils proposés (OpenNI et NITE) en ajoutant un post-traitement sur les positions reçues.

Ce post-traitement vise à éliminer les fausses détections récurrentes du système. Il se base sur une observation simple : lorsqu’un objet tel qu’un réfrigérateur ou une porte est détecté, il ne se déplace pas (ou peu pour une porte). Ainsi, si un point correspondant, selon le logiciel de détection, à une personne dans le champ de la caméra reste statique sur l’ensemble de la séquence où il est détecté, ce point est probablement une fausse détection.

Il faut donc repérer ces détections statiques à partir de l’ensemble des positions constitutives d’une trajectoire. En considérant le plus petit ensemble convexe contenant ces points, nous avons principalement deux options calculables directement par la base de données : soit se baser sur l’aire de cet ensemble, soit sur son périmètre. Le périmètre apparaît alors comme plus pertinent si l’on considère le cas d’un déplacement en ligne droite d’une véritable personne. En effet, l’aire couverte lors d’un déplacement selon une trajectoire rectiligne peut être très faible, peu différente d’une fausse détection statique. Au contraire, quelle que soit la trajectoire, le périmètre de la zone couverte par la trajectoire d’une véritable personne sera bien plus grand que pour une fausse détection statique (Figure 5.5). Un seuil défini empiriquement à partir de nos données expérimentales permet alors de supprimer ce cas particulier de faux positifs.

Remarquons qu’une personne restant assise ou allongée, pour se reposer par exemple, pourrait être considérée comme une fausse détection. Sauf que sa trajectoire l’amenant jusqu’au lit ou à la chaise devrait montrer que ce n’est pas une fausse détection.

Second élément du post-traitement que nous avons mis en place sur les détections opérées par OpenNI : un filtre sur les accélérations. Les fausses détections des portes et autres équipements de l’appartement devraient normalement être éliminées par le filtre sur le périmètre des trajectoires que nous venons d’évoquer. Sauf que dans certains cas, une telle fausse détection est fusionnée par OpenNI avec une véritable trajectoire d’une personne passant devant l’équipement détecté. Prenons l’exemple d’une personne sortant de la salle de bains et se dirigeant vers l’entrée alors que le réfrigérateur est faussement détecté comme une personne (Figure 5.6). Lors de sa sortie de la salle de bains, la personne passe devant le réfrigérateur et est détectée par OpenNI à partir des images de profondeur de la Kinect. Sauf que OpenNI considère que ce n’est pas une nouvelle personne qui est détectée, mais bien le réfrigérateur qui commence à se déplacer. Ainsi, il va fusionner la fausse trajectoire du réfrigérateur avec la véritable trajectoire de la personne venant de la salle de bains. Dans ce cas, la suppression des trajectoires statiques n’aurait plus d’effet. Cependant, comme représenté sur la figure 5.6, la mauvaise fusion des trajectoires entraîne un “saut” dans la série des positions détectées par OpenNI (en noir sur la figure). Ces deux positions plus éloignées et séparées par un laps de temps similaire à celui séparant les positions suivantes créent sur la trajectoire fusionnée une accélération bien supérieure à la moyenne.

Les accélérations calculées sur les points des trajectoires détectées par OpenNI lors des exécutions du scénario sont représentées sur la figure 5.7. Il apparaît alors clairement que certaines accélérations, pouvant dépasser $100 m.s^{-2}$, ne peuvent pas être le fait d’une personne réelle, même si des erreurs de mesures sont possibles. Ces hautes accélérations sont alors identifiées, via un seuil

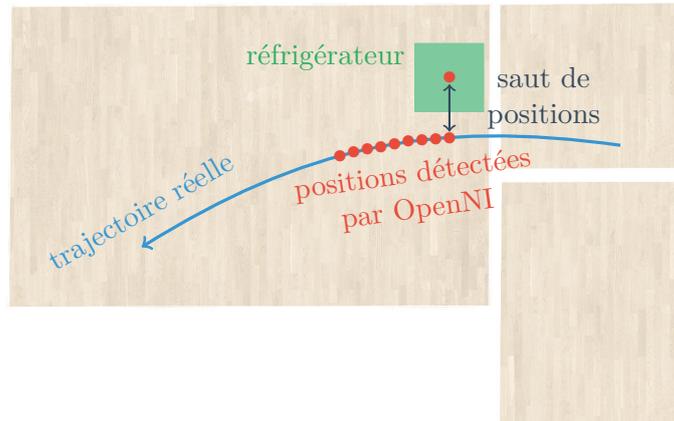


FIGURE 5.6 – Trajectoire d’une personne réelle fusionnée par erreur par OpenNI avec celle du réfrigérateur. Le résultat de la fusion est l’ensemble des positions en rouge.

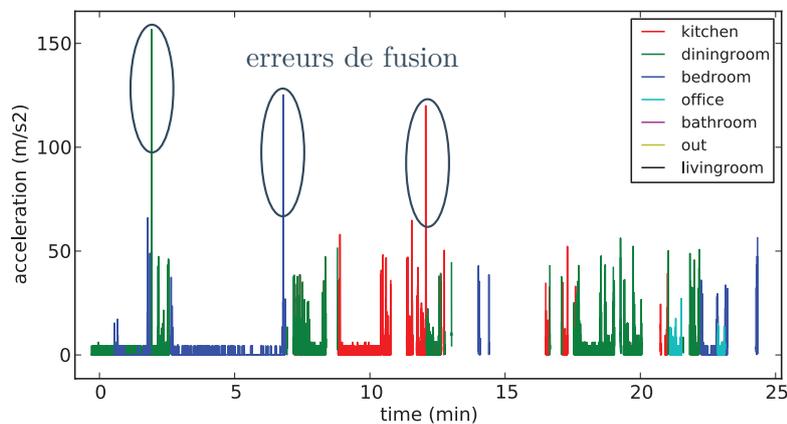


FIGURE 5.7 – Accélération calculée à partir des points de la trajectoire fournie par OpenNI : la fusion par erreur de deux trajectoires crée des accélérations importantes.

défini empiriquement à partir des données expérimentales (d’une quarantaine de mètres par seconde carré). Une trajectoire contenant une accélération trop importante n’est cependant pas supprimée entièrement car elle peut contenir une part valable. Au lieu de cela, elle est découpée en deux parties au niveau de la haute accélération. Dans le cas évoqué sur la figure 5.6, le résultat serait une première trajectoire associée au réfrigérateur et une seconde associée à la personne venant de la salle de bains. Ainsi, la trajectoire associée à la fausse détection (le réfrigérateur) est à nouveau statique et peut être supprimée par l’analyse de périmètre évoquée précédemment, tandis que la trajectoire associée à la personne est isolée et peut être conservée.

Le post-traitement proposé est ainsi composé des deux phases décrites à savoir :

- Séparation des trajectoires en plusieurs sous-parties au niveau des accélérations liées à des fusions erronées effectuées par le logiciel de traitement des images de profondeur,
- Suppression des trajectoires couvrant une faible zone (seuillage basé sur le périmètre).

L’ambulatogramme final est représenté sur la figure 5.8. On voit que les faux positifs ont disparu, ce qui était l’objectif du filtrage mis en place. Cependant, certaines détections de personnes bien réelles ont disparues. C’est par exemple le cas à 18 minutes, au moment où deux personnes se trouvent ensemble dans la salle à manger. La raison de cette suppression est évidente lorsque l’on regarde le périodrogramme brut au même instant. On y voit que l’une des deux personnes est alternativement détectée et perdue de vue plusieurs fois. Cette fiabilité plus faible est liée au fait que les personnes soient assises autour d’une table. Elles sont donc partiellement masquées, ce qui

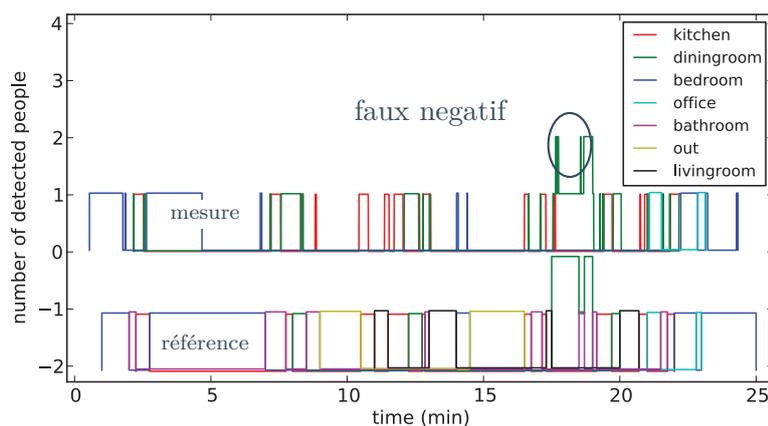


FIGURE 5.8 – L’ambulatogramme filtré (haut) et la référence (bas)

complicque la détection par les images de profondeur.

Le bilan de la fiabilité des détections est présenté dans la table 5.2. La sensibilité et la spécificité sont définies comme suit :

$$\text{sensibilité} = \frac{\text{vrais positifs}}{\text{vrais positifs} + \text{faux négatifs}}$$

$$\text{spécificité} = \frac{\text{vrais négatifs}}{\text{vrais négatifs} + \text{faux positifs}}$$

Pour les calculs de ces deux paramètres, seules sont considérées les zones couvertes par les caméras de profondeur. Ainsi, si une personne est dans la salle de bains (non couverte), aucune détection ne sera faite par le système. Pour autant, ce cas n’est pas considéré comme un faux négatif puisqu’il est simplement non traité. Comme présenté dans le tableau, le filtrage a permis d’atteindre 100% de spécificité (pour cette expérience, ce n’est pas une vérité générale), mais a réduit la sensibilité du système. Autrement dit, les fausses détections sont toutes éliminées, mais certaines véritables détections le sont aussi comme des dommages collatéraux.

Même s’il serait préférable de conserver les données supprimées par erreur, nous considérons qu’il est préférable d’avoir une spécificité proche de 100%, quitte à perdre certaines bonnes données. En effet, notre étude vise à analyser l’activité des personnes sur le long terme, c’est à dire sur des mois, voire des années. Il n’est donc pas gênant de manquer quelques données de temps en temps. Au contraire conserver des fausses détections d’équipements de l’appartement, lesquelles peuvent durer plusieurs heures à chaque fois paraît bien plus préjudiciable à une analyse fiable de l’activité du sujet.

Pour autant, des améliorations peuvent être envisagées pour améliorer la sensibilité, sans pour autant dégrader la spécificité. Par exemple, nous pourrions fusionner les morceaux de trajectoire considérés comme valides afin de combler les faux négatifs à la minute 18. Sauf que cette configuration où l’on dispose du début et de la fin de la trajectoire, sans mouvement apparent entre les deux se retrouverait également dans un autre cas : le changement de pièce. Si une personne va dans la salle de bains, puis en ressort deux minutes plus tard, les caméras détecteront une trajectoire allant vers l’entrée de la salle de bains, puis une autre en ressortant. Il serait alors bien hâtif de conclure que la personne est restée sur le pas de la porte de la salle de bains entre temps, il est simplement impossible de le savoir. Ainsi, fusionner la trajectoire d’une personne allant s’asseoir avec la trajectoire au moment où elle se lève de sa chaise, en recréant la trajectoire intermédiaire s’applique à ce scénario particulier, mais ne peut pas être généralisé.

Pour améliorer la sensibilité, il serait également possible d’analyser les images couleurs (sachant que cela peut poser un problème éthique) pour mieux faire la différence entre une personne et un équipement du logement. Des algorithmes de détection de visages pourraient être utilisés, mais

	Sensibilité	Spécificité
Données brutes	86%	78%
Données filtrées	68%	100%

TABLE 5.2 – Fiabilité du système de localisation avec et sans filtrage

la limitation aux personnes de face est très contraignante. Les données de profondeur pourraient par ailleurs être utilisées pour détecter le squelette des personnes localisées. En effet, la détection de squelette est bien plus fiable que celle du centre de masse décrite dans le chapitre 3, mais nécessite plus de temps pour détecter une personne, ainsi que de se placer dans une position particulière (bras levés à l'équerre) très peu naturelle. Enfin, en supposant que chaque personne dans l'appartement porte sur elle un téléphone équipé d'une puce Bluetooth et de l'application mobile développée pour le système REC@MED (section 4.5) capable de se connecter au living lab, il serait possible de détecter et d'identifier les personnes présentes dans le logement, ainsi que d'avoir une estimation de la pièce dans laquelle ces personnes se trouvent. Nous pourrions ainsi envisager de générer des probabilités de présence des personnes dans des zones de l'appartement. Aucune de ces techniques ne répond facilement et totalement à notre besoin d'amélioration du système, mais l'association de plusieurs de ces techniques pourrait bien être la clé de l'optimisation de notre système de localisation indoor.

Pour autant, les résultats sont encourageants et démontrent la capacité du living lab à suivre plusieurs personnes simultanément. En particulier, le moment où les deux personnes effectuent une activité sociale (18^e minute) est bien visible comme le seul où deux personnes sont ensemble dans la même pièce, avec les limitations sur la sensibilité que nous venons d'évoquer. L'analyse de la présence simultanée est donc une première étape pertinente vers l'analyse de collaborations au domicile, qu'il faudra approfondir à la suite de cette thèse.

5.3 Fusion de données hétérogènes

5.3.1 Présentation de l'expérience

Le deuxième aspect de la plateforme livINLab que nous avons voulu tester est sa capacité à fusionner des données hétérogènes afin d'augmenter la compréhension de ces données. Ainsi, nous avons entrepris de réaliser un scénario collaboratif, incluant des activités indoor et outdoor. Ce scénario est réalisé par quatre personnes quittant ensemble le laboratoire pour aller déjeuner au restaurant universitaire, puis revenant au laboratoire. Ces quatre personnes jouent ensuite durant une demi-heure à la coinche, un jeu de cartes dérivé de la belote [FFBelote, 2016]. Finalement, elles se séparent, retournent à leurs bureaux et reprennent le travail individuel.

Durant l'ensemble de l'expérience, les quatre personnes sont instrumentées avec le capteur d'activité cardiaque du projet REC@MED présenté en section 5.3. Le capteur mesure les intervalles R-R entre deux pics du complexe QRS (Figure 5.9) Il envoie également des mesures de variabilité cardiaque toutes les cinq minutes, lesquelles fournissent entre autres des informations sur l'activation des systèmes sympathique ou parasympathique. Ces données fournissent un retour pertinent directement sur le téléphone, sans passer par le living lab. Cependant, elles peuvent être recalculées plus fréquemment sur une fenêtre *glissante* de cinq minutes grâce à la puissance de calcul du living lab pour une analyse plus fine.

L'application mobile associée, exécutée sur le téléphone des personnes suivies, enregistre également les positions fournies par le système d'exploitation Android. Ce système se base à la fois sur la puce GPS du téléphone, sur les réseaux Wi-Fi détectés, ainsi que sur les réseaux de téléphonie à proximité. Ces techniques ont été décrites plus précisément dans le chapitre 2. La précision des mesures de position variant énormément selon la méthode de localisation utilisée, une estimation de cette précision (de 4 à 1200 mètres selon nos données expérimentales), fournie par Android, permet de connaître la fiabilité de ces mesures.

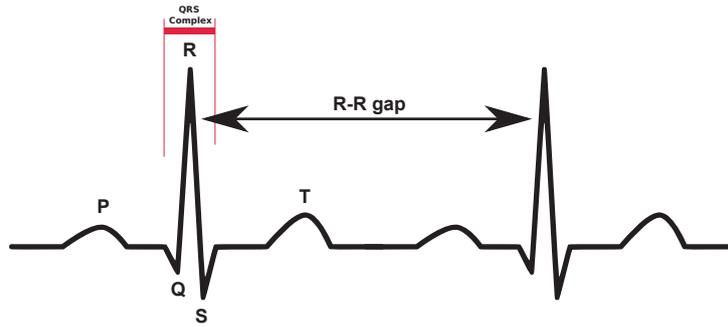


FIGURE 5.9 – Intervalle R-R mesuré sur l’ECG par le capteur d’activité cardiaque de REC@MED

5.3.2 Lier les déplacements et la variation de la fréquence cardiaque

Lorsqu’une personne qui se trouvait alors au repos effectue un effort physique, son rythme cardiaque augmente en général. Dans un premier temps, nous allons vérifier si cette relation est visible sur les données de nos expériences. Pour cela, nous avons besoin d’identifier les périodes où les personnes se déplacent car les déplacements en marchant constituent un effort physique.

Les données GPS obtenues ne sont malheureusement pas toujours exploitables. En effet, les déplacements sont effectués sur quelques centaines de mètres tout au plus. Ainsi, si une précision à 50 mètres près n’a pas beaucoup de sens, une précision à plusieurs centaines de mètres près est totalement inexploitable dans notre cas d’usage (nous savons tout de même que la personne est dans les environs du laboratoire). Typiquement, lorsque les téléphones sont à l’intérieur d’un bâtiment, la précision chute et il devient impossible de se baser dessus pour suivre une trajectoire. Remarquons que tous les téléphones ne se valent pas forcément pour la localisation, mais nous n’avons pas eu l’occasion de faire une étude à ce sujet.

Pour représenter l’utilisabilité des données de localisation des téléphones au cours des expériences, nous avons représenté les déplacements effectués sur des fenêtres glissantes d’une minute, en retirant l’erreur possible due à l’imprécision de la mesure. Plus précisément, soit P_1, P_2, \dots, P_N l’ensemble des positions mesurées sur une minute, et E_1, E_2, \dots, E_N les précisions de mesure respectives. Le déplacement sur une minute est calculé comme suit (avec d la fonction distance euclidienne) :

$$\text{déplacement} = \max_{i \in [1, N], j \in [1, N]} \{d(P_i, P_j) - E_i - E_j\}$$

Le déplacement ainsi calculé permet, de savoir si d’après les données GPS, dans le pire cas où les erreurs seraient maximales et s’ajouteraient, la personne s’est déplacée et de quelle distance. Le résultat de ce calcul pour le sujet 1 est représenté sur la figure 5.10 où le temps en abscisse correspond aux minutes écoulées depuis minuit. Ainsi, la minute 780 correspond par exemple à l’horaire 13 :00 ($780 = 13 \times 60$). Les déplacements négatifs (pour cause d’imprécision trop grande) ont été ramenés à zéro.

On voit que le déplacement mesuré est nul sur une grande partie de l’expérience. La précision, ou plutôt l’imprécision, estimée est alors plus grande que la distance parcourue selon les données de localisation du téléphone. Un résultat nul peut donc aussi bien décrire une position statique qu’une mesure imprécise. Dans les deux cas, il est difficile de valider l’existence d’un déplacement.

Trois périodes de déplacements utilisables sont identifiées aux minutes 770 (12 :50), 800 (13 :20) et 870 (14 :30). Elles correspondent à deux aller-retours du sujet 1 : un premier entre le laboratoire et le restaurant universitaire aux minutes 770 et 800, et un second vers un autre bâtiment du campus aux minutes 860 et 870. Notons que l’aller du second aller-retour n’apparaît pas sur les données de localisation du téléphone. Ce dernier était bien actif, mais n’a pas réussi à se localiser de manière précise.

La trajectoire retour (870^e minute), globalement bien mesurée pour sa part, est présentée sur la figure 5.11. On y voit le départ depuis le bâtiment sur la gauche, le chemin suivi le long de la route, puis l’arrivée au niveau du bâtiment de droite. Les positions mesurées sont donc très proches de la trajectoire réelle.

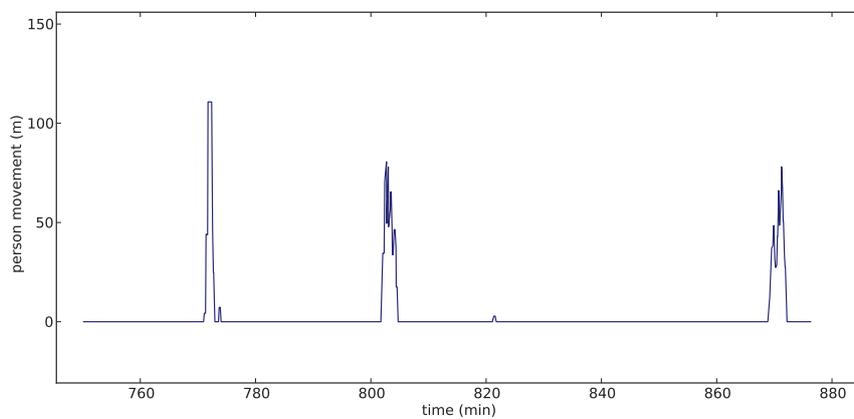


FIGURE 5.10 – Déplacements du sujet 1 calculés à partir des données de position du téléphone, sur une fenêtre glissante d’une minute

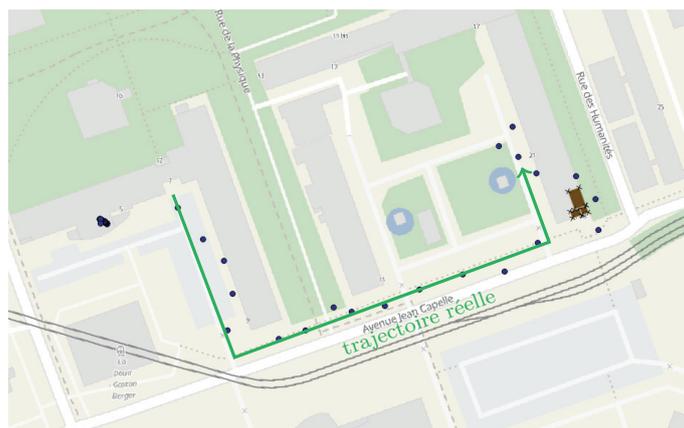


FIGURE 5.11 – Ensemble des positions mesurées par le téléphone du sujet 1 (points bleu foncé) entre le bâtiment de gauche et celui de droite

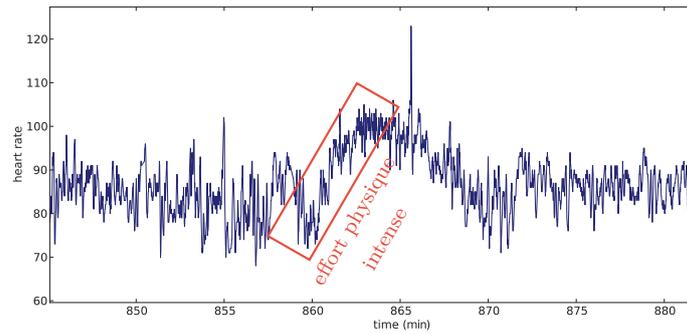


FIGURE 5.12 – Rythme cardiaque du sujet 1 en batttements par minute lors du troisième déplacement détecté

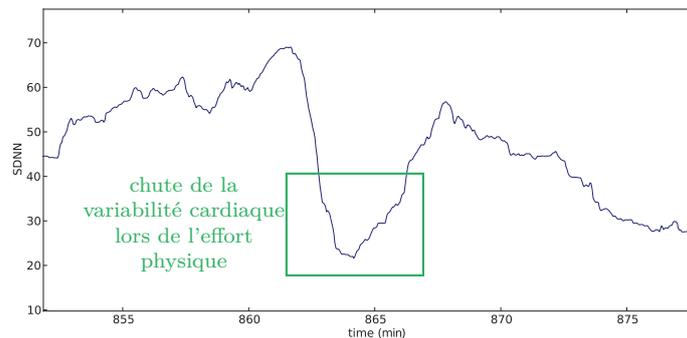


FIGURE 5.13 – SDNN du sujet 1 lors du troisième déplacement détecté, la variabilité cardiaque diminue fortement avec l'effort physique

Lorsque l'on trace le rythme cardiaque du sujet 1 sur le second aller-retour, on obtient le graphe de la figure 5.12. Son rythme cardiaque a clairement augmenté au niveau de la minute 860 correspondant à l'aller de son trajet. Cette variation est d'autant plus grande qu'il a pris les escaliers, augmentant ainsi l'intensité de l'effort physique. Ainsi, lorsque l'effort physique fourni est important et que les données de localisation GPS du téléphone sont bonnes, il est possible de corréler les informations de localisation et de fréquence cardiaque.

L'analyse de la variabilité cardiaque du sujet 1 corrobore cette analyse. Cette variabilité est représentée sur la figure 5.13 via le SDNN, c'est à dire l'écart type des intervalles R-R sur une fenêtre glissante de 5 minutes. Nous pouvons voir une chute de la variabilité cardiaque lors de l'effort physique, ce qui est tout à fait normal. En effet, au repos, la fréquence cardiaque varie en suivant principalement la respiration, on parle d'arythmie sinusale respiratoire. La fréquence cardiaque augmente lorsque l'on inspire et diminue lorsque l'on expire. Ces variations reflètent également une capacité d'action, la capacité à fournir un effort rapidement. Au contraire, en plein effort physique, la fréquence cardiaque augmente sans beaucoup varier autour de sa valeur moyenne (donc sans trop diminuer) afin de soutenir au mieux l'effort en cours.

Ces résultats d'expérience montrent ainsi la capacité du living lab à fusionner des données hétérogènes en les replaçant sur un axe temporel unique. De cette manière, il est possible de contextualiser une variation de la variabilité cardiaque d'une personne par la détection d'un déplacement. À l'inverse, il est également possible de vérifier qu'une activité physique entraîne une augmentation de la fréquence cardiaque. Comme nous l'avons déjà évoqué, l'analyse d'un état absolu n'a que peu d'intérêt, mais vérifier sur le long terme si les mêmes causes entraînent les mêmes conséquences pourrait être un indicateur de santé des personnes suivies.

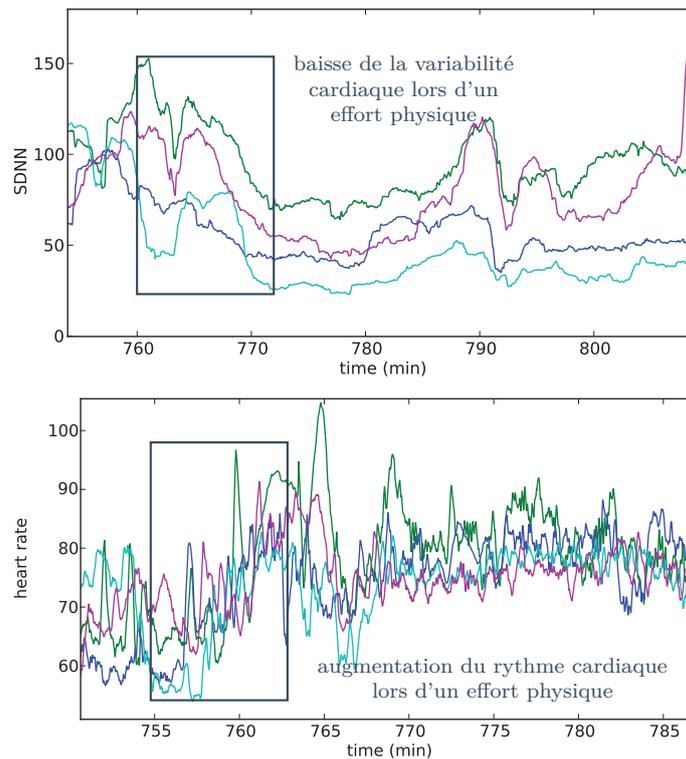


FIGURE 5.14 – L’influence d’une activité physique commune (marche simultanée vers le restaurant) entraîne des variations similaires du rythme et de la variabilité cardiaque. Cependant, on décèle aussi des différences liées entre autres à l’entraînement physique variable selon les sujets.

5.3.3 Influence de l’activité mentale sur l’activité cardiaque

La seconde partie de notre scénario consiste en une demi-heure de jeu de cartes. Nous avons cherché à analyser l’activité cardiaque des joueurs lors de cet exercice mental pour voir s’il était possible de déceler facilement des événements du type stress : augmentation de l’activation du systèmes sympathique lors d’une posture statique.

Avant de nous pencher sur les fréquences cardiaques durant la partie de cartes, notons que les joueurs n’ont pas tous la même activité cardiaque que ce soit au repos ou lors d’une activité physique similaire. Dans notre cas, lorsque les quatre personnes suivies partent ensemble pour se restaurer, on peut voir que les fréquences cardiaques de chacun des individus augmentent, mais que des différences persistent, liées principalement au niveau d’entraînement (Figure 5.14). Les sujets les plus sportifs ont une fréquence cardiaque naturellement plus basse que les autres. Nous avons donc une variabilité inter-personnelle non négligeable, ce qui pourrait complexifier notre étude.

En ce qui concerne l’influence du jeu de cartes, nous n’avons pas réussi, d’après nos données, à extraire un indicateur fiable de l’influence du jeu sur les activités cardiaques des joueurs. Nous voyons des variations de la variabilité et de la fréquence cardiaque, lesquelles peuvent être liées au stress durant le jeu, mais pour autant, elles ne sont pas toujours simultanées entre les joueurs.

Cependant, cette première analyse était basée sur un scénario bien moins strict que dans le cas de la détection de la présence simultanée de plusieurs personnes dans une pièce. En effet, avant d’aller manger, certaines personnes passaient du temps debout alors que d’autres restaient assises sur une chaise, créant ainsi des conditions initiales variables. Par ailleurs, durant la partie de cartes, les joueurs n’ont pas tous besoin de se concentrer autant les uns que les autres aux mêmes moments. Nos données auraient pu être révélatrices si l’influence de la partie de cartes sur le jeu avait été très importante. Or il semble que si cette influence existe, elle ne puisse pas être détectée dans notre cas de figure. Il serait alors pertinent de mieux cadrer les conditions

d'expérience, ainsi que de relever les moments de la partie nécessitant une grande concentration et les sujets concernés par ce stress. Les parties étant soumises à l'aléa de la distribution des cartes (et briser cet aléa brise le jeu), il semble impossible de pouvoir répéter à l'identique et plusieurs fois de suite la même situation. Pour autant, l'influence de la variabilité cardiaque des joueurs sur le résultat des parties serait également à analyser sur le long terme.

5.4 Futures expérimentations à mener

Nos expérimentations ont permis de valider la capacité de la plateforme à suivre les trajectoires de plusieurs personnes à domicile, dans des conditions variées (scénario de 24h compressé) en se limitant au cas d'un suivi d'activité sur le long terme. En effet, la sensibilité du système reste trop faible pour le moment pour garantir la détection de toutes les trajectoires pour identifier des situations critiques et d'urgence (une chute par exemple). Ces données ont permis de valider une première étape vers l'analyse des activités sociales au quotidien par la détection de la présence simultanée de plusieurs personnes dans la même zone de l'appartement. Le living lab est également capable de fusionner un ensemble de données hétérogènes en les replaçant sur un même axe temporel pour les interpréter conjointement.

Il serait alors pertinent de mettre en place un scénario encore plus complet que les précédents permettant de suivre plusieurs personnes lors d'une activité physique en extérieur, suivie d'une toilette dans l'appartement et d'une prise de repas commune. Le continuum de suivi d'activité à domicile et dans la cité serait ainsi complètement validé.

Le suivi de santé au quotidien par le suivi d'activité nécessitera néanmoins de mettre en place des expériences sur le long terme en situation réelle. Notre plateforme a été conçue avec cette contrainte pour être facilement transposable dans la plupart des appartements sans nécessiter de lourds travaux. Ainsi, si son utilisation en tant que living lab doit rester un point de départ du développement des technologies pour la santé, la récupération de données en situation réelle est une étape indispensable pour vérifier la pertinence d'un suivi sur le long terme, en particulier des activités sociales des individus. Ce type de transpositions du living lab dans des appartements habités au quotidien devra donc être mis en place dans les années à venir.

Discussion

Ce travail de thèse avait pour objet la conception et l'évaluation d'un dispositif technologique permettant le suivi des trajectoires pour la mesure de l'activité d'un sujet dans un living Lab, en vue de l'extraction d'indicateurs de santé et de bien être. Je l'ai rapidement étendu vers la détection des activités collaboratrices de plusieurs sujets afin de se donner les moyens d'accéder à une variable de socialisation qui est un facteur clef de la bonne santé du sujet isolé.

Il a été l'occasion de se demander comment effectuer un suivi de santé à domicile qui permette de préserver les individus en bonne santé chez eux, de réduire les placements en environnements médicalisés et les frais médicaux, tout ceci en mettant les lieux de vie au service de leurs habitants.

Ces lieux de vie ont été intégrés dans notre plateforme de test : un living lab étendu à la cité, capable de suivre l'activité de plusieurs personnes, c'est-à-dire les symptômes visibles de leur santé, au quotidien. Afin de servir au mieux les habitants du living lab, et de favoriser la créativité des groupes de personnes multi-compétences venus inventer l'appartement et la cité de demain, nous avons conçu notre living lab comme un exosquelette de ses habitants. Au sein de ce concept, le living lab devient un robot bio-inspiré, capable de suivre l'activité de ses habitants au quotidien pour mieux les servir. Dans l'idéal, les occupants devraient se sentir en symbiose avec leur lieu de vie comme s'il était une extension d'eux-même capable d'améliorer leurs conditions de vie tout en conservant un fonctionnement complètement intelligible par tous.

Les innovations proposées dans le cadre du living lab ne sont pas des ruptures technologiques. Au contraire, toujours dans l'idée de favoriser l'affordance du living lab et de contrôler les coûts de développement et de mise en place, nous avons cherché à détourner des technologies existantes. Le but étant d'appliquer un capteur, un outil logiciel, une technologie quelconque à un usage différent de ce pourquoi il a été créé. Par exemple, les caméras de profondeur Kinect qui étaient conçues pour le jeu, les outils de cartographie qui étaient pensés pour un usage à l'extérieur, ou encore l'environnement logiciel ROS qui était spécialisé dans les applications de robotique. Pour autant, ces outils ayant déjà été pris en main par le grand public dans des cas d'usage différents, il est possible pour lui de se raccrocher à ce qu'il connaît des consoles de jeu, des cartographies en ligne ou encore des interfaces en trois dimensions.

Cette manière de concevoir le living lab doit permettre de faciliter la co-conception de services innovant pour la santé à domicile et dans la cité. Le living lab a ainsi été réalisé sur un modèle complètement modulaire, capable tant d'intégrer des capteurs hétérogènes en tout genre, que des robots de service ou d'interaction, ou des technologies qui ne seront disponibles que dans les années à venir. Cet environnement intelligent est avant tout une base qui va continuer à évoluer au fil du temps et des technologies, avec ses occupants, en cherchant à favoriser l'innovation collaborative et le prototypage rapide, la technologie faisant office d'outil et non pas de contrainte. Cet outil évolutif permettra-t-il de créer des environnements intelligents répondant mieux aux besoins de leurs occupants ? Les services ainsi co-conçus seront-ils mieux acceptés par les utilisateurs finaux ? Ce type de living lab peut-il être un vecteur de compréhension et d'acceptation de la technologie qui nous entoure de plus en plus ? Ce sont également ces défis sociétaux qui sont adressés par cette plateforme dont le futur ne dépend pas seulement des chercheurs mais également des citoyens acteurs de leur santé et de leur avenir.

En particulier, nous avons choisi de permettre via le living lab, l'exploration de l'influence des activités collaboratives et sociales sur la santé. En effet, nous avons remarqué à la fois l'importance

de cet aspect sur notre santé, et le manque d'études sur les activités collaboratives en environnement intelligent. Des premières étapes ont été franchies vers cet objectif. Tout d'abord la fusion, pour plusieurs personnes simultanément, des trajectoires à l'intérieur de l'appartement comme à l'extérieur, ainsi que de l'activité cardiaque et des paramètres environnementaux. Par la suite, ces données ont été utilisées dans le cadre d'un scénario collaboratif dans l'appartement. Les réalisations de ce dernier ont permis de mettre en évidence un lien entre l'activité sociale du scénario (prendre le café à table) et la détection de la présence simultanée de plusieurs personnes dans la même pièce. Pour finir, lors d'un scénario faisant intervenir quatre personnes allant se restaurer, puis jouant aux cartes, nous avons tenté de lier leur activité collaborative purement intellectuelle à leurs activités cardiaques respectives. Cette dernière tentative s'est révélée infructueuse, sans que le résultat ne soit définitif. En effet, le cadre flexible de l'expérience ne pouvait permettre de mettre en évidence qu'un impact majeur du jeu sur le rythme ou la variabilité cardiaque des joueurs. Nous pouvons alors nous demander quels seraient les résultats si le scénario d'activité avait été plus strict. Des capteurs complémentaires du projet REC@MED (actimétrie et activité électrodermale) pourraient également fournir des données complémentaires, potentiellement plus pertinentes.

Remarquons ici que la granularité de l'analyse des activités collaboratives peut être très variable. L'étude de la collaboration dans le cas du jeu de cartes pourrait également se limiter à détecter plusieurs personnes autour d'une table comme dans le cas du scénario sus-cité. Cette analyse de la collaboration sur le long terme pourrait déjà apporter son lot d'informations sur l'influence de la socialisation d'une personne sur sa santé. Nous pourrions également aller à l'inverse jusqu'à des informations plus fines comme les émotions qui transparaissent du visage des personnes ou le rôle des odeurs dans le bien-être. Quelle serait l'influence d'une discussion, d'un jeu, d'un repas à plusieurs sur les émotions des personnes, sur leur activité, sur leur santé? Cette analyse pourrait être menée à la fois sur le court terme directement au living lab et sur le long terme en déployant la solution technologique en appartement réel. L'impact des aides de vie pourrait potentiellement être évalué au travers de l'étude de différentes activités sur différents publics afin d'optimiser les soutiens aux personnes en perte d'autonomie.

Nombre de questions se sont ainsi ajoutées au cours de notre première analyse de la collaboration vers l'étude de la socialisation à domicile et dans la cité. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, une analyse grossière de l'activité électrique d'une personne via un capteur placé au niveau du compteur électrique permet déjà d'extraire des informations pertinentes sur l'évolution de l'état de santé d'une personne seule à domicile. Ce système, non invasif et non intrusif pourrait être le premier outil massivement installé de suivi de santé à domicile. S'il n'est pas accepté, il semble illusoire d'espérer faire accepter aux populations un système plus précis et intrusif comme le nôtre. Cependant, la granularité plus fine que nous proposons dans notre analyse ainsi que l'évolutivité du système pourraient présenter des avantages importants en terme de réalisation d'un baromètre de santé de plusieurs personnes dans leur logement et dans la cité. De plus, cette analyse plus fine pourrait être un outil pertinent pour mieux comprendre nos manières de collaborer, pour définir un niveau de socialisation lié à une activité. Les études qui seront menées au living lab pourraient même permettre d'orienter des politiques publiques de soutien au maintien à domicile de nos aînés, ou des campagnes d'information sur l'importance ou non d'avoir une vie sociale avec des rapports directs et/ou indirects entre les individus. Au delà des interactions entre plusieurs humains, le living lab pourrait permettre d'analyser les interactions entre humains et robots. En effet, ces derniers pourraient avoir un rôle à jouer dans le maintien à domicile, comme dans le maintien du lien social des personnes isolées ou non (Figure 5.15).



FIGURE 5.15 – Les robots comme Nao pourraient avoir un rôle à jouer dans le maintien des liens sociaux dans les années à venir

Bibliographie

- [Addlesee et al., 2001] Addlesee, M., Curwen, R., Hodges, S., Newman, J., Steggles, P., Ward, A., and Hopper, A. (2001). Implementing a sentient computing system. Computer, 34(8) :50–56.
- [Adlam et al., 2001] Adlam, T., Gibbs, C., and Orpwood, R. (2001). The gloucester smart house bath monitor for people with dementia. Phys Med, 17(3) :189.
- [Anfosso and Rebaudo, 2011] Anfosso, A. and Rebaudo, S. (2011). G erontechnologies et contrôle de l’environnement au service du maintien à domicile : le projet gerhome. Gérontologie et société, (1) :119–131.
- [Assurance Maladie, 2008] Assurance Maladie (2008). Le modèle "AGGIR", Guide d’utilisation.
- [Ayzenberg and Picard, 2014] Ayzenberg, Y. and Picard, R. W. (2014). Feel : A system for frequent event and electrodermal activity labeling. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 18(1) :266–277.
- [Bernard, 1865] Bernard, C. (1865). Introduction à l’étude de la médecine expérimentale. Bailli re.
- [Bonder and Dal Bello-Haas, 2008] Bonder, B. R. and Dal Bello-Haas, V. (2008). Functional performance in older adults. FA Davis.
- [Bonner, 1998] Bonner, S. (1998). Assisted interactive dwelling house. In Proc. 3rd TIDE Congress : Technology for Inclusive Design and Equality Improving the Quality of Life for the European Citizen, volume 23, page 25.
- [Bormann, 2016] Bormann, R. (2016). Cob people detection. http://wiki.ros.org/cob_people_detection.
- [Cao et al., 2009] Cao, H., Leung, V., Chow, C., and Chan, H. (2009). Enabling technologies for wireless body area networks : A survey and outlook. IEEE Communications Magazine, 47(12) :84–93.
- [Cash, 2003] Cash, M. (2003). Assistive technology and people with dementia. Reviews in Clinical Gerontology, 13 :313–319.
- [Chan et al., 1999] Chan, M., Bocquet, H., Campo, E., Val, T., and Pous, J. (1999). Alarm communication network to help carers of the elderly for safety purposes : a survey of a project. International Journal of Rehabilitation Research, 22(2) :131–136.
- [Chehaider et al., 2013] Chehaider, M., Roussel, K., and Song, Y.-Q. (2013). Interop rabilit  des réseaux de capteurs hétérogènes dans un appartement intelligent. In UbiMob - 9 mes journées francophones Mobilité et Ubiquit  - 2013, UbiMob 2013, Nancy, France.
- [Chen et al., 2005] Chen, L.,  zsu, M. T., and Oria, V. (2005). Robust and fast similarity search for moving object trajectories. In Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD international conference on Management of data, pages 491–502. ACM.
- [Chrony, 2016] Chrony (2016). Chrony website. <http://chrony.tuxfamily.org/>.
- [Cook et al., 2003] Cook, D. J., Youngblood, M., Heierman, III, E. O., Gopalratnam, K., Rao, S., Litvin, A., and Khawaja, F. (2003). Mavhome : An agent-based smart home. In Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PERCOM ’03, pages 521–, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

- [Coradeschi et al., 2013] Coradeschi, S., Cesta, A., Cortellessa, G., Coraci, L., Gonzalez, J., Karlsson, L., Furfari, F., Loutfi, A., Orlandini, A., Palumbo, F., Pecora, F., von Rump, S., Štimec, A., Ullberg, J., and Öttslund, B. (2013). Giraffplus : Combining social interaction and long term monitoring for promoting independent living. In 2013 6th International Conference on Human System Interactions (HSI), pages 578–585.
- [Corchado et al., 2010] Corchado, J., Bajo, J., Tapia, D., and Abraham, A. (2010). Using heterogeneous wireless sensor networks in a telemonitoring system for healthcare. Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on, 14(2) :234–240.
- [Cormier et al., 2015] Cormier, G., Laferté, J.-M., Carrault, G., Dillenseger, J.-L., and Gauthier, V. (2015). Suivi d’individus dans des cartes de profondeurs par champ de markov, dans un contexte de détection de chute. In Gretsi 2015.
- [Cruz-Sanchez et al., 2012] Cruz-Sanchez, H., Havet, L., Chehaider, M., and Song, Y.-Q. (2012). Mpigate : A solution to use heterogeneous networks for assisted living applications. In Ubiquitous Intelligence Computing and 9th International Conference on Autonomic Trusted Computing (UIC/ATC), 2012 9th International Conference on, pages 104–111.
- [Cucchiara et al., 2007] Cucchiara, R., Prati, A., and Vezzani, R. (2007). A multi-camera vision system for fall detection and alarm generation. Expert Systems, 24(5) :334–345.
- [Daoust et al., 2010] Daoust, F., Patrikakis, C. Z., Cruz, R. S., S, M., and Osborne, D. S. (2010). Towards video on the web with html5.
- [Deak et al., 2012] Deak, G., Curran, K., and Condell, J. (2012). A survey of active and passive indoor localisation systems. Computer Communications, 35(16) :1939–1954.
- [Demiris and Hensel, 2007] Demiris, G. and Hensel, B. (2007). Technologies for an aging society : a systematic review of "smart home" applications. Yearbook of medical informatics, pages 33–40.
- [Duke University, 2016] Duke University (2016). The duke smart home program. <http://smarthome.duke.edu>.
- [Duo 3D, 2016] Duo 3D (2016). Duo 3d official website. <https://duo3d.com/>.
- [Duplex et al., 2013] Duplex, J., Gosswiller, S., and Fagnoni, S. (2013). A better knowledge of electricity consumption for residential customers through the linky smart meter. In Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on, pages 1–4.
- [Edward and Brett A., 2016] Edward, J. and Brett A., D. (2016). Validation of the fitbit surge and charge hr fitness trackers.
- [Elger and Furugre, 1998] Elger, G. and Furugre, B. (1998). Improving the quality of life for the European citizen Technology for Inclusive Design and Equality Assistive Technology Research Series, volume 4, chapter SmartBO an ICT and computer based demonstration home for disabled, pages 392–395. IOS Press.
- [EPSG.io, 2015] EPSG.io (2015). Epsg.io website referencing most coordinate systems : <http://epsg.io/27572>. <http://epsg.io/27572>.
- [Erlichman et al., 2002] Erlichman, J., Kerbey, A. L., and James, W. P. T. (2002). Physical activity and its impact on health outcomes. paper 2 : prevention of unhealthy weight gain and obesity by physical activity : an analysis of the evidence. Obesity Reviews, 3(4) :273–287.
- [EU, 2016] EU (2016). Eurostat, european union official statistics. <http://ec.europa.eu/eurostat/>.
- [FFBelote, 2016] FFBelote (2016). Site officiel de la fédération française de belote. <http://www.ffbelote.org/>.
- [Foote, 2013] Foote, T. (2013). tf : The transform library. In Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2013 IEEE International Conference on, Open-Source Software workshop, pages 1–6.
- [France, 2016] France (2016). Site officiel du service public français. <https://www.service-public.fr>.

- [Fukukawa et al., 2004] Fukukawa, Y., Nakashima, C., Tsuboi, S., Kozakai, R., Doyo, W., Niino, N., Ando, F., and Shimokata, H. (2004). Age differences in the effect of physical activity on depressive symptoms. *Psychology and Aging*, 19(2) :346.
- [Giroux et al., 2008] Giroux, S., Bauchet, J., Pigot, H., Lussier-Desrochers, D., and Lachappelle, Y. (2008). Pervasive behavior tracking for cognitive assistance. In *Proceedings of the 1st International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, PE-TRA '08*, pages 86 :1–86 :7, New York, NY, USA. ACM.
- [Helal et al., 2005] Helal, S., Mann, W., El-Zabadani, H., King, J., Kaddoura, Y., and Jansen, E. (2005). The gator tech smart house : a programmable pervasive space. *Computer*, 38(3) :50–60.
- [Hightower et al., 2000] Hightower, J., Want, R., and Borriello, G. (2000). Spoton : An indoor 3d location sensing technology based on rf signal strength. *UW CSE 00-02-02, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA*, 1.
- [Hunter et al., 2012] Hunter, G. R., McCarthy, J. P., and Bamman, M. M. (2012). Effects of resistance training on older adults. *Sports Medicine*, 34(5) :329–348.
- [Inspection générale des affaires sociales, 2009] Inspection générale des affaires sociales (2009). Etat des lieux relatif à la composition des coûts mis à la charge des résidents des établissements d’hébergement pour personnes âgées dépendantes (ehpad).
- [Intille et al., 2006] Intille, S. S., Larson, K., Tapia, E. M., Beaudin, J. S., Kaushik, P., Nawyn, J., and Rockinson, R. (2006). *Pervasive Computing : 4th International Conference, PERVASIVE 2006, Dublin, Ireland, May 7-10, 2006. Proceedings*, chapter Using a Live-In Laboratory for Ubiquitous Computing Research, pages 349–365. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Jaime et al., 2013] Jaime, J., Urdiales, C., and Sandoval, F. (2013). Heterogeneous device networking for an ami environment.
- [Junestrand et al., 2003] Junestrand, S., Molin, G., Tollmar, K., and Keijer, U. (2003). User study of video-mediated communication in the domestic environment with intellectually disabled persons. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 15(1) :87–103.
- [Kantoch, 2013] Kantoch, E. (2013). Technical verification of applying wearable physiological sensors in ubiquitous health monitoring. In *Computing in Cardiology Conference (CinC), 2013*, pages 269–272.
- [Kawarada et al., 2000] Kawarada, A., Nambu, M., Tamura, T., Ishijima, M., Yamakoshi, K., and Togawa, T. (2000). Fully automated monitoring system of health status in daily life. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2000. Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE*, volume 1, pages 531–533 vol.1.
- [Kemper and Hauschildt, 2010] Kemper, J. and Hauschildt, D. (2010). Passive infrared localization with a probability hypothesis density filter. In *Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2010 7th Workshop on*, pages 68–76.
- [Kennedy et al., 2009] Kennedy, D. P., Gläscher, J., Tyszk, J. M., and Adolphs, R. (2009). *Nature neuroscience*, 12(10) :1226–1227.
- [Kidd et al., 1999] Kidd, C. D., Orr, R., Abowd, G. D., Atkeson, C. G., Essa, I. A., MacIntyre, B., Mynatt, E., Starner, T. E., and Newstetter, W. (1999). *Cooperative Buildings. Integrating Information, Organizations, and Architecture : Second International Workshop, CoBuild'99, Pittsburgh, PA, USA, October 1-2, 1999. Proceedings*, chapter The Aware Home : A Living Laboratory for Ubiquitous Computing Research, pages 191–198. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [KNX, 2015] KNX (2015). Knx certified products. <http://www.knx.org/knx-en/knx/knx-products/knx-certified-devices/index.php>.
- [Kolodziej and Hjelm, 2006] Kolodziej, K. W. and Hjelm, J. (2006). *Local positioning systems : LBS applications and services*. CRC press.
- [LeBellego et al., 2006] LeBellego, G., Noury, N., Virone, G., Mousseau, M., and Demongeot, J. (2006). A model for the measurement of patient activity in a hospital suite. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 10(1) :92–99.

- [Marek and Rantz, 2000] Marek, K. D. and Rantz, M. J. (2000). Aging in place : A new model for long-term care. Nursing administration quarterly, 24(3) :1–11.
- [Marsh, 2002] Marsh, J. (2002). House calls. Rochester Review, 64(3) :22–6.
- [Massot et al., 2015] Massot, B., Risset, T., Michelet, G., and McAdams, E. (2015). A wireless, low-power, smart sensor of cardiac activity for clinical remote monitoring. In 2015 17th International Conference on E-health Networking, Application and Services (HealthCom) (IEEE H pages 487–493, Boston, United States. IEEE.
- [Ni et al., 2004] Ni, L. M., Liu, Y., Lau, Y. C., and Patil, A. P. (2004). Landmarc : indoor location sensing using active rfid. Wireless networks, 10(6) :701–710.
- [Noury, 2014] Noury, N. (2014). 5.08 - smart homes : Ambient intelligence and how {IT} can help increase longevity. In Brahme, A., editor, Comprehensive Biomedical Physics, pages 139 – 152. Elsevier, Oxford.
- [Noury et al., 2011a] Noury, N., Berenguer, M., Teyssier, H., Bouzid, M.-J., and Giordani, M. (2011a). Building an index of activity of inhabitants from their activity on the residential electrical power line. Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on, 15(5) :758–766.
- [Noury et al., 2007] Noury, N., Fleury, A., Rumeau, P., Bourke, A. K., Laighin, G. O., Rialle, V., and Lundy, J. E. (2007). Fall detection - principles and methods. In Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE, pages 1663–1666.
- [Noury et al., 2000] Noury, N., Herve, T., Rialle, V., Virone, G., Mercier, E., Morey, G., Moro, A., and Porcheron, T. (2000). Monitoring behavior in home using a smart fall sensor and position sensors. In Microtechnologies in Medicine and Biology, 1st Annual International, Conference On. 2000, pages 607–610.
- [Noury et al., 2011b] Noury, N., Poujaud, J., Fleury, A., Nocua, R., Haddidi, T., and Rumeau, P. (2011b). Smart Sweet Home... A Pervasive Environment for Sensing our Daily Activity?, pages 187–208. Atlantis Press, Paris.
- [Noury et al., 2015] Noury, N., Sevrin, L., and Massot, B. (2015). From health smart homes to living labs for health. In 17th International Conference on E-health Networking, Application Services (HealthCom), pages 164–169.
- [OGC, 2016] OGC (2016). Open geospatial consortium official website. <http://www.opengeospatial.org/>.
- [OpenHAB, 2016] OpenHAB (2016). Openhab website. <http://www.openhab.org/>.
- [Patil and Buchade, 2014] Patil, H. and Buchade, A. (2014). Review and study of real time video collaboration framework webrtc.
- [PostGIS, 2015] PostGIS (2015). Postgis official website. <http://postgis.net/>.
- [Priyantha et al., 2000] Priyantha, N. B., Chakraborty, A., and Balakrishnan, H. (2000). The cricket location-support system. In Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '00, pages 32–43, New York, NY, USA. ACM.
- [QGIS, 2015] QGIS (2015). Qgis official website. <http://qgis.org/>.
- [ROS, 2015] ROS (2015). Rviz : 3d visualization tool for ros. <http://wiki.ros.org/rviz>.
- [ROS, 2016] ROS (2016). Ros official website. <https://ros.org>.
- [Saab and Nakad, 2011] Saab, S. S. and Nakad, Z. S. (2011). A standalone rfid indoor positioning system using passive tags. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58(5) :1961–1970.
- [Samper et al., 2008] Samper, J., Lagunilla, J., and Perez, R. (2008). GPS and Galileo : Dual RF Front-end receiver and Design, Fabrication, & Test. McGraw-Hill Education.
- [Sandström et al., 2005] Sandström, G., Gustavsson, S., Lundberg, S., Keijer, U., and Junstrand, S. (2005). Home-Oriented Informatics and Telematics, chapter Long-term Viability of Smart Home Systems, pages 71–86. Springer US, Boston, MA.

- [Schmidhuber, 2015] Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks : An overview. Neural Networks, 61 :85 – 117.
- [Sevrin et al., 2015a] Sevrin, L., Noury, N., Abouchi, N., Jumel, F., Massot, B., and Saraydaryan, J. (2015a). A bio-inspired living lab as a robot exoskeleton. In 17th International Conference on E-health Networking, Application Services (HealthCom), pages 552–556.
- [Sevrin et al., 2015b] Sevrin, L., Noury, N., Abouchi, N., Jumel, F., Massot, B., and Saraydaryan, J. (2015b). Characterization of a multi-user indoor positioning system based on low cost depth vision (kinect) for monitoring human activity in a smart home. In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 37th Annual International Conference of the IEEE, pages 5003–5007. other ref : embc15submitted.
- [Sevrin et al., 2015c] Sevrin, L., Noury, N., Abouchi, N., Jumel, F., Massot, B., and Saraydaryan, J. (2015c). Preliminary results on algorithms for multi-kinect trajectory fusion in a living lab. IRBM, 36(6) :361 – 366. Special Issue RITS 2015.
- [Sevrin et al., 2016] Sevrin, L., Noury, N., Abouchi, N., Jumel, F., Massot, B., and Saraydaryan, J. (2016). Detection of collaborative activity with kinect depth cameras. In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 38th Annual International Conference of the IEEE.
- [SIG, 2014] SIG, B. (2014). Bluetooth Core Specifications 4.2, frequently asked questions.
- [Smart Homes NL, 2016] Smart Homes NL (2016). The national knowledge centre for home automation and smart living. <http://www.smart-homes.nl/Ervaren/De-Slimste-Woning.aspx>.
- [Stanley-Healthcare, 2016] Stanley-Healthcare (2016). Stanley healthcare website. <http://www.stanleyhealthcare.com>.
- [Steggles and Gschwind, 2005] Steggles, P. and Gschwind, S. (2005). The Ubisense smart space platform.
- [Stereo Labs, 2016] Stereo Labs (2016). Stereo labs official website. <https://www.stereolabs.com/>.
- [Stone and Skubic, 2015] Stone, E. E. and Skubic, M. (2015). Fall detection in homes of older adults using the microsoft kinect. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 19(1) :290–301.
- [Structure.io, 2015] Structure.io (2015). Structure.io website referring to the openni git repositories. <http://structure.io/>.
- [Sun et al., 2005] Sun, G., Chen, J., Guo, W., and Liu, K. J. R. (2005). Signal processing techniques in network-aided positioning : a survey of state-of-the-art positioning designs. IEEE Signal Processing Magazine, 22(4) :12–23.
- [Touvat et al., 2014] Touvat, F., Poujaud, J., and Noury, N. (2014). Indoor localization with wearable rf devices in 868mhz and 2.4ghz bands. In e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), 2014 IEEE 16th International Conference on, pages 136–139.
- [Valtonen et al., 2009] Valtonen, M., Maentausta, J., and Vanhala, J. (2009). Tiletrack : Capacitive human tracking using floor tiles. In Pervasive Computing and Communications, 2009. PerCom 2009. IEEE International Conference on, pages 1–10. IEEE.
- [Viani et al., 2013] Viani, F., Robol, F., Polo, A., Rocca, P., Oliveri, G., and Massa, A. (2013). Wireless architectures for heterogeneous sensing in smart home applications : Concepts and real implementation. Proceedings of the IEEE, 101(11) :2381–2396.
- [Virone et al., 2002] Virone, G., Noury, N., and Demongeot, J. (2002). A system for automatic measurement of circadian activity deviations in telemedicine. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 49(12) :1463–1469.
- [Voilmy and Duchêne, 2013] Voilmy, D. and Duchêne, J. (2013). Living lab activageing-developing home-based social and healthcare solutions for the elderly using participatory design. Studia Informatica Universalis, pages 63–68.

- [Weerasinghe et al., 2012] Weerasinghe, I. T., Ruwanpura, J. Y., Boyd, J. E., and Habib, A. F. (2012). Application of microsoft kinect sensor for tracking construction workers. In Construction Research Congress 2012, pages 858–867.
- [WHO, 1950] WHO (1950). The preamble of the constitution of the World Health Organization.
- [Wilson and Patwari, 2011] Wilson, J. and Patwari, N. (2011). See-through walls : Motion tracking using variance-based radio tomography networks. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 10(5) :612–621.
- [Withings, 2016] Withings (2016). Withings home official website. <http://www.withings.com/us/en/products/home>.
- [Woolham and Frisby, 2002] Woolham, J. and Frisby, B. (2002). How technology can help people feel safe at home. Journal of Dementia Care, 10(2) :27–28.
- [Zhao et al., 2009] Zhao, X., Delleandrea, E., and Chen, L. (2009). A people counting system based on face detection and tracking in a video. In Advanced Video and Signal Based Surveillance, 2009. AVSS '09. Sixth IEEE International Conference on, pages 67–72.



Le modèle AGGIR

Extrait de [Assurance Maladie, 2008].

A.1 Les activités analysées dans le modèle AGGIR

Le modèle AGGIR comporte 10 variables d'activité corporelle et mentale (dites discriminantes) et 7 variables d'activité domestique et sociale (dites illustratives) :

Corporelle et mentale

1. Cohérence
2. Orientation
3. Toilette
4. Habillage
5. Alimentation
6. Elimination urinaire et fécale
7. Transferts
8. Déplacements à l'intérieur
9. Déplacements à l'extérieur
10. Alerter

Domestique et sociale

1. Gestion
2. Cuisine
3. Ménage
4. Transports
5. Achats
6. Suivi du traitement
7. Activités du temps libre

A.2 Les groupes iso-ressources

Les groupes iso-ressources, déterminant des besoins en soins de base, sont calculés à partir des huit premières variables d'activités corporelles et mentales, les deux dernières évaluant l'isolement et le confinement d'une personne à son domicile. Il existe six groupes iso-ressources ou GIR (calculés par un algorithme complexe imposant l'informatique).

Le GIR 1 comprend des personnes confinées au lit ou au fauteuil, ayant perdu leur activité mentale, corporelle, locomotrice et sociale, qui nécessitent une présence indispensable et continue d'intervenants.

Le GIR 2 est composé essentiellement de deux sous-groupes :

- d'une part, les personnes qui sont confinées au lit ou au fauteuil tout en gardant des fonctions mentales non totalement altérées (les "grabataires lucides") et qui nécessitent une

- prise en charge pour la plupart des activités de la vie courante, une surveillance permanente et des actions d'aides répétitives de jour comme de nuit ;
- d'autre part, les personnes dont les fonctions mentales sont altérées mais qui ont conservé leurs capacités locomotrices (les "déments perturbateurs") ainsi que certaines activités corporelles que, souvent, elles n'effectuent que stimulées. La conservation des activités locomotrices induit une surveillance permanente, des interventions liées aux troubles du comportement et des aides ponctuelles mais fréquentes pour les activités corporelles.

Le GIR 3 regroupe surtout des personnes ayant conservé des fonctions mentales satisfaisantes et des fonctions locomotrices partielles, mais qui nécessitent quotidiennement et plusieurs fois par jour des aides pour les activités corporelles. Elles n'assurent pas majoritairement leur hygiène de l'élimination tant fécale qu'urinaire.

Le GIR 4 comprend deux sous-groupes essentiels :

- d'une part, des personnes n'assurant pas seules leurs transferts mais qui, une fois levées, peuvent se déplacer à l'intérieur du logement, et qui doivent être aidées ou stimulées pour la toilette et l'habillage, la plupart s'alimentent seules.
- d'autre part, des personnes qui n'ont pas de problèmes locomoteurs mais qu'il faut aider pour les activités corporelles, y compris les repas.

Dans ces deux sous-groupes, il n'existe pas de personnes n'assurant pas leur hygiène de l'élimination, mais des aides partielles et ponctuelles peuvent être nécessaires (au lever, aux repas, au coucher et ponctuellement sur demande de leur part).

Le GIR 5 est composé de personnes assurant seules les transferts et le déplacement à l'intérieur du logement, qui s'alimentent et s'habillent seules. Elles peuvent nécessiter une aide ponctuelle pour la toilette et les activités domestiques.

Le GIR 6 regroupe les personnes indépendantes pour tous les actes discriminants de la vie courante.

B

Méthode alternative de projection des trajectoires des personnes dans un repère unique

B.1 Présentation de la méthode de projection en deux dimensions

Nous avons vu dans le chapitre 3 que les positions des personnes détectées par les caméras Kinect sont projetées dans un repère national (Lambert zone II, EPSG :27572). Cette projection a été présentée en utilisant l'outil *tf* de ROS. Cependant, cette méthode suppose que les coordonnées fournies par le logiciel OpenNI à partir des images de profondeur des Kinects soient fiables et correctement calibrées. Afin de nous passer de cet a priori, une autre méthode de calibration a été proposée et présentée lors de la conférence internationale IEEE EMBC 2015 [Sevrin et al., 2015b].

Cette méthode réduit tout d'abord la position en trois dimensions à seulement deux dimensions. En effet, le centre de gravité mesuré est basé sur la partie visible d'un corps. Ainsi, lorsqu'une personne est masquée partiellement par une table par exemple, la composante verticale est peu pertinente. L'axe vertical des caméras de profondeur Kinect (axe *y* sur la figure 3.1) peut donc être négligé.

Pour chacun des repères des caméras, les coordonnées en deux dimensions des personnes détectées doivent être transformées en leurs équivalents dans le repère national. Une interpolation linéaire, à la fois simple et efficace, est utilisée ici. La position, l'orientation et l'inclinaison de la Kinect ne sont pas nécessaires, ce qui est un avantage puisque ces données peuvent être complexes à mesurer précisément.

En considérant la position en deux dimensions (x_{cam}, z_{cam}) d'une personne, du point de vue de la caméra, et $(x_{lambert}, y_{lambert})$ son équivalent dans le repère national Lambert zone II, les équations de transposition sont les suivantes :

$$x_{lambert} = \alpha_1 x_{cam} + \alpha_2 z_{cam} + \alpha_3$$

$$y_{lambert} = \beta_1 x_{cam} + \beta_2 z_{cam} + \beta_3$$

Il faut alors retrouver les six coefficients ci-dessus, ce qui implique que six équations indépendantes sont nécessaires. Or, connaître une position dans les deux repères nous donne deux équations. Au final, en connaissant les coordonnées de trois positions indépendantes dans le repère de la caméra

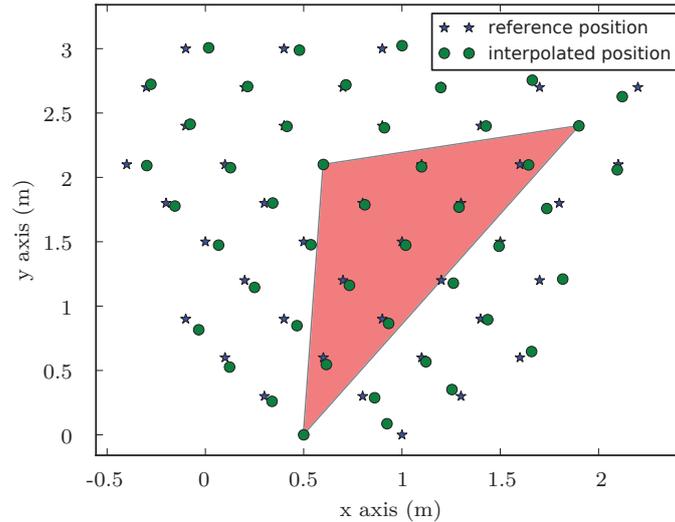


FIGURE B.1 – Quadrillage de référence et positions interpolées à partir des données des caméras de profondeur et des trois points formant le triangle

et dans le repère national, nous pouvons retrouver les six coefficients recherchés. Ces trois positions sont appelées *points de calibration*. Elles sont initialement localisées dans le repère national (via le repère de l'appartement), puis les coordonnées équivalentes dans le repère des caméras sont mesurées par OpenNI, ce qui permet d'obtenir les coefficients.

B.2 Choix des points de calibration

La sélection des points de calibration est d'une grande importance pour créer la projection depuis les différents repères associés aux caméras de profondeur, vers le repère national. En effet, l'erreur introduite par cette projection dépend en partie du choix de ces points de calibration. Afin de découvrir le meilleur moyen de choisir les trois points de calibration dont nous avons besoin, une comparaison a été opérée. Cette expérience utilise un quadrillage au sol, dans le champ de vision d'une caméra, composé de quarante-sept points positionnés régulièrement, à une distance de un à cinq mètres de la caméra.

Une personne se place debout, sur chacun des points référencés, les uns après les autres. Sa position dans le repère de l'appartement et donc aussi dans le repère national est connue via le quadrillage, tandis que sa position dans le repère de la caméra est mesurée par le logiciel OpenNI. Ainsi, pour chacun des points du quadrillage, la position de la personne est connue dans les deux repères. De cette manière, tout ensemble de trois points peut être utilisé pour obtenir les coefficients permettant de projeter linéairement les positions entre les deux repères. Cette projection est effectuée pour tous les ensembles de trois points possibles. Un des résultats de projection est représenté sur la figure B.1. On y voit les positions de référence représentées par des étoiles et les positions interpolées représentées par des cercles. Ces dernières sont interpolées à partir des images de profondeur et de trois points de calibration, . Les trois points qui ont été utilisés pour faire cette interpolation délimitent un triangle également représenté sur le schéma. Nous pouvons remarquer que pour les points servant à calibrer les coordonnées, la position de référence est logiquement égale à la position interpolée.

Considérons alors la distance entre le point de référence et sa version interpolée. L'erreur moyenne pour tous les points autres que ceux servant à la calibration est calculée. Selon les trois points choisis pour effectuer l'interpolation linéaire, l'erreur moyenne peut être inférieure au demi-mètre, mais elle peut également dépasser les trois mètres. C'est pourquoi nous avons besoin d'un indicateur pour sélectionner les meilleurs points de calibration, sans pour autant avoir besoin de mettre en place ce type de quadrillage à chaque fois.

Pour chaque ensemble de trois points de calibration, l'erreur moyenne est comparée à l'aire du

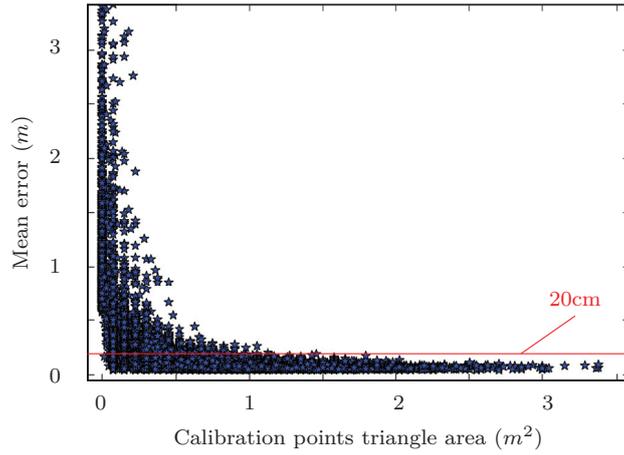


FIGURE B.2 – Plus l’aire formée par les points de calibration est grande, plus le majorant de l’erreur moyenne est faible

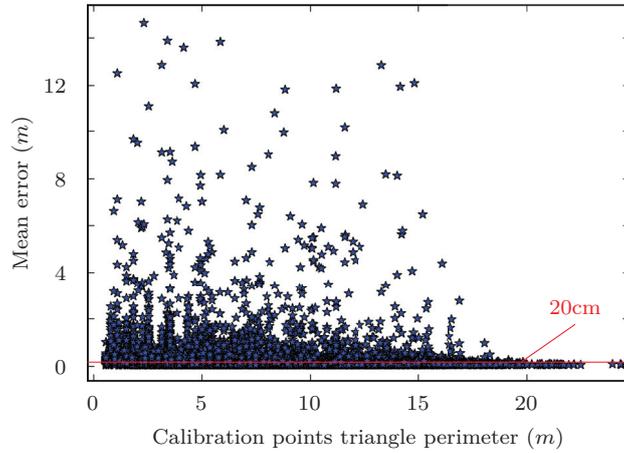


FIGURE B.3 – Le périmètre du triangle formé par les trois points ne permet pas de filtrer efficacement les faibles erreurs moyennes

triangle créée par les trois points (Figure B.1). Le résultat est présenté sur la figure B.2. L’influence de l’aire du triangle est limpide. Plus cette aire est grande, plus le majorant de l’erreur moyenne diminue. Ce résultat démontre que nous pouvons réduire l’erreur introduite par les points de calibration en maximisant l’aire du triangle formé par les trois points.

La même analyse a été faite entre l’erreur moyenne et les périmètres des triangles formés par les points de calibration. Le résultat est présenté sur la figure B.3. Le lien entre le périmètre et l’erreur moyenne n’est pas clairement visible, contrairement au résultat basé sur l’aire. Ceci met en évidence la pertinence de l’aire formée par les points de calibration pour sélectionner les meilleures options pour limiter l’erreur introduite par l’interpolation linéaire. Ce lien apparaît comme logique puisque des points presque alignés introduiraient une erreur importante dans la directions orthogonale, et que plus les points sont éloignés, plus le biais de mesure est réduit. Il faut donc espacer les points en les alignant le moins possible, ce qui correspond peu ou prou à maximiser l’aire.



Communications publiées durant cette thèse

C.1 Revue internationale

- Loïc Sevrin, Norbert Noury, Nacer Abouchi, Fabrice Jumel, Bertrand Massot, Jacques Saraydaryan
Preliminary results on algorithms for multi-kinect trajectory fusion in a living lab
IRBM, Volume 36, Issue 6, November 2015, Pages 361-366

C.2 Conférences internationales

- Detection of collaborative activity with Kinect depth cameras (accepted for oral presentation)
Loïc Sevrin, Norbert Noury, Nacer Abouchi, Fabrice Jumel, Bertrand Massot, Jacques Saraydaryan
IEEE EMBC 2016, 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society
- A bio-inspired living lab as a robot exoskeleton
Loïc Sevrin, Norbert Noury, Nacer Abouchi, Fabrice Jumel, Bertrand Massot, Jacques Saraydaryan
IEEE HealthCom 2015, 17th International Conference on E-health Networking, Application & Services, Pages 552 - 556
- From health smart homes to Living Labs for Health
Norbert Noury, Loïc Sevrin, Bertrand Massot
IEEE HealthCom 2015, 17th International Conference on E-health Networking, Application & Services, Pages 164 - 169
- Characterization of a multi-user indoor positioning system based on low cost depth vision (Kinect) for monitoring human activity in a smart home
Loïc Sevrin, Norbert Noury, Nacer Abouchi, Fabrice Jumel, Bertrand Massot, Jacques Saraydaryan
IEEE EMBC 2015, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Pages 5003 - 5007

C.3 Conférence nationale

- Location Tracking System in a Living Lab using Multi-Kinect Location Data Fusion
Loïc Sevrin, Norbert Noury, Nacer Abouchi, Fabrice Jumel, Bertrand Massot, Jacques Saraydaryan
Colloque biennal “Recherche en Imagerie et Technologies pour la Santé (RITS)”, 2015

C.4 Autres communications nationales ou locales

- Participation à *Ma thèse en 180 secondes*, concours de vulgarisation scientifique, lors de la finale Lyon - Saint-Étienne 2015 (vidéo : <http://loic.sevrin.me/mt180>)
- Démonstration du fonctionnement living lab lors du *Colloque Jacques Cartier 2015* (30 Nov-1 dec 2015)
- Présentation du living lab et des travaux du laboratoire autour de la santé à domicile lors de la *Fête de la Science 2015* (7-10 Octobre 2015)
- Organisation de la *Journée des doctorants INL 2015* et présentation orale.



ELSEVIER
MASSON



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com

IRBM

IRBM 36 (2015) 361–366

RITS 2015

Preliminary results on algorithms for multi-kinect trajectory fusion in a living lab

L. Sevrin^{a,*}, N. Noury^a, N. Abouchi^a, F. Jumel^b, B. Massot^a, J. Saraydaryan^b

^a Université de Lyon, INL, France

^b Université de Lyon, CITI, France

Received 16 January 2015; received in revised form 9 October 2015; accepted 12 October 2015

Available online 2 November 2015

Abstract

Everyday activity of an individual is related to his health status. In order to improve daily health monitoring at home, an indoor position tracking system has been designed. The latter is based on a network of depth cameras to detect and track people's position. The trajectories obtained from each camera are merged to reconstruct each individual's own entire trajectory within the apartment, from which home activities can be derived. In this way, the early detection of a change in daily activities of the elderly will highlight disabilities and loss of autonomy. Standard modules and software were implemented in the system architecture to integrate sensors and systems seamlessly to provide high flexibility and integration capacity for future developments. This system is meant to improve homecare health management for a better end of life at an affordable price for the community.

© 2015 AGBM. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Keywords: Biomedical sensors; E-health; Depth Image Processing

1. Introduction

With aging, a subject is likely to suffer multiple chronic diseases and reduction in physical activity. The combination of these two effects induces a reduction in daily activities, progressive loss in autonomy and eventually inability for an independent living if appropriate adaptations are not foreseen. A strong relationship between health status, activity and autonomy was showed [1]. Furthermore, the autonomy of the elderly subject relies on his ability to perform the basic actions involved in his daily living. Thus there is a real interest in monitoring his daily activity together with the main physiological parameters (i.e. cardiac frequency, blood pressure, weight, etc.) directly at home.

Since activities are tied with places (one takes a shower in the bathroom), the first step of activity analysis is to locate the inhabitants at home. This paper proposes a proof of concept of a multi-user indoor location tracking system based on depth cameras. The early steps of the design and preliminary validation processes are described and discussed in order to address the future evolution of the system.

1.1. Problem constraints

Localization of humans indoor is mainly referred to in terms of space classification (each room is a class) and interactions (with equipment or person). Therefore we need a minimum resolution corresponding to the "sphere of interaction" of the human with a minimum reach of half a meter. It is consistent with the personal space corresponding to the area where humans interact with one another [2]. Furthermore, since several people can be simultaneously present within the area of a flat, the localization system must be able to differentiate the presence of several users in order to track their individual activities,

* Corresponding author.

E-mail addresses: loic.sevrin@univ-lyon1.fr (L. Sevrin), norbert.noury@insa-lyon.fr (N. Noury), abouchi@cpe.fr (N. Abouchi), fabrice.jumel@cpe.fr (F. Jumel), bertrand.massot@insa-lyon.fr (B. Massot), jacques.saraydaryan@cpe.fr (J. Saraydaryan).

Table 1
Design constraints summary.

technical constraints	spatial resolution of half a meter localize several people simultaneously
ergonomic constraints	low invasive low intrusive deployment in existing flat
economic constraints	lower cost than a nursing home

whether collaborative or independent. We arbitrarily fixed this number to 5 simultaneous subjects within a reachable area, in order to cope with most of the scenarios of daily interactions, from simple presence of a nurse to presence of some visiting relatives. A multi-user tracking system was proposed by Wilson [3], based on several ubiquitous sensors distributed around the house. It reached low resolution and high intrusivity. In this paper we propose a system based on a reduced number of sensors, though exhibiting a resolution better than half a meter which is compatible with the detection of social interactions. In addition, the system must remain low intrusive and low invasive in order to reduce the impact on the daily activities of the subjects. Additionally, the system cost must remain limited in order to be applicable to the largest population as possible. Still, the system we propose is merely a proof of concept (Technology Readiness Level 3–4), not yet fulfilling this last limitation, but once produced at large scale, it is expected to be less expensive than renting a room in a nursing home.

1.2. Comparison of existing indoor positioning systems

Following these first guidelines, we established the basic specifications of our indoor tracking system (Table 1), then we performed a survey of current location tracking technologies. In a precedent survey of active and passive indoor localization systems, Deak [4] proposed a classification of technologies in two main branches: systems including an embedded wearable part on the subject and systems without. This has a major impact on the acceptability.

As an embedded solution, Ubisense [5] proposed a wearable tag using ultra-wideband (UWB), time difference of arrival (TDOA) and angle of arrival (AOA) localization algorithms. The Ekahau real-time location system (RTLS) [6] use radio frequency (RF) communications in the 2.4 GHz band and a simple evaluation of distance from the received signal strength indicator (RSSI). The Active Bats [7] uses ultrasound waves

Table 2
Comparison of indoor positioning systems adapted from [4].

Positioning technologies	Resolution	Cost	Multi-person localization	Invasive	Intrusive	Deployment in existing home
Actimetric floor [9]	40 cm	Medium	Yes	No	No	No
Passive infrared [10]	50 cm	Low	Yes	No	No	Yes
Stereo cameras [11]	10 cm	Medium	Yes	No	Low	Yes
Depth cameras [12]	10 cm	Low	Yes	No	Low	Yes
Ubisense [5]	30 cm	Medium	Yes	Yes	Low	Yes
Ekahau RTLS [6]	2 m	Medium	No	Yes	Low	Yes
Active Bats [7]	9 cm	Medium	Yes	Yes	Low	Yes

time of flight. The SpotON [8] uses RSSI of radio-frequency identification (RFID) active tags. These solutions are compliant with most our specifications. They also bring the possibility for multiple users separation and identification. But the embedded device must remain always active and thus powered on, which implies the use of a battery with a limited lifetime. In addition, these embedded systems are unable to locate visitors who do not wear the embedded device, which is quite limiting in our case. Moreover, all these embedded solutions are invasive.

Among the systems without any embedded part, a detection floor composed of many capacitive tiles [9] offers a good resolution, but is costly and complex to install in a pre-existing apartment. Passive Infrared sensors (PIR) were widely used in smart homes [10], in particular to study circadian cycles [13]. These PIR sensors are affordable and perform well when tracking a single user but not when several users are close to each other. Computer vision based on stereo color cameras [11] can produce a depth image of the room and localize people. Unfortunately, the depth image resolution does not allow to differentiate two people close to each other, especially in low light. In a similar approach, Weerasinghe et al. [12] used a smart advanced device, the Kinect [14], to track construction workers. The Kinect is mainly composed of a color camera, a depth camera, and several microphones. The Kinect depth camera reaches the needed resolution and can separate up to six people close to each other. Additionally, a positioning system based on Kinect depth cameras is non invasive, low intrusive (it is already accepted), and can be installed in a pre-existing apartment with the provision of accessible electrical power plugs. The choice of the Kinect is a “low cost approach”; i.e. an existing and widely spread technology is reused in a way which was not planned initially (it was designed as a motion sensor for games) providing the support of a large community and limiting the device price. Existing software libraries can also be used to reduce overcosts for developing associated software. For all these reasons, this passive location tracking system based on Kinect depth cameras was chosen for our indoor location tracking system. The positioning systems comparison is summarized in Table 2.

2. Materials and methods

2.1. The sensor

The Kinect is a motion sensor, designed by Microsoft Inc. and released in November 2010 to be used as a remote con-

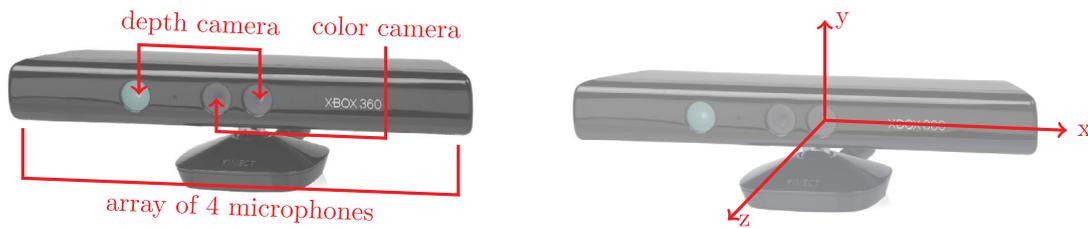


Fig. 1. Kinect sensors and landmark.

trol for the Xbox 360 video game console. It is composed of several sensors (Fig. 1): a color camera (Color CMOS, VNA38209015), a depth camera composed of an infrared (IR) projector (OG12/0956/D306/JG05A) combined to an IR camera (IR CMOS, Microsoft/X853750001/VCA379C7130), and an array of four microphones which is not used in this work. The infrared camera and the color camera have a definition of 640×480 pixels and a frame rate of up to 30 Hz. The angle of view is 60° horizontal and 45° vertical. The device is designed to be used in a range of 0.5 m to 5 m from it.

2.2. System architecture

The whole house is considered as a robot, an exoskeleton for its inhabitants. Following this idea, the Robot Operating System (ROS) [15], widely spread in robotic systems, is used for inter-communication of all sensors and actuators. It will also be able to handle the integration of robots or any other devices for future evolution of the living lab. The huge developers community behind ROS provides plenty of tools like the direct integration of the OpenNI software development kit (SDK) [16]. The latest can localize up to six people in a Kinect field of view using the depth camera, which reduces the development overheads. Each Kinect is connected to a computer, itself connected to the local network. Hence, in this case, ROS runs on several computers at once, all coordinated over the local network by one of them (the master). In order to respect the user's private life, the color camera is not used. Moreover, the localization processing is performed locally and no image from a camera, even a depth image, is stored or sent out of the system.

In order to recognize the elements or the people close to a person being tracked, a map of the rooms which contains every useful data (position of the fridge, the bed, the shower, etc.) is used. This map was created at the right scale and the right place on a map of the world using the Lambert Zone II (EPSG:27572) [17] projection. It is both precise enough and practical since it can be used everywhere in France (the Living Lab being located in Lyon). Every equipment, wall, doors... present on the map have their coordinates stored in a PostGIS database [18] which can store geographic objects. Additionally, the use of a standard projection enables the interoperability with outdoor positioning systems such as the GPS when the subject is leaving the apartment.

2.3. Positioning in a unified landmark

The OpenNI software processes the images taken by the depth camera to localize the people in the camera's field of

view. This 3D localization corresponds to the center of mass of each visible person. OpenNI outputs a tri-dimensional coordinate, in meters, relatively to the Kinect. The three axes corresponding to the three dimensions are represented on Fig. 1.

Since several depth cameras are used to cover the area of an apartment, the trajectories of the same person seen by several depth cameras must be merged. In order to be able to compare trajectories coming from several Kinects, a projection on a unified landmark is needed. As explained above, a reference landmark has already been used to create a map of the rooms and equipments and to store it in the database. Hence, this landmark can logically be used for the projection of the trajectories from the depth cameras landmarks to the Lambert zone II (EPSG:27572) landmark.

When OpenNI processes the depth images, the position of a body's center of mass is based on what can be seen from the depth camera, which means that a person partially hidden behind a piece of furniture can have his center of mass badly positioned along the vertical (y) axis. For this reason, the 3D positioning has been downgraded to a 2D positioning and the y axis has been neglected to remove measurement errors while staying compliant with the previously defined specifications.

Considering one of the depth cameras landmarks, a two axes coordinates must be converted in another two axes coordinates. A linear interpolation between these coordinates, both simple and efficient enough for the system specifications, is used. The position, orientation, and tilt of the Kinect are not needed, which is a great advantage as these measures are not easily accessible. However, those Kinect positioning data influence the linear interpolation coefficients and can be retrieved from these coefficients.

2.4. Merging trajectories

Each Kinect having a limited field of view, several of them are needed to cover the area of an apartment, or even of one single room. Hence, the system must pair the trajectories seen by two different Kinects but referring to the same person. The projection introduced above was created for this objective. An example of a person trace is shown in Fig. 2. In the pictured room, the two Kinects, K1 and K2, are represented as diamonds. The field of view cones are represented in transparent green and red. Someone enters the field of view of the first Kinect from the left and walks through the room. He is firstly visible by K1 only, then by K1 and K2, finally by K2 only. The successive positions of this person in the unified landmark are represented in bright green and dark red for the depth cameras K1 and K2 respec-

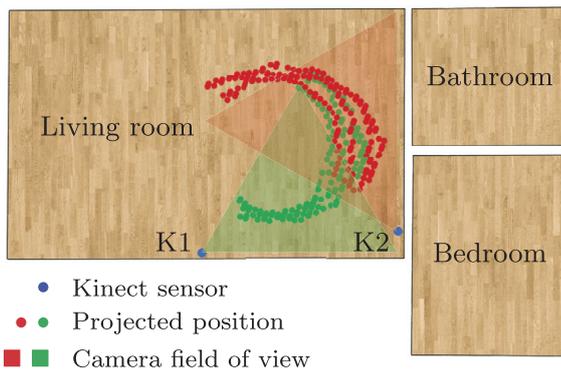


Fig. 2. Projected trajectories from two Kinects, K1 (bright green trace) and K2 (dark red trace) in the living lab. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

tively. Thanks to the projections on a unified landmark, a clear link between the two trajectories can be established (Fig. 2).

The next step is to merge those two trajectories. The two previous trajectories must be automatically paired in order to merge them and recover the full trajectory of the studied subject. To pair trajectories, the room area common to both Kinects fields of view was used. In this area, the positions measured by the two Kinects were compared. If the correlation between the two trajectories is high enough, the two trajectories may be merged.

A distance between the trajectories seen by several depth cameras must be measured. Several techniques such as the Euclidean distance or the Dynamic Time Warping (DTW) [19] exist, but they compare trajectories without taking the time into account in their algorithm. In our case, the time is very important since two people following each other would produce the same trajectory with only a time offset. Also the people positioning library has a variable sampling rate and the sampling instant are not synchronized between the depth cameras. Hence, those methods would need time interpolation to avoid the variable sampling rate problem and simply compare trajectories. To reduce the computation time, a method using both the sampling time and the distance between positions is proposed. This method is later referenced as “Dynamic Spatiotemporal Correlation” (DSC) and produces a weighted distance D^W . The weighted distance D_i^W between two positions of the trajectory is the product of a quality factor $Q_i \in [0, 1]$ where 1 is the higher quality and a length factor $L_i \in [-1, +\infty]$. The two positions are not sampled at the exact same time. Hence the quality factor considers the time delay between the two measures: $Q_i = \max(0, 1 - 2\Delta t^2)$ where Δt is in seconds. The length factor L_i is defined as: $L_i = d_{\text{between points}} - 1$ where the distance is in meters. Eventually, the dynamic spatiotemporal correlation between the two trajectories is the sum of the weighted distances. $D^W = \sum_i 1 + D_i^W = \sum_i 1 + L_i \times Q_i$. The D_i^W are incremented by one in order to make D^W positive and easier to compare with other distance measurement methods.

To understand the behavior of the Dynamic Spatiotemporal Correlation, three cases shall be considered. First case: if two positions are close in time and in space, then Q_i is close to 1 and L_i is close to -1 . Hence D_i^W is close to -1 , the weighted

Table 3
Trajectories.

Trajectory	Kinect	Person
T1A	1	A (real, no time offset)
T1B	1	B (simulated, variable offset)
T2A	2	A (real, no time offset)
T2B	2	B (simulated, variable offset)

distance is lowered. Second case: if the positions are close in time but not in space, then Q_i is close to 1 and $L_i \gg 0$. Hence $D_i^W \gg 0$, the weighted distance increases. Third case: if the positions are distant in time, then $Q_i = 0$. Hence $D_i^W = 0$, no impact on the weighted distance.

As in the other distance computation methods, the closer the positions, the lower the weighted distance. The quality factor makes sure that only the positions measured almost at the same time are compared, with a higher weight when they are closer in time. If this weighted distance reaches a threshold (set empirically from our experimental data), then the corresponding trajectories cannot be merged. Otherwise, the lowest weighted distance is selected for merging trajectories.

The importance of the time synchronization can be seen in the calculation of the quality factors Q_i and in the ability to separate the trajectories of two people following each other. In order to have only one clock as a reference, the sampling time stored in the database is the time of the reception of the positioning messages in the central computer running the ROS core. This way, only one clock is used, avoiding further synchronization issues.

3. Experimentation and validation

The system must be able to separate several people. A first approach to validate this capacity uses a recorded trajectory of one person (A) and a simulation of a second one (B) following him. This simulation is done by inserting a time delay in the same recorded trajectory. This way, the two people are following exactly the same path (worst case scenario), and the time delay between the two can be easily modulated.

One simple scenario, similar to the one used in Section 2.4, is performed along three different paths, repeated four times each. In this scenario, a person enters the field of view of a first Kinect, then goes through the field of view of two Kinects, continues in the field of view of the second Kinect alone, and finally, leaves the coverage of the two depth cameras. For both depth cameras, the real trajectory is recorded, and the delayed one is simulated. Hence, we have four trajectories, T1A, T1B, T2A, T2B described in Table 3. The expected result is the association of T1A with T2A and T1B with T2B.

The distance between T1A and T2A is compared to the distance between T1A with T2B for different time offset values. Three distance computation techniques were compared: the one described above, able to handle variable sampling rate, the Euclidean distance and the Dynamic Time Warping (DTW) [19]. These last two need the interpolation of the trajectory to have the same sampling times for the positions of the two people following each other. This introduces an extra computation step

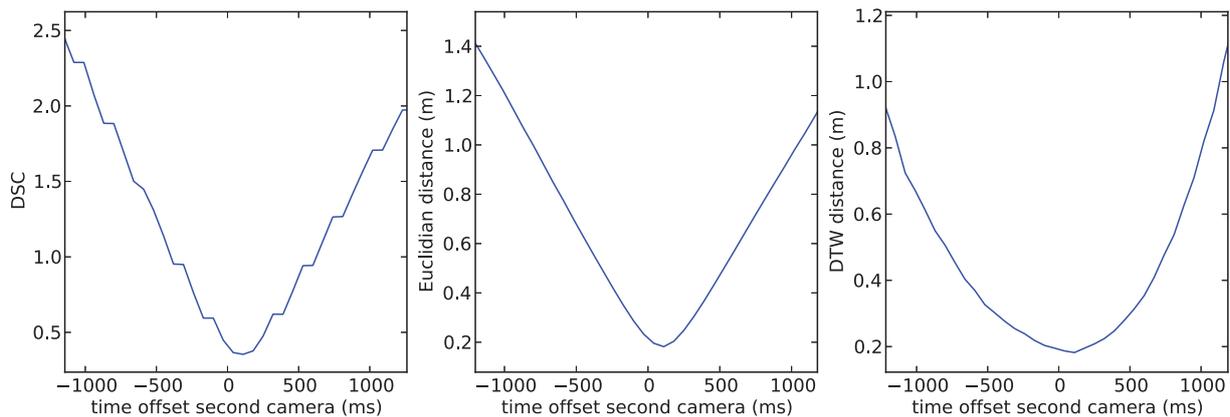


Fig. 3. Comparison of distance measurement methods showing similar results.

and possibly extra errors since the processed points are not real measurements. Every iteration of the experiment gave very similar results comparing the distance computation techniques. One of these comparison is shown in Fig. 3.

The three figures show the distance between T1A and T2B for several offset values. It is equivalent to the distance between T2A and T1B with opposite offsets, which means the figures would be horizontally flipped. When the offset is null, T2B is equal to T2A. This comparison shows that the three distance computation techniques give a similar result. The bigger the time offset (the distance between the people following each other) offset, the bigger the distance between the trajectories. The absolute value of the distances have no interest here. In order to be able to separate two people, the relevant parameter is the variation. Depending on the offset, the number of positions which can be used to compare the trajectories can vary. Hence, the distances measurement were normalized to their mean values.

Two people who follow each other closely (1 m distance) will be separated by a minimum delay of one second at normal walking speed (3.6 km/h). The T1A trajectory is much closer to T2A (null offset on Fig. 3) than to T2B when a time offset of ± 1 s is applied. Hence, the T1A and T2A trajectories are merged as expected. Considering this reference offset of one second, any of the three distance computation technique is able to separate the two users with similar performance. Hence, the first technique, which does not need sampling interpolation is the best possible choice.

4. Discussion and conclusion

In order to create an indoor location tracking systems, several existing technologies were compared. The Kinect depth cameras provide good enough precision, are non invasive and low intrusive and the positioning of people in the camera field of view is available. An early validation of the capacity to merge trajectories was made on basic examples. Three techniques were compared and gave similar results. Hence, the simplest one, which does not need samples interpolation was chosen.

The scenarios used for the experiment are still too basic for a full validation of the system, but they do not refute the capacity

of the system to match the specifications, which is very encouraging. Further experiments, involving several people, and more ecologically realistic scenarios will be performed as soon as our living lab is fully operational (it is currently an empty apartment). Future scenarios will include people passing each other, and a full day (24 h) shrunk into twenty-four minutes. The latest could be similar to the following: a person living alone sleeps at night, then do toileting and have breakfast. She goes to the supermarket and comes back with a friend (multi-user scenario). They have lunch together and spend the afternoon playing cards and chatting. Later the invited person leaves and the other one has diner, some reading and goes to sleep. This scenario can be easily acted many times since it is short to execute, it is more complex than the current ones and will be a realistic test to validate the tracking system and see its limits.

The use of ROS provides high flexibility to make the system evolve, integrate new equipment, and benefit from new software development by the developers community. This concept derives from the initial purpose of ROS which was to manage robots. It is also consistent with the “low cost” approach of reusing a widely sold and hence cheap Kinect in a way which was not planned initially.

The next step will be to complete this location process with the identification process of the people living in the apartment, leading to a personalized daily activity tracking system. Finally, this system will enable a better understanding of people’s life cycles, like circadian ones, of people’s needs, and provide a simple and relevant health monitoring at home.

References

- [1] Noury N. Ambient intelligence might support increased longevity. In: *Engineering in medicine and biology society (EMBC). 36th annual international conference of the IEEE*. 2014. p. 1760–4.
- [2] Kennedy DP, Gläscher J, Tyszkla JM, Adolphs R. Personal space regulation by the human amygdala. *Nat Neurosci* 2009;12(10):1226–7.
- [3] Wilson D, Atkeson C. Simultaneous tracking and activity recognition (star) using many anonymous, binary sensors. In: *Gellersen H-W, Want R, Schmidt A, editors. Pervasive computing. Lecture notes in computer science*, vol. 3468. Berlin, Heidelberg: Springer; 2005. p. 62–79.
- [4] Deak G, Curran K, Condell J. A survey of active and passive indoor localisation systems. *Comput Commun* 2012;35(16):1939–54.

- [5] Steggle P, Gschwind S. The Ubisense smart space platform. 2005.
- [6] Kolodziej KW, Hjelm J. Local positioning systems: LBS applications and services. CRC Press; 2006.
- [7] Want R, Hopper A, Falcao V, Gibbons J. The active badge location system. *ACM Trans Inf Syst* 1992;10(1):91–102.
- [8] Hightower J, Want R, Borriello G. Spoton: an indoor 3d location sensing technology based on rf signal strength. UW CSE 00-02-02. University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA 1.
- [9] Valtonen M, Maentausta J, Vanhala J. Tiletrack: capacitive human tracking using floor tiles. In: *IEEE international conference on pervasive computing and communications*. IEEE; 2009. p. 1–10.
- [10] Kemper J, Hauschildt D. Passive infrared localization with a probability hypothesis density filter. In: *7th workshop on positioning navigation and communication (WPNC)*. 2010. p. 68–76.
- [11] Krumm J, Harris S, Meyers B, Brumitt B, Hale M, Shafer S. *Multi-camera multi-person tracking for easy living*. In: *Third IEEE international workshop on visual surveillance*, 2000. *Proceedings. IEEE*; 2000. p. 3–10.
- [12] Weerasinghe IT, Ruwanpura JY, Boyd JE, Habib AF. Application of microsoft kinect sensor for tracking construction workers. In: *Construction research congress 2012*. 2012. p. 858–67.
- [13] Noury N, Herve T, Rialle V, Virone G, Mercier E, Morey G, et al. Monitoring behavior in home using a smart fall sensor and position sensors. In: *1st annual international conference on microtechnologies in medicine and biology*. 2000. p. 607–10.
- [14] iFixIt. ifixit website presenting a teardown of the kinect device. April 2015. <https://www.ifixit.com/Teardown/Microsoft+Kinect+Teardown/4066>.
- [15] ROS. Ros official website. January 2015. <https://ros.org>.
- [16] Simple-OpenNI. Simple-openni website. build of openni and nite are available in the download section. April 2015. <https://code.google.com/p/simple-openni/>.
- [17] EPSG.io. Epsg.io website referencing most coordinate systems. April 2015. <http://epsg.io/27572>.
- [18] PostGIS. Postgis official website. January 2015. <http://postgis.net/>.
- [19] Chen L, Özsu MT, Oria V. Robust and fast similarity search for moving object trajectories. In: *Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD international conference on management of data*. ACM; 2005. p. 491–502.

A bio-inspired Living Lab as a robot exoskeleton

Loïc Sevrin, Norbert Noury, Nacer Abouchi, Fabrice Jumel, Bertrand Massot, and Jacques Saraydaryan
 Université de Lyon, Lab. INL & CITI, France
 Email: loic.sevrin@univ-lyon1.fr

Abstract—We propose a “bio-inspired” architecture of a living lab based on a robot operating system, in order to facilitate maintaining senior people autonomy at home. A highly personalized approach is possible in the personal home environment, which should adapt to its inhabitants along their life, providing a personalized robotic physical assistance together with a cognitive and mnesic support. The described architecture is completely modular, providing the opportunity to include more features, sensors and actuators in the living lab in the future. An example of indoor localization using depth cameras is described. It illustrates both the ability to use existing sensors with high interoperability and how the system can be extended. A scenario of activity treated by the system is also discussed.

I. INTRODUCTION

The life span of world’s populations is increasing, but also the cases of multi-chronic pathologies. Thus, the growing population of seniors is likely to suffer a reduction in daily activity, a progressive loss in autonomy and eventually an inability for an independent living, if appropriate adaptations are not foreseen. The systematic placement of the dependent elderly in an institution is not an optimal solution neither in human terms, nor on the economical plan, and it has side effects on the early loss of autonomy. A more personalized approach is possible in the personal home environment, which should adapt to its inhabitants along their life, providing them with a personalized robotic physical assistance together with a cognitive and mnesic support. It should reduce the difficulties encountered by the subject in his own environment, in order to reduce the handicap and to extend autonomy.

But this backing should be little intrusive in order not to disturb the personal balance of the subject and to adapt seamlessly to his natural homeostasis. In one word, it must be *bio inspired*, hence naturally understood. The home can therefore be seen as an *exoskeleton* replicating the human nervous system functions (Fig. 1). The later system has “afferent pathways” with the sensory division, prepared to sense the parameters of environment and of body conditions. The various inputs from stimulated receptors are transferred to the central nervous system but also can locally perform data fusion into the autonomous nervous system to produce reflex reactions. And eventually it has “efferent pathways” with the motor division to react on the body systems in order to maintain its global homeostasis.

This *adapted home* would act as a robot able to monitor the health status and activities of its inhabitants using its sensors. Like a human being, this robot would interpret the measures coming from its sensors and decide how to interact with its inhabitants. This robot should be flexible enough to handle

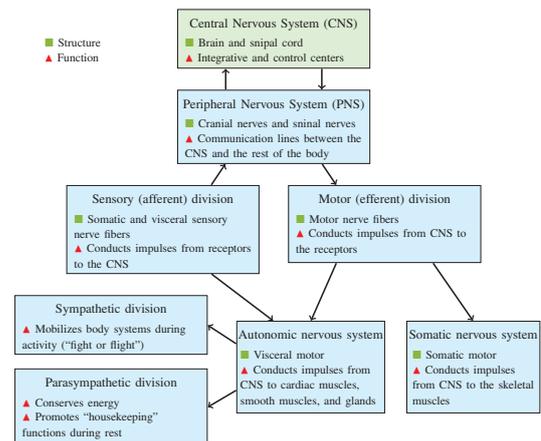


Fig. 1. Organisation of the Human Nervous system

heterogeneous sensors and actuators, to adapt to its inhabitants along their life and to have a modular architecture to ensure sustainability as the technology evolves. It should enable quick further development through a set of available tools.

In the domain of communications within smart homes, the standard protocol KNX is the main reference. It is compatible with thousands of home automation devices from LED lightings to presence sensors [1] produced by industry leaders. The main drawback of the KNX bus is that it was not designed to use robots, avoiding the use of such actuators in the bio-inspired home. To fill the gap, other smart homes were designed using the Robot Operating System (ROS) [2]. The MPIGate Middleware [3] is based on ROS and creates a bridge between many kinds of communication protocol such as Bluetooth or ZigBee and ROS. This kind of system based on ROS can even integrate KNX devices the same way. The ROS project is open source and benefits a huge community of developers behind it, providing many tools such as 3D real time representation of an environment including robots [4]. The drawback of a system based on ROS compared to one using the KNX protocol is the presence of a bigger overhead as ROS is IP-based [5]. However, this overhead is not problematic for the bio-inspired living-lab since a high bandwidth is available in a home local IP network and since a few milliseconds extra delay can be neglected when analyzing human activity. Non-standard platforms managing Ambient Intelligence (AmI) such as SYLPH [6] give similar features,

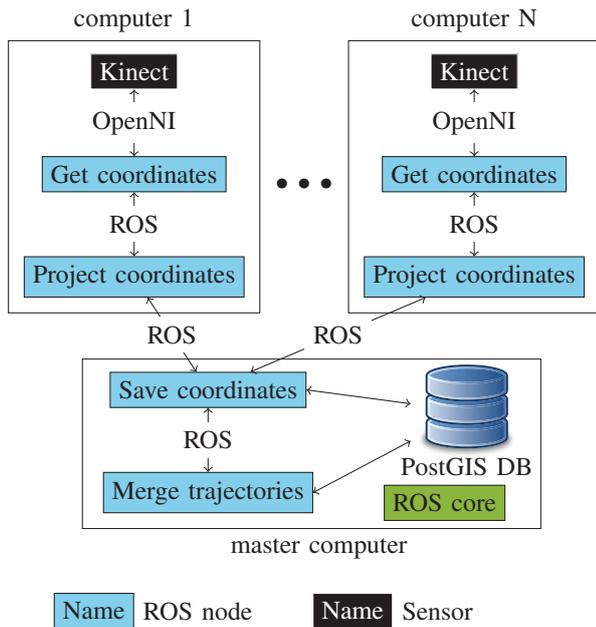


Fig. 2. Architecture scheme

but lack a developers community.

This paper validates the possibility of an AmI system based on ROS, which considers the apartment as one robot, an exoskeleton for its inhabitants. In this apartment, a location tracking system was set up. It is based on several Kinects depth cameras, reused in a way which was not planned initially (they were designed as a motion sensor for games) providing the support of a large developers community and thus reducing the development costs.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Architecture of the ROS Network

A ROS network [2] can combine several computers, running the Ubuntu operating system [7] and connected through an IP network. This network is managed by the ROS core running on one of them (Fig. 2). In the ROS network, nodes are executable software which communicate messages to each other and can read data from a sensor or control an actuator.

ROS defines a communication protocol which is used by every node of the robot (the apartment) to send and receive information. This protocol mainly uses a broadcast approach. In the latest, topics are channels where any node can publish messages or read the published ones. Those messages contain typed data (integers, etc.) and are available to every other node of the network. Hence, any node can receive every message of a topic as soon as they are sent by the publishers, by subscribing to this topic. This approach brings high interoperability between all ROS nodes since this communication is standard for every ROS node. Also, since the information published can come from any device as long as it is ROS compatible, we can, without additional change, replace a sensor by another able to publish the same information. This way every topic is an

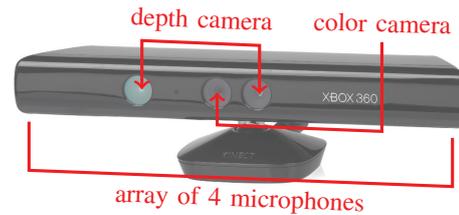


Fig. 3. Kinect sensors

abstraction layer and the system becomes completely modular. Furthermore, as explained in the previous section, the ROS communication protocol is IP-based. Hence, the use of Wi-Fi or Power-line communication (PLC) is natively supported, but devices using non-IP protocol such as Bluetooth or ZigBee can easily be included in the ROS network through bridges as in the MPIGate project [3].

Among the huge amount of sensors compatible with ROS, the Kinect has already been included in several ROS packages. These provide the use of the Kinect sensors and high level features at no development cost and facilitate the setup of a location tracking system based on these depth cameras. The relevance of such a system for indoor location tracking has been discussed in [8].

B. The Sensor

The Kinect is a motion sensor, designed by Microsoft Inc. and released in November 2010 to be used as a remote control for the Xbox 360 video game console. It is composed of several sensors highlighted in Fig. 3: a color camera (Color CMOS, VNA38209015), a depth camera composed of an IR projector (OG12/0956/D306/JG05A) combined to an IR camera (IR CMOS, Microsoft/X853750001/VCA379C7130), and an array of four microphones. The infrared camera and the color camera have a definition of 640×480 pixels. The angle of view is 60° horizontal and 45° vertical. The device is designed to be used in a range of 0.5 m to 5 m from it. Thus a person too close or too far from the Kinect will not be correctly detected.

In 2011, Microsoft released a non-commercial Kinect software development kit (SDK) for Windows 7 and PC drivers for the Kinect. Alternative drivers and SDK were developed by PrimeSense at the same period. They released OpenNI and NITE [9], two middleware allowing to use the Kinect with a PC. However, their set of tools runs on both Windows and GNU/Linux operating systems, is more opened (OpenNI is open source) and works with other devices like the Asus Xtion or the Structure Sensor. These criteria enabled the active development by the community of software providing the use of the Kinects through ROS via OpenNI and NITE. This way, several Kinects were integrated in the apartment like several sensors of this robot. Each Kinect is connected to a computer running a ROS node which publishes the measured data to the ROS network.

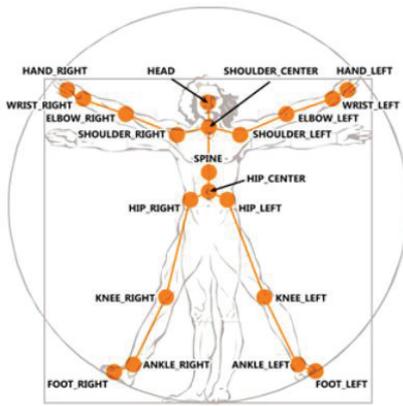


Fig. 4. A Kinect feature: Skeleton Tracking, source: Microsoft

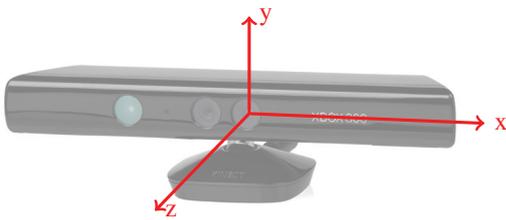


Fig. 5. Kinect sensors

Depth images and color images are available, with many other features like the position of up to six people in the depth camera field of view. People's skeleton can also be obtained as shown in Fig. 4. Additionally, the extracted skeleton is published in the ROS network in the format used for 3D representation in the Rviz ROS tool, which provides the ability to display the skeleton in 3D at no development cost. Unfortunately, this feature requires more processing and is less reactive than the one providing only the position of the users' center of mass.

For the respect of the user's private life, the color camera is not used by the system. Moreover, the processing is done internally by the computers linked to a depth camera and no image from a camera, even a depth image, is sent over the LAN. Only processed information is sent, to reduce the leakage risk introduced by the weakness of the LAN.

C. Positioning in a unified landmark

The software processes the images taken by the depth camera to localize the people in the camera's field of view. This 3D localization corresponds to the center of mass of every visible person. The output is a tri-dimensional coordinate, in meters, relatively to the Kinect. The three axes corresponding to the three dimensions are represented on Fig. 5.

Since several depth cameras are used to cover an apartment, the trajectories of the same person seen by several depth cameras must be compared, then merged. In order to be able to compare trajectories coming from several Kinects, a projection

on a unified landmark is needed. A local landmark, using a corner of the apartment as a reference could be used. But this landmark would not allow any outdoor position tracking. To get this extra feature, a standard landmark is used: the NTF (Paris) / Lambert zone II (EPSG:27572) [10] projection. The latest is both precise enough and practical. It can be used in the whole France (our smart home being located in Lyon) and uses coordinates in meters which eases the distance computations. With this landmark, GPS coordinates sampled while the subject was outside can be easily projected to recover the full trajectory of a person along the day, whether indoor (positioned by the depth cameras) or outdoor (positioned by the GPS).

In order to monitor its inhabitants activity, the home robot must be able to identify these activities by locating the subjects relatively to the rooms and equipment as we sleep on a bed in the bedroom, cook in the kitchen, etc. Hence, a complete map of the apartment locating these rooms and equipment is needed. This map uses the same reference landmark to be able to locate the subjects relatively. It is created using QGIS [11], an open source geographic information system application able to store geometry data in a geographic database such as PostGIS [12]. This database handles geometry data and is able to measure the distances between points, find the reachable area from one point in a specified time and much more. These features can be accessed directly from any ROS node via structured queries to the database, which proves again how easily ROS can be extended.

When the depth images are processed, the position of a body's center of mass is based on what can be seen by the depth camera, which means that a person partially hidden behind a desk can have his center of mass badly positioned along the y axis. For this reason, the 3D positioning has been downgraded to a 2D positioning and the y axis has been currently neglected to remove measurement errors while staying compliant with the previously defined specifications.

Considering one of the depth cameras landmarks, a two axes coordinates must be converted in another two axes coordinates. A linear interpolation, based on the positions of three points in both landmarks, is used [8]. The position, orientation, and tilt of the Kinect are not needed, which is a great advantage as these measures are not easily accessible. However, those Kinect positioning data influence the linear interpolation coefficients and can be retrieved from these coefficients. The subjects coordinates, projected in the unified landmark, are stored in the previously described PostGIS database.

D. Location Tracking System Architecture

The architecture of the location tracking system using Kinect depth cameras is summarized in Fig. 2. All communication links between two nodes (blue rectangles) are operated following the ROS communication protocol. The master computer runs the communication and process manager (ROS core) which coordinates all these communications.

Every Kinect is connected to a computer where a "get coordinates" ROS node uses the OpenNI library to get the

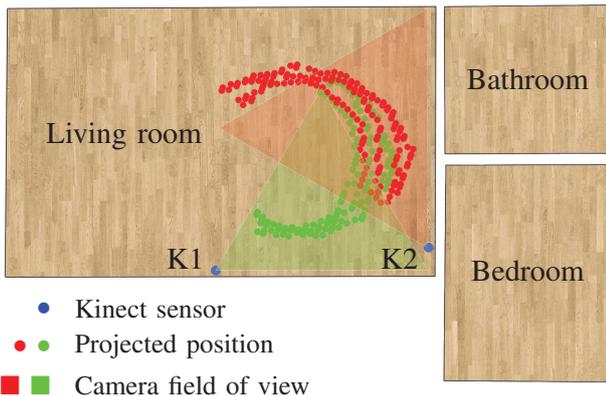


Fig. 6. Projected trajectories from two Kinects, K1 (bright green trace) and K2 (dark red trace) in the living lab

positions of the visible subjects in the Kinect landmark and publishes them on a topic. These positions are then read by the “project coordinates” ROS nodes which project the coordinates in the unified landmark. Then, it publishes the result.

The projected coordinates published by every computer connected to a Kinect are read by the “save coordinates” ROS node running only on the master computer. This node stores the coordinates in the PostGIS database for further processing including trajectory merging, activity recognition, etc.

Finally, the “merge trajectories” ROS node reads the coordinates from the database to be able to merge the trajectories when the correlation between them is high enough [8].

As explained earlier, every communication using the ROS protocol is an abstraction layer as the messages data formatting is standard. This way, if a new node is able to publish the same messages, it can replace the previous one and the node receiving the messages will not see any change as it simply reads every new message on the topic in question. Hence, the system is fully modular. For example, the Kinect could easily be replaced by an actimetric floor or passive infrared sensors as long as the published data remains the same.

III. EXPERIMENTATION AND VALIDATION

The projection of the subjects coordinates on a unified landmark allows an easy comparison of the trajectory of one person seen by several Kinects. The map of the apartment stored in the PostGIS database can be easily rendered by Geoserver [13], an open-source server able to process and edit geospatial data. An example is showed is Fig. 6 where two Kinects, K1 and K2, are in the room. The subject positions they measure are represented in green and red points respectively.

The positions of the tracked subjects are stored in the database for data fusion. Indeed, the trajectories of one person seen by several depth cameras, must be merged to reconstruct the full path. Hence, the sampling time is essential in order to correlate several trajectories, but each camera is link to a different computer which has its own clock. A first approach is to use the time of the insertion in the database as the reference time. This way, only the clock of the computer hosting the

database is used. But in this approach, depending on the load of the local network and of the computer hosting the database, the delay from the sampling time to the insertion in the database can take from a few milliseconds to half a second. This variability could create errors in data fusion if two people follow each other closely [14]. Hence, a second approach was used, syncing every computer’s clock using chrony, an NTPv4 (RFC 5905) [15] server and peer. The delay between two clocks is always under 0.05s in our local network, which is widely sufficient when positioning people at walking speed (0.05s represents about 4cm at 3km/h).

IV. DISCUSSION AND CONCLUSION

The use of the ROS operating system brings many features and tools to the home exoskeleton robot described in this paper, such as a standard communication protocol and 3D visualization which eases the analysis by human of interaction between people and equipment for example. Another feature which could improve the system is the use of the *transform library* (tf) [16]. The latest provide the possibility to transform the coordinates from one landmark to another with no extra developments. Any equipment or person can become the origin of the coordinate system, facilitating the analysis of its area of interaction. The exact 3D position of the depth cameras would then be needed, which is not possible currently (only estimation can be computed) but a different calibration method should enable this positioning.

As specified, the home robot can handle heterogeneous sensors and actuators communicating over various wireless standards such as Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee and more. It has an indoor location tracking system compatible with outdoor positioning systems via a standard landmark.

A possible life scenario managed by the system could be a person entering the kitchen and starting cooking. Using power sensors the system detects that hotplates have been turned on and are still on when the person leaves the kitchen. These stream are the “afferent pathways” described in section I. Then the system detects there could be a problem with potential security risk and asks via a speaker if the person forgot to turn the hotplates off. This reaction corresponds to the “efferent pathway”. An extra “efferent pathway” can even be the shutdown of the hotplates depending on the person answer.

The monitoring of the inhabitants activities will enable health monitoring which helps setting the level of interaction needed between the robot and the subjects along their life. Moreover, the abstraction layers of the ROS topics provide the ability for interoperability: any sensor may be replaced by another one sending the same semantic data and any actuator may be replaced by another actuator offering the same service from the same request; this makes the system fully modular. Eventually, further developments can be performed easily and quickly using available tools and software modules provided by the ROS community. All the requirements defined in the introduction are met. This home robot is now a universal and

open development platform for testing, validation and end-user implementation of ambient intelligence systems.

REFERENCES

- [1] KNX, “Knx certified products,” May 2015. [Online]. Available: <http://www.knx.org/knx-en/knx/knx-products/knx-certified-devices/index.php>
- [2] ROS, “Ros official website,” January 2015. [Online]. Available: <https://ros.org>
- [3] M. Chehaider, K. Roussel, and Y.-Q. Song, “Interopérabilité des réseaux de capteurs hétérogènes dans un appartement intelligent,” in *UbiMob - 9èmes journées francophones Mobilité et Ubiquité - 2013*, Nancy, France, Jun. 2013. [Online]. Available: <https://hal.inria.fr/hal-00877451>
- [4] ROS, “Rviz: 3d visualization tool for ros,” May 2015. [Online]. Available: <http://wiki.ros.org/rviz>
- [5] J. Jaime, C. Urdiales, and F. Sandoval, “Heterogeneous device networking for an ami environment,” 2013.
- [6] J. Corchado, J. Bajo, D. Tapia, and A. Abraham, “Using heterogeneous wireless sensor networks in a telemonitoring system for healthcare,” *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 2, pp. 234–240, March 2010.
- [7] Ubuntu, “Ubuntu official website,” January 2015. [Online]. Available: <http://ubuntu.com/>
- [8] L. Sevrin, N. Noury, N. Abouchi, F. Jumel, B. Massot, and J. Saraydaryan, “Characterization of a multi-user indoor positioning system based on low cost depth vision for monitoring human activity in a smart home,” in *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015, IEEE*, 2015, pp. 5003–5007.
- [9] Simple-OpenNI, “Simple-openni website. build of openni and nite are available in the download section,” April 2015. [Online]. Available: <https://code.google.com/p/simple-openni/>
- [10] EPSG.io, “Epsg.io website referencing most coordinate systems,” April 2015. [Online]. Available: <http://epsg.io/27572>
- [11] QGIS, “Qgis official website,” January 2015. [Online]. Available: <http://qgis.org/>
- [12] PostGIS, “Postgis official website,” January 2015. [Online]. Available: <http://postgis.net/>
- [13] GeoServer, “Geoserver official website,” January 2015. [Online]. Available: <http://geoserver.org/>
- [14] L. Sevrin, N. Noury, N. Abouchi, F. Jumel, B. Massot, and J. Saraydaryan, “Preliminary results on algorithms for multi-kinect trajectory fusion in a living lab,” *IRBM*, submitted.
- [15] D. L. Mills, *Network Time Protocol Version 4, Reference and Implementation Guide*, 2006.
- [16] T. Foote, “tf: The transform library,” in *Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 1–6.

Characterization of a Multi-User Indoor Positioning System Based on Low Cost Depth Vision (Kinect) for Monitoring Human Activity in a Smart Home

Loïc Sevrin, Norbert Noury, Nacer Abouchi, Fabrice Jumel, Bertrand Massot, and Jacques Saraydaryan

Abstract—An increasing number of systems use indoor positioning for many scenarios such as asset tracking, health care, games, manufacturing, logistics, shopping, and security. Many technologies are available and the use of depth cameras is becoming more and more attractive as this kind of device becomes affordable and easy to handle. This paper contributes to the effort of creating an indoor positioning system based on low cost depth cameras (Kinect). A method is proposed to optimize the calibration of the depth cameras, to describe the multi-camera data fusion and to specify a global positioning projection to maintain the compatibility with outdoor positioning systems.

The monitoring of the people trajectories at home is intended for the early detection of a shift in daily activities which highlights disabilities and loss of autonomy. This system is meant to improve homecare health management at home for a better end of life at a sustainable cost for the community.

I. INTRODUCTION

With aging, a subject is likely to suffer multiple chronic diseases and a reduction in physical activity. The combination of these two effects induces a reduction in daily activities, progressive loss in autonomy, and eventually inability for an independent living if appropriate adaptations are not foreseen. A strong relationship between health status, activity, and autonomy was showed [1]. Furthermore, the autonomy of the elderly subject relies on his ability to perform the basic actions involved in his daily living. Thus there is a real interest in tracking his daily activity together with the main physiological parameters (i.e. cardiac frequency, blood pressure, weight, etc.) directly at home to provide an efficient health monitoring [2].

Since most human activities at home are attached to rooms and to interactions with equipments (i.e. to use the shower in the bathroom, to sleep on the bed in the bedroom, etc.), an activity monitoring system must be first able to describe the position of the subjects relatively to rooms and tools.

This work was supported by a special grant from the Institute of Nanotechnologies of Lyon (INL).

L. Sevrin is with the University of Lyon, INL, UCBL loic.sevrin@univ-lyon1.fr.

N. Noury is with the University of Lyon, INL, UCBL norbert.noury@univ-lyon1.fr.

N. Abouchi is with the University of Lyon, INL, CPE Lyon abouchy@cpe.fr.

F. Jumel is with the University of Lyon, CITI, CPE Lyon fabrice.jumel@cpe.fr.

B. Massot is with the University of Lyon, INL, INSA Lyon bertrand.massot@insa-lyon.fr.

J. Saraydaryan is with the University of Lyon, CITI, CPE Lyon jacques.saraydaryan@cpe.fr.

TABLE I
DESIGN CONSTRAINTS SUMMARY

technical constraints	spacial resolution of half a meter localize several people simultaneously
ergonomic constraints	low invasive low intrusive deployment in existing flat
economic constraints	lower cost than a nursing home

After a state of the art of existing indoor positioning system, the designed system based on low cost depth vision will be described, validated over a series of tests and discussed.

A. Problem constraints

As localization is mainly descriptive in terms of space (in which room) and interaction (with which equipment or person), we shall consider that a minimum resolution of half a meter is needed since it matches an human reach. Furthermore, since several people can be at the same time in the apartment, the localization system must be able to separate several users (possibly 5) in order to differentiate their individual activities whether these people are collaborating or acting independently. Multi-user tracking based on ubiquitous sensors positioned everywhere in the house has already been performed [3]. This paper proposes a system using less sensors while being more precise on the position an enabling the detection of social interaction. In addition, the system must remain low intrusive and invasive in order to reduce the impact on the daily activities of the subjects. Finally, the system cost must remain limited. Although this system is a proof of concept, not yet fulfilling this last limitation, once produced at large scale, it shall be less expensive than renting a room in a nursing home.

B. Comparison of existing indoor positioning systems

Once those specifications were established (table I), several location tracking technologies had to be compared to select the best choice. A survey of active and passive indoor localization systems [4] classifies those technologies in two main branches: systems including an embedded wearable device and systems without, which has a great impact on the acceptability.

Some of the embedded solutions such as Ubisense [5], Ekahau RTLS [6] and Active Bats [7] from this survey are compliant with most of our specifications; but these are invasive and hence will be avoided if possible, even if it would be

an advantage for multiple users separation and identification. Moreover, the embedded device is almost always active and thus powered on. This characteristic implies the need for a battery and a limited lifetime. A last disadvantage of these embedded systems is the inability to locate visitors who do not have the embedded device, which is quite limiting in our case.

On the other side, among the systems without any embedded part, a special floor composed of many tiles [8] can use physical contact to track people. The capacitance between floor tiles changes when someone walks on a tile. This system resolution is good enough but it is very expensive and complex to install in a pre-existing apartment. A second solution, widely used in smart homes, including to study circadian cycles [13] is based on passive infrared sensors (PIR) which are very affordable. These sensors perform well when tracking one user but not when several users are close to each other. Computer vision [10] based on stereo color cameras can get a depth image of the room and localize people. Unfortunately, the depth image resolution does not allow to differentiate two people close to each other, especially in low light. A similar approach was used to track construction workers [11] using a more advanced device: a Kinect [14]. The data fusion with two Kinects has been performed earlier [12], but the cameras have to be parallel and the system can only localize two people at the same time. The Kinect is mainly composed of a color camera, a depth camera, and several microphones. Compared to the stereo cameras, the Kinect depth camera gives the resolution needed to localize and separate up to six people close to each other. A positioning system based on several Kinect depth cameras is non invasive, low intrusive, and can be installed in a pre-existing apartment with the provision of accessing electrical power plugs. Additionally, the choice of the Kinect is a low cost approach; i.e. an existing and widely spread technology is reused in a way which was not planned initially (it was designed as a motion sensor for games) providing the support of a large community and limiting the device price. Existing libraries can also be used to remove the cost of developing associated software. For all these reasons, this passive location tracking system based on Kinect depth cameras was chosen for our indoor location tracking system. The positioning systems comparison is summarized in table II.

II. MATERIALS AND METHODS

A. The Sensor

The Kinect is a motion sensor, designed by Microsoft Inc. and released in November 2010 to be used as a remote control for the Xbox 360 video game console. It is composed of several sensors (Fig. 1): a color camera (Color CMOS, VNA38209015), a depth camera composed of an IR projector (OG12/0956/D306/JG05A) combined to an IR camera (IR CMOS, Microsoft/X853750001/VCA379C7130), and an array of four microphones. The infrared camera and the color camera have a definition of 640×480 pixels. The angle



Fig. 1. Kinect sensors

of view is 60° horizontal and 45° vertical. The device is designed to be used in a range of 0.5 m to 5 m from it.

B. Positioning in a unified landmark

Each Kinect is directly connected to a computer running the OpenNI software [15]. OpenNI localizes the center of mass of the people in the camera's field of view. These 3D coordinates are in the Kinect's own landmark. We use several Kinects to cover the whole flat. Hence, the trajectories of the same person seen by several depth cameras must be compared and then merged. For this purpose, a projection on a unified landmark is needed. A reference landmark usable in the whole France is selected : the Lambert zone II (EPSG:27572) [16]. This projection grants the ability to compare the trajectories while maintaining the compatibility with outdoor positioning systems like the GPS.

OpenNI extracts the position of a body's center of mass from the images of the depth camera. Thus, if a person is partially hidden (i.e. behind a desk), his center of mass is wrongly located along the vertical axis. For this reason, the 3D positioning has been downgraded to a 2D positioning and the vertical axis has been neglected to remove measurement errors while staying compliant with the previously defined specifications.

Considering one of the depth cameras landmarks, a two axes coordinates must be converted in another two axes coordinates. A simple and efficient linear interpolation is used here. The position, orientation, and tilt of the Kinect are not needed, which is a great advantage as these measures are not easily accessible. However, those Kinect positioning data influence the linear interpolation coefficients and can be retrieved from these coefficients.

Considering the person 2D position from the depth camera point of view is (x_{cam}, z_{cam}) , and the position in the unified landmark is $(x_{unified}, y_{unified})$, the equation are:

$$x_{unified} = \alpha_1 x_{cam} + \alpha_2 z_{cam} + \alpha_3$$

$$y_{unified} = \beta_1 x_{cam} + \beta_2 z_{cam} + \beta_3$$

Hence, six coefficients must be computed, which means that six independent equations are needed. Knowing one position coordinates in both landmark gives two equations. Thus, knowing three independent positions on both landmarks gives the six needed equations and coefficients. Those positions are named calibration points.

They are initially positioned in the reference landmark. Then, the equivalent location in the Kinect landmark is measured using OpenNI.

TABLE II
COMPARISON OF INDOOR POSITIONING SYSTEMS ADAPTED FROM [4]

Positioning technologies	Resolution	Cost	Multi-person localization	Invasive	Intrusive	Deployment in existing home
Actimetric floor [8]	40 cm	Medium	Yes	No	No	No
Passive infrared [9]	50 cm	Low	Yes	No	No	Yes
Stereo cameras [10]	10 cm	Medium	Yes	No	Low	Yes
Depth cameras [11]	10 cm	Low	Yes	No	Low	Yes
Kinect [12]	14 cm	Low	Yes	No	Low	Yes
Ubisense [5]	30 cm	Medium	Yes	Yes	Low	Yes
Ekahau RTLS [6]	2 m	Medium	No	Yes	Low	Yes
Active Bats [7]	9 cm	Medium	Yes	Yes	Low	Yes

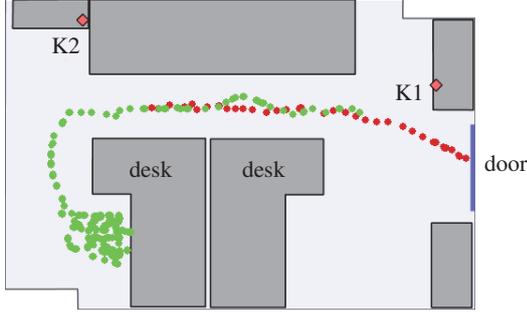


Fig. 2. Projected trajectories from two kinects, K1 (bright green trace) and K2 (dark red trace) in an office

C. Merging trajectories

Several depth cameras are needed to cover the area of an apartment. Hence, the system must pair the trajectories seen by two different Kinects but referring to the same person. An example of a person successive positions, projected in the unified landmark previously defined, is shown in Fig. 2. In the pictured room, the two Kinects are represented as diamonds K1 and K2. K1 is pointing to the left of the map and K2 to the right of the map. Someone entered the room and walked through the room from the door on the right to the other side, going around the desks in the center. One can see in bright green and dark red the trajectories of this person detected by the two Kinects, K1 and K2 respectively. Since K1 is pointing to the left, it cannot see the person entering the room, whereas K2 can. Thanks to the projections on a unified landmark, a clear link between the two trajectories can be established (Fig. 2).

Next, the two previous trajectories must be automatically paired in order to merge them and recover the full trajectory of the studied subject. To pair trajectories, the room's area common to both Kinects field of view was used. In this area, the positions measured by the two Kinects were compared. If the correlation between the two trajectories is high enough, these may be merged in one. As will be detailed in section III, a threshold on the correlation factor is not sufficient to decide when to merge trajectories, but it removes the impossible matches. Then, a comparison between the correlation factors provides the right peering operations.

The correlation C_i between two points of the trajectory is the product of a quality factor $Q_i \in [0, 1]$ and a distance factor $D_i \in]-\infty, 1]$. The measurement precision being

variable along the Kinect's field of view, the quality factor includes the quality of the two measures which corresponds to the minimum distance to the calibration points or their barycenter. The quality of a measure is calculated as follows:

$$Q_{i \text{ measure}} = 1 - \min(d_{to \text{ calibration points}}, d_{max})/d_{max}$$

where the distances are in meters. d_{max} can be adapted to the environment. It was set to 2 m in this room from our experimental data.

Also, the two measures are not sampled at the exact same time. Hence the time delay between the two measures, is included in the quality factor calculation:

$$Q_{i \text{ time}} = \max(0, 1 - 2\Delta t^2)$$

Where Δt is in seconds.

Then the quality factor for an association of two samples becomes:

$$Q_i = Q_{i \text{ measure } 1} \times Q_{i \text{ measure } 2} \times Q_{i \text{ time}}$$

As explained above, $Q_i \in [0, 1]$ where 1 is the best quality. The distance factor D_i is calculated as follow:

$$D_i = (1 - d_{between \text{ points}}^2)$$

where the distance is in meters. Consequently, D_i is close to 1 when the two measured positions are close and becomes negative when they are further away from each other. Eventually, the correlation C between the two trajectories is the sum of the C_i .

$$C = \sum_i C_i = \sum_i D_i \times Q_i$$

Close positions with good quality factor will result in an increase of the correlation sum. On the contrary, few samples showing that the two positions are not corresponding at all will decrease the correlation sum to a negative value. The threshold of the correlation sum to consider merging trajectories was set empirically from our experimental data. If the correlation between two trajectories does not reach the threshold, those cannot be merged. Otherwise, the correlation factors are compared and the highest one is chosen for the trajectory peering.

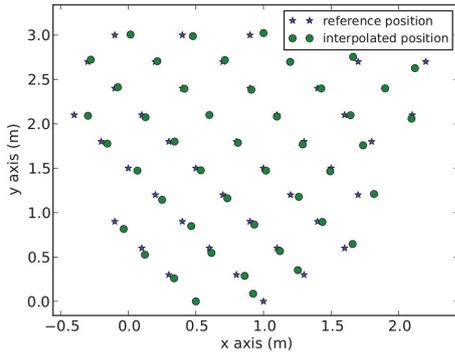


Fig. 3. Reference grid

III. EXPERIMENTATION AND VALIDATION

A. Selecting the calibration points

The selection of calibration points is of major importance to create the projection of each Kinect landmark in the unified landmark. Hence, the error introduced by this projection partly rely on the choice of this calibration points. In order to find out the best way to select the three calibration points, a comparison was made. This experience uses a grid on the floor and one depth camera. The grid is composed of forty-seven points regularly positioned, between one and five meters to the camera. A person stands successively on each point of the grid and his position relatively to the depth camera is measured using OpenNI. As in the calibration process, for each point of the grid, the coordinates are known in both landmarks. Hence, any set of three points can be used to do the projection from the Kinect landmark to reference one. For every set of three points, this projection is done. One of the projection results is shown in Fig. 3 where the reference positions are stars and the interpolated positions from the depth camera data are circles.

The mean error (the distance between the reference point and the interpolated one) for all other points is measured. Depending on the three points selected to make the linear interpolation, the mean error can be lower than half a meter, but it can also be above three meters. Hence, an indicator is needed to select the best interpolation points, without having to use this grid of points every time.

For every set of three calibration points, the measured mean error was compared to the area of the triangle created by these three calibration points. The result is shown in Fig. 4. The influence of the area is clear. The wider the area is, the lower the upper bound will be. This demonstrates, we can reduce the error introduced by the interpolation by maximizing the area formed by the three selected calibration points.

The same comparison was made between the mean error and the perimeter of the triangle. The result is shown in Fig. 5. The link between the perimeter and the error is not evident. This exhibits the relevance of the area indicator to select the best calibration points in order to lower the introduced error. This link is logical since aligned points would introduce an

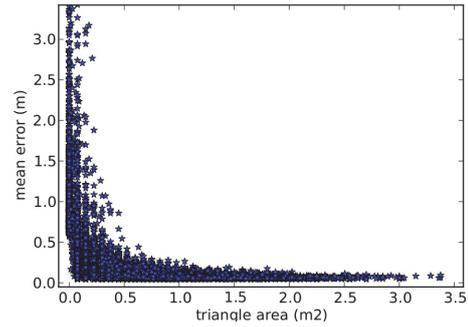


Fig. 4. Influence of the area between calibration points

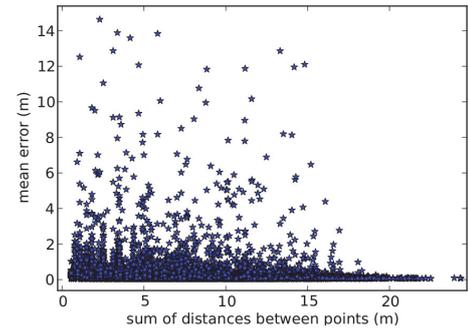


Fig. 5. Influence of the distance between points

important error in the perpendicular direction and since the further the points are, the lower the measurement error bias should be.

In the office used for the test, the area of the triangle formed by the three calibration points of the depth camera K1 is 2.5 m^2 and for K2, 1.5 m^2 . Hence, the mean error should be lower than 0.2 m in both cases. This result also validates the projection method as it respects our initial specifications of a spacial resolution below the half-meter.

B. Ability to separate two people

As proposed in introduction, this system must be able to separate the trajectories of two people following each other. To validate this capacity, a time offset was introduced on a sampled trajectory in order to simulate two people following exactly the same path which would be the worst case. The results are shown in Fig. 6.

When the offset is one second, the correlation drops down from 21.4 to 13.5. This result shows that, comparing the correlations, the trajectory merging method is able to separate two people following each other closely (one second offset is equivalent to about one meter at normal walking speed).

IV. DISCUSSION

The proposed location tracking system is based on existing depth camera and open source software to lower the cost, ensure sustainability, and benefit from the community collaboration. The low cost approach, including the deviation of the initial use of the Kinect, gave the ability to have an operative system much quicker than with a full development

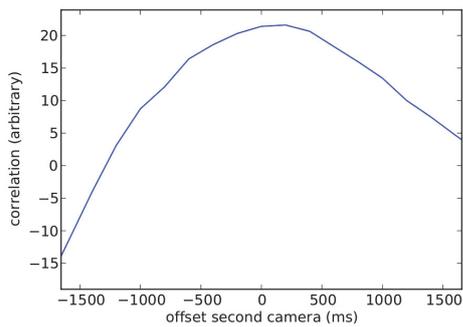


Fig. 6. Influence of a time offset on a camera

from scratch with well reduced expenses. No equipment has to be worn by the tracked people. This way, the system is even able to locate unknown visitors. The drawback of using several Kinect depth cameras is the need of one computer per camera and thus, of a power line everywhere a Kinect is installed.

The tests performed on one experimental trajectory seen by two depth cameras are encouraging. Those tests guided the choice of the empirical threshold used in the trajectory merging process. Yet, a larger set of scenarios is needed in order to fully validate the capacity of the system when facing several kinds of activity. The area common to two cameras will also vary as more rooms are equipped and the threshold will have to be adapted to these parameters.

The images taken by the cameras are always processed on the computer linked to the Kinect, never stored or transferred over the network. This should reassure users on potential loss in privacy, even if some may still consider the cameras intrusive.

Moreover, being able to track several users in an apartment impose the ability to identify the detected people. Otherwise, it would be impossible to associate the same trajectory to someone going in and out the apartment. Hence, an identification module must be added to the location tracking system. As a first step, the color camera available in the Kinect can be used, but it needs an operator to identify the pictures taken with the color camera. Image processing systems for face recognition exist but the constraints in terms of image quality and orientation cannot be reached with a Kinect camera. Hence, an autonomous identification module, based on the RFID technology, will be further developed and integrated in the system.

V. CONCLUSION

The indoor location tracking system presented in this paper is operational. This low cost system is easy to deploy, very modular, and able to evolve with technologies. It is non invasive since no embedded part is worn by the subject and does not require batteries. The fusion of positioning data is efficient, being able to differentiate individuals following the same trajectory.

By locating people relatively to rooms and equipment, the system provides an efficient way to measure, understand,

and monitor people activity along the days. The next step will be to complete this location process with the identification process of the people living in the apartment, and to recognize a set of life scenarios, leading to a personalized daily activity tracking system. This will enable a better understanding of people's life cycles like circadian ones as experimented earlier [1], of people's needs, and to sustain a longer autonomy at home for the elderly.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Institute of Nanotechnologies of Lyon (INL) for the special grant attributed to Loïc Sevrin for his PhD thesis.

REFERENCES

- [1] N. Noury, "Ambient intelligence might support increased longevity," in *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014 36th Annual International Conference of the IEEE*, Aug 2014, pp. 1760–1764.
- [2] N. Noury, J. Poujaud, A. Fleury, R. Nocua, T. Haddidi, and P. Rumeau, "Smart sweet home... a pervasive environment for sensing our daily activity?" in *Activity recognition in pervasive intelligent environments*. Springer, 2011, pp. 187–208.
- [3] D. Wilson and C. Atkeson, "Simultaneous tracking and activity recognition (star) using many anonymous, binary sensors," in *Pervasive Computing*, ser. Lecture Notes in Computer Science, H.-W. Gellersen, R. Want, and A. Schmidt, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2005, vol. 3468, pp. 62–79. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/11428572_5
- [4] G. Deak, K. Curran, and J. Condell, "A survey of active and passive indoor localisation systems," *Computer Communications*, vol. 35, no. 16, pp. 1939–1954, 2012.
- [5] P. Steggle and S. Gschwind, *The Ubisense smart space platform*. na, 2005.
- [6] K. W. Kolodziej and J. Hjelm, *Local positioning systems: LBS applications and services*. CRC press, 2006.
- [7] R. Want, A. Hopper, V. Falcao, and J. Gibbons, "The active badge location system," *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, vol. 10, no. 1, pp. 91–102, 1992.
- [8] M. Valtonen, J. Maentausta, and J. Vanhala, "Tiletrack: Capacitive human tracking using floor tiles," in *Pervasive Computing and Communications, 2009. PerCom 2009. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 1–10.
- [9] J. Kemper and D. Hauschildt, "Passive infrared localization with a probability hypothesis density filter," in *Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2010 7th Workshop on*, March 2010, pp. 68–76.
- [10] J. Krumm, S. Harris, B. Meyers, B. Brumitt, M. Hale, and S. Shafer, "Multi-camera multi-person tracking for easyliving," in *Visual Surveillance, 2000. Proceedings. Third IEEE International Workshop on*. IEEE, 2000, pp. 3–10.
- [11] A. Kandil, M. Hastak, and P. S. Dunston, "Application of microsoft kinect sensor for tracking construction workers," *Bridges*, vol. 10, pp. 9780 784 412 329–087, 2014.
- [12] M. Saputra, W. Widyawan, G. Putra, and P. Santosa, "Indoor human tracking application using multiple depth-cameras," in *Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS), 2012 International Conference on*, Dec 2012, pp. 307–312.
- [13] N. Noury, T. Herve, V. Rialle, G. Virone, E. Mercier, G. Morey, A. Moro, and T. Porcheron, "Monitoring behavior in home using a smart fall sensor and position sensors," in *Microtechnologies in Medicine and Biology, 1st Annual International Conference On*. 2000, 2000, pp. 607–610.
- [14] iFixIt, "ifixit website presenting a teardown of the kinect device," April 2015. [Online]. Available: <https://www.ifixit.com/Teardown/Microsoft+Kinect+Teardown/4066>
- [15] Simple-OpenNI, "Simple-openni website. build of openni and nite are available in the download section," April 2015. [Online]. Available: <https://code.google.com/p/simple-openni/>
- [16] EPSG.io, "Epsg.io website referencing most coordinate systems," April 2015. [Online]. Available: <http://epsg.io/27572>

From Health Smart Homes to Living Labs for Health

Norbert Noury, Loic Sevrin, Bertrand Massot

Abstract— introducing ICT in our homes bring hopes and challenges in transforming our living place into a connected place allowing new services to be invented for comfort, security, wellness and health services to fragile or elderly people. But these developments must be guided by experimentations with end users, in dedicated and controlled environments such as the Living Labs for Health.

I. INTRODUCTION

As early as in the 60's, a person suffering a cardiac chronic illness, could record their Electrocardiogram with a reduced set of dry electrodes and transmit it over the public switched telephone network (PSTN) [1]. But the remote monitoring of vital signs became a reality in the 90's with the democratization of data links over the PSTN using narrow band modems. Health telematics started to develop and opened the way to the monitoring of various parameters to address the needs for continuous follow up in chronic diseases. In case of a high-risk pregnancy, the parturient could record the cardiac rhythm of her fetus together with the uterine contractions forces (tocograph) and transmit the signals through a telephone line transceiver to the obstetrician [2]. Insulino-dependent type 2 diabetic patients could record their glycaemia with hand held devices connected to the telephone [3]. A smart and versatile hand held device, named Biomaster, was designed to collect various textual medical data in home and automatically transmit them via the French Telematic terminal Minitel to a distant data server accessible to the physicians [4]. The recent increase in longevity has propelled the idea of a continuous monitoring of the vital signs of fragile and elderly people directly in their home. Because the prevalence of chronic diseases remains unchanged with populations longevity, the elderly are more likely to suffer multiple pathologies.

Researchers started to set up experimental systems for the monitoring of health and well-being parameters with various connected sensors distributed in homes [5]. The physicians were enthusiastic with the idea of collecting temporal series of physiological data directly in ecological situations. They were projecting that they could be able to launch alarms in case of data falling out of normal range. For instance a systolic blood

pressure higher than 16 cmHg can be seriously damaging to a subject suffering cardiovascular disease. They also envisioned the possibility to detect abnormal trends on a though normal parameter. As a sudden increase in central temperature (e.g. 1 degree Celsius per hour) is usually a precursor of a growing malignant infection. But physicians on the ground, had rapidly to face difficulties such as missing the tools for an automatic analysis of the large amount of data produced, the lack of information on contextual conditions and eventually the short of medical knowledge for the interpretation of such new long term data collected in ecological situations. Moreover, longitudinal trials showed the limit of patient's observance as most subjects rapidly abandoned the collection of data on a regular basis [6]. It was thus evidenced that the participation of the subject itself was questionable on the long term, and thus the data should be collected seamlessly and automatically whenever it is possible.

Thus most research works were reoriented towards the monitoring of activities of the subject. This does not require a particular involvement of the person which executes his normal daily activities. In addition, it is accepted that there is a strong relationship between regular (healthy) physical activity and the "Homeostasis" which is a direct image of wellbeing and good health. This mainly depends on indoor localization and navigation techniques which will be depicted in this paper.

The rest of this paper is constructed as follows. In the next section we depict the concept of homeostasis and the externalizing of good health through subjects activities. In the following section we expose the most widely used techniques for indoor localization of humans. Then we present some results we obtained on the detection of human activities in our "Health Smart Homes" and our ongoing researches in our new born "Living Lab for Health". Eventually, we conclude on the little deployment of these results on the field and for the need to develop a user centered design approach.

II. HOMEOSTASIS AND HUMAN ACTIVITIES

The concept of Homeostasis was invented by French physiologist Claude Bernard in the 19th century. The name

Prof. Norbert Noury, Loic Severin and Bertrand Massot are with lab. INL UMR CNRS 5270 (e-mail: norbert.noury@insa-lyon.fr).

comes from two Greek words, *homoios*, "similar" and *stasis*, "standing still". It can be defined as the tendency of a system, especially the physiological system of higher animals, to maintain their internal stability, owing to the coordinated response of its parts, to any situation or stimulus that would tend to disturb its normal condition or function. In Medicine Homeostasis is the process that maintains the stability of the human body's internal environment in response to changes in external conditions.

For instance, humans maintain their central temperature to 37.2°C through mechanisms involving sweating when the internal temperature becomes excessive, or shivering to produce heat when it drops low, and also the basal generation of heat through metabolic processes when the internal temperature falls too low. Symptoms of thirst motivate the animal to drink when the water content of the blood and lymph fluid fall under a critical level. Also, when the concentration in blood of di-oxygen drops down, or the carbon dioxide concentration raises, the blood flow increases through the acceleration of cardiac and breathing rates. Homeostasis can be seen as a normal reaction to maintain internal body stability when facing unbalanced external conditions (perturbations), and to fight against adverse conditions such as illnesses. Claude Bernard suggested that many diseases involve disturbance in homeostasis balance. Being in "good health" is not only a static state of being free from illness or injury, but a more dynamic ability of our system to launch appropriate, efficient and rapid reactions (Figure 1).

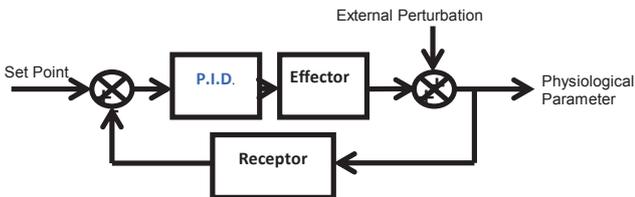


Figure 1. The control of homeostasis can be seen as a negative feed back with receptors (sensors) of the physiological parameter under control and effectors (muscle or organs) wich can produce adjustment reactions on the parameter. The central nervous system (control center) sets the range at which a variable is maintained and determines the appropriate response to a stimulus (perturbation). This response must be "adjusted" (Proportional action), "efficient" (Integral action) and "rapid" (Derivative action).

Furthermore, the aged organism loses control efficiency increasing risk for illness. Thus, some specific parameters are worth monitoring in elderly such are the loss of weight (tumors), the Body Mass index (degeneration), the dehydration. Some interesting parameters are not yet accessible (nociception, wellbeing, mood, etc.), yet some easily accessible information may help elaborate more clues on the vitality of subject (time spent on phone,

outside their home).

One expression of the homeostasis balance involves the physical movements performed by humans in their daily activities. The autonomy of the elderly subject relies on his ability to perform the basic actions involved in his daily living: transfer to/from the bed and in/out of a chair, move around and out of the flat, grooming, use of restroom, etc. Thus, there is a strong relationship between homeostasis, activity and autonomy (Figure 2). Claude Bernard also declared that "*The stability of the internal environment is the condition for the free and independent life*".

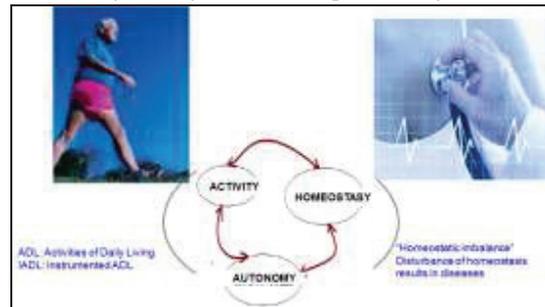


Figure 2. There is a strong relationship between homeostasis and Health, between autonomy and good Health and activity. Eventually, the activity is an expression of homesostasis.

III. INDOOR LOCALIZATIONS TECHNIQUES

A. Localization by optical means

The Pyroelectric Infra-Red (PIR) sensor is currently used as a presence detector in intrusion detection systems. It is based on a 1-pixel infrared photo sensing device (PSD) to detect the variation of optical heat flux radiated by any source of IR in the wavelength range 8 to 15 micrometers (thermal infrared) , such as the human skin. Usually, a filter made of several printed Fresnel lenses is interposed on the travel of light both to focalize (i.e. to amplify) the signal and to select some best light travel. When a person moves in front of the detector, it results in a significant variation of the amplitude of the output signal of the PSD, which can trigger an event if it overpasses a threshold in a given time window.

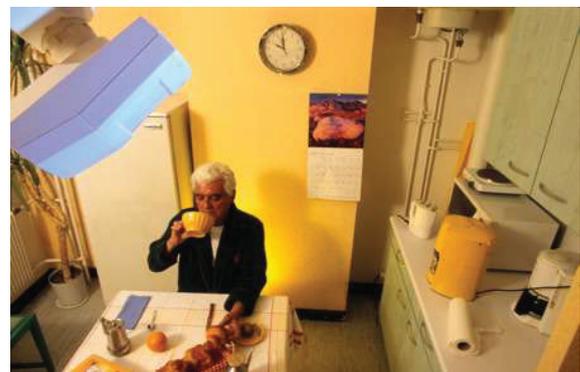


Figure 3. A PIR sensor (top left) detects presence of user in the kitchen.

Commonly, the PIR sensor has built in electronics which triggers a message when detection occurs then enters a refractory state for a few seconds to avoid multiple detections. Some PIR sensors also send a message of absence if no more detection happens within a time delay. Camera-based systems can detect the shape of a human body in the 2 dimensional plane limited by the sight of view of the optics interposed in front of the optical sensor matrix. The video matrix being mostly sensible to visible light, in the range 400 to 700 nanometers, this system highly depends on the lighting of the scene, which varies continuously in uncontrolled environments from day to night.

The 2 dimensional limitations can be overpassed with the use of multiple cameras, so called stereoscopic vision [7]. The dependence to lighting can be overpassed with the use of IR matrix. The lighting of the scene can thus be controlled with IR LEDs which are not visible to humans.

The use of a pattern (mask) projected onto the scene, allows the IR camera to gauge the depth of the scene (Moiré fringes), therefore giving access to the 3rd dimension. The IR “depth camera” is a very promising technology as the manufacturing costs have recently dropped due to intensive research on CMOS IR imaging sensors which can be produced on large scales. One such camera is the famous Kinect camera (Figure 4) which recently gained a lot of interests for the detection of the movements of humans indoors.



Figure 4. The Kinect (Microsoft Inc., Nov. 2010) is a motion sensor to be used as a remote control for the Xbox 360 video game console.

B. Localization from RF waves

Whereas the optical wave length are of very high frequencies, from 800 to 400 THz in the visible spectrum and down to 300 GHz for the thermal infrared radiations, the use of “lower high frequencies” electromagnetic waves, in the range 10 GHz down to 100 MHz, offers wide possibilities for localization with RF communicating devices.

The most straightforward method is based on the measurement of attenuation of a carrier signal when it travels through the air, which is roughly exponential as demonstrated by Friis [8]. The received signal strength indicator (RSSI) is an arbitrary measurement of the received signal strength which can deliver an indication of the relative distance to a known position. But it has low precisions and is highly impacted by the non-linearity of the propagation paths such as multiple paths, fading or scattering on obstacles [9].

The more elaborated localization systems use various techniques such as Time of Arrival/Time of flight (TOA/TOF), Time Difference of Arrival (TDOA) and Angle of Arrival (AOA) [10]. These techniques are mainly based on the measurement of the travelling time of the RF wave. At a velocity close to the light speed, it covers 1 meter in about 3 ns and therefore the precision only depends on the time base used, e.g. a spatial precision of 1 centimeter requires a temporal precision of 33 ps, which is now accessible to most electronic technologies.

IV. DETECTION OF ACTIVITIES WITH PIR SENSORS IN A HEALTH SMART HOME

In the early 2000, we installed our first health smart home named “Habitat Intelligent pour la Santé (HIS)” (Figure 5) and launched the French research program AILISA [6] which aimed at collecting on the field long term data of activity with PIR sensors distributed in private homes and hospital suites.



Figure 5. The experimental platforms AILISA used PIR sensors (red dots) distributed in the environment and wirelessly connected to a local CAN network.



Figure 6. On the monitoring screen are displayed in real time the levels of activities in each room, together with the physiological parameters last recorded.

A. Monitoring distribution of Inactivity

A first level of analysis was to figure the distribution of the time spent in each room (average and variability of ‘time of stay’) at different scales (day, week or month) so as to discover the habits of inhabitants. Also, additional information came out from the frequency of transitions

between rooms ('distribution of transitions'), to differentiate subjects with 'low activity' from 'highly active' subjects.

But the periods of "no activities" also provide some useful information about the human activity (e.g. duration of sleeping periods). An example of inactivity distribution for the Living room is given in Figure 7 [11]. We can define a "threshold of inactivity" and raise an alarm in case of unusual inactivity in a specific area (e.g. long stay in restroom).

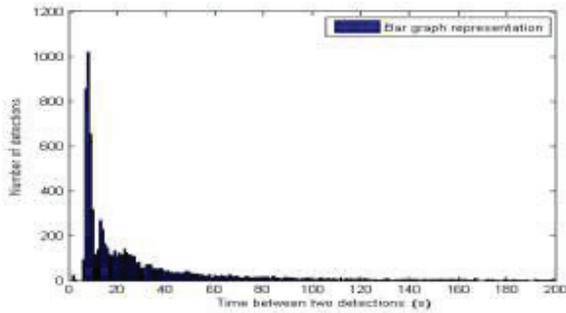


Figure 7. Histogram of time of inactivity in the Living room recorded during 2 months (AILISA project- Residence for Elderly 'Notre Dame', Grenoble, France).

B. Circadian activity rhythms

The circadian biological rhythms [12] are still extensively studied in chronobiology [13]. The circadian rhythms are driven by a 24 hours circadian clock, and adjusted to the local environment by external synchronizers (*zeitgebers*), the most important of which is daylight. It is thus natural to consider the "circadian rhythms of activities" (CAR) of the inhabitants. We proposed several methods to compute the CAR, among them the convolution of the "ambulatogram" with a time window [14], or the analysis of the distribution of time spent each hour in each room (Figure 8).

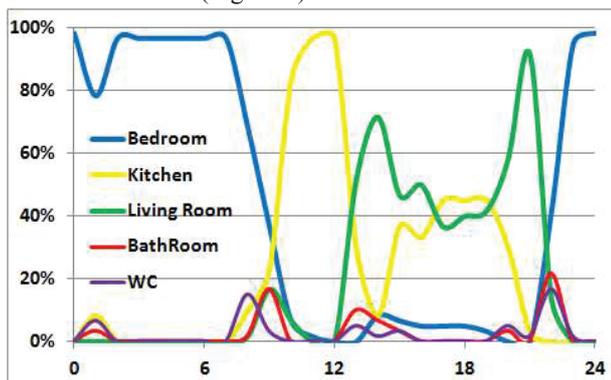


Figure 8. The Activity rhythms : distribution of time stayed each hour in each room.

An alarm can be triggered in case of activities deviating outside a "regular" pattern (Figure 9, [15]).



Figure 9. The distribution of Activity rhythms is compared in real time to the model and it raises alarms in case of abnormal deviation.

C. Night and day alternation

There exists a natural alternation between the levels of activities at night and day, e.g. the nocturnal level of activity is normally low after an active day but the diurnal level of activity is low after a restless night. Thus a high (low) level of activity during both the day and the night is abnormal. Within the AILISA project, we recorded long term data in 2 hospital suites, together with written observations from the nurses. We visualize the night and day levels of activities (Figure 10) to the physicians who confirmed that the periods of "desynchronization" corresponded to periods when the patient felt poorly, complaining a lot to the medical team [16].

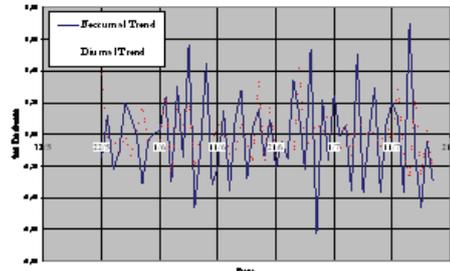


Figure 10. The diurnal and nocturnal activities are correlated (Monitoring of an elderly person during a 2 months period - May to July 2007).

V. DETECTION OF ACTIVITIES WITH DEPTH CAMERAS IN A LIVING LAB FOR HEALTH

A. The LivINLab

The research on the detection of human activities requires an experimental platform in order to perform experiments with potential end users, and also to place them in the situation of expressing their real needs. Therefore, a "Living Lab" was recently set up by the biomedical sensor group at the laboratory INL in Lyon (Figure 11). The platform named "LivINLab" is intended for the development and evaluation of various "Health technologies" in ecological situations.

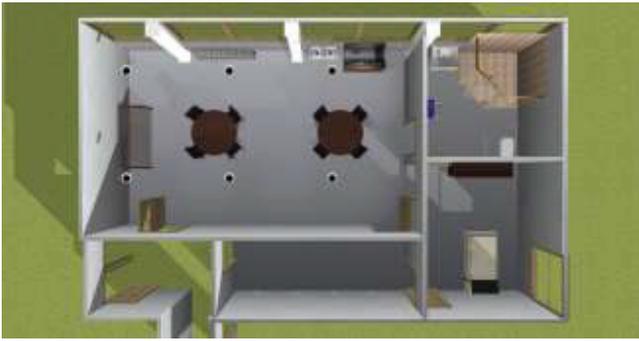


Figure 11. The experimental Living Lab “LivINLab” installed inside the lab. INL in Lyon. It covers an area of 85 sqm, with a living room, a kitchen corner, a complete bathroom and a bedroom.

A first program was launched on indoor localization of humans, in order to study their daily trajectories. A network of depth cameras (Kinects) are distributed over the apartment, fixed on adjustable stands to position the sensors at variable height above the ground (Figure 12).



Figure 12. The kinects are placed on ajustable stands fixed onto the walls (here one Kinect in the Living room).

B. The depth camera

The Kinect (Microsoft Inc.) is a motion sensor combining a color camera with a depth camera made of an IR projector and an IR CMOS detector. The infrared camera and the color camera have 640 X 480 pixels resolutions. The field of view is 60 degrees horizontal and 45 degrees vertical with a range of detection from 0.5 m to 5 m.

Our first results concerned the possibility to localize precisely the subject in an external referential, and hence to be able to follow up the trajectory of an individual which moves between the fields of views of different Kinects. We can also differentiate several users and distinguish their individual trajectories (Figure 13, [17]).

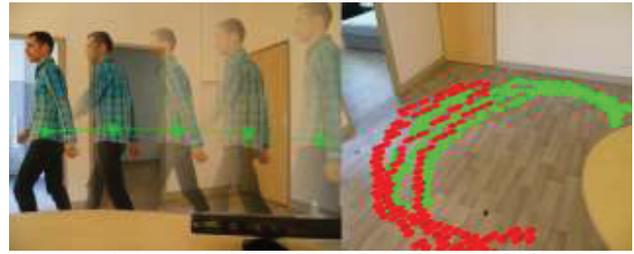


Figure 13. The trajectories of users are studied with a network of Kinects distributed inside the LivINLab.

VI. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Most of the placements of seniors in specialized institutions are decided when the medical team has no reliable information on the health, wellness and security of the person living alone at home. The loss of autonomy of the subject is feared by the medical and social actors as well as by the subject himself.

The «curve of autonomy» (Figure 14) is natural, ascending in youth and decreasing with age. If we can detect advanced signs of degeneration we may adapt the environment to maintain the subject above the threshold of dependence, or prepare an accepted institutionalization.

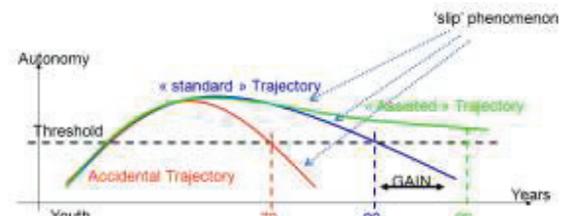


Figure 14. The curve of autonomy must be maintained above the threshold of the loss of autonomy to maintain an independent living.

The measurement of activities of humans inside their homes can bring valuable information about one’s health, wellbeing and autonomy. Nonetheless these researches have raised various questions.

First the “granularity” (the level of details) of the temporal series induces the quality and nature of information which can be produced. With a “microscopic” granularity we can launch alarms, whereas a “macroscopic” granularity (coarse information) allows detecting the slow trends of the activity, e.g. the slow “loss of autonomy”. The results we have obtained show that there are measurable information created from simple sensors. Still, the work must be further carried on methods to better understand the signals of activities and the correlations between daily activities and wellness and homeostasis. This work must be done in close collaboration with physicians and physiologists on large scale field trials.

The reliability of data is generally little addressed although good decisions should not be drawn from

corrupted, inconsistent or incomplete data. This may happen in uncontrolled environments, either due to technical misuse or to human misuse.

We have produced a huge quantity of data so we were rapidly facing the problem of data representation and the needs for data mining techniques to timely analyze a mass of information collected in data ware houses, so as to produce "aggregated index" and to detect efficiently when the subject needs help.

The question of intrusiveness of technologies often raises ethical issues which are still unsolved. Many people finding it not acceptable to collect and moreover to elaborate on, information in the intimacy of the home. But most of the technologies invited by users in their home are intrusive. Humans accept technologies which serve them. Though, a promising approach is to use the home environment itself as a sensor, or to collect the information which is already available or in place. For instance, we earlier detected the human activities through the electrical activities on the residential power line [18]. Nevertheless, the main concern is to help people to remain independent in their own affective environment. We should not mix Ethics and Morals. A "not ethical" behavior would be to let no chance to the elderly to carry on their independent living because technology might disrupt their daily life.

The measure of the "affordance" of the technology is central to this research because we intend to introduce or to deploy new services in the home. This is a tricky problem because we can find many examples of technologies which were "pushed" into the home in the past, but found their place in the end. The first one is electricity which brought artificial lighting allowing humans to carry on their activities after setting sun. It also opened our home to numerous technologies which changed our lives, such as the fridge which contributed to safety of our diet with major consequences on our longevity. The individual telephone allowed keeping connected to others. The Internet amplified this phenomenon with the possibility to instantly share communications and information. The technologies in Smart Homes can offer the possibility to bring wellness and good health to humans in their own secured environment. Now ICT have entered our Homes and might even participate in increasing the longevity of humans.

Nevertheless we must consider that all the promising results of our research are still not in used, partly because they are still preliminary but also because they are not correctly understood by end users. So we need the means to evaluate timely the proposed technologies in controlled

environments which can be accessible as early as possible to end users so as to place them in the situation of expressing their real needs. Humans invite in their homes the technologies which make sense to them, servicing their basic needs and helping them concentrate on their main achievement in life. We believe that such environments as the Living Lab, might be a possible vector for developing technologies useful to people.

REFERENCES

- [1] I. Hoffman and R. S. Cosby, Telephonic electrocardiography, *California medicine*. 100(4), 264, (1964).
- [2] S. Uzan, Autosurveillance a domicile de certaines grossesses a risque, *Revue du Praticien*. 39(27), 2441 –2442, (1989).
- [3] A. Billiard, V. Rohmer, M.-A. Roques, M.-G. Joseph, S. Suraniti, P. Giraud, J.-M. Limal, P. Fressinaud, and M. Marre, Telematic transmission of computerized blood glucose profiles for iddm patients, *Diabetes care*. 14(2), 130–134, (1991).
- [4] N. Noury and P. Pilichowski. A telematic system tool for home health care. In *Engineering in 14th IEEE Annual International Conference of the EMBS*, vol. 3, pp. 1175–1177. (1992).
- [5] T. Tamura, T. Togawa, M. Ogawa, and M. Yoda, Fully automated health monitoring system in the home., *Med Eng Phys*. 20(8), 573–579 (Nov, 1998).
- [6] Noury N, (for the AILISA project consortium), "AILISA : experimental platforms to evaluate remote care and assistive technologies in gerontology", in 7th Inter. Workshop on enterprise networking and computing in Healthcare industry, *Healthcom2005*, Busan-Korea, 24-25 Jun 2005, pp. 155-160
- [7] J. Krumm, S. Harris, B. Meyers, B. Brumitt, M. Hale, and S. Shafer, "Multi-camera multi-person tracking for easyliving," in *Third IEEE International Workshop on Visual Surveillance*, 2000, pp. 3–10.
- [8] H. T. Friis. A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 34(5), p254 – 256, May 1946.
- [9] F. Touvat, J. Poujaud, N. Noury, Indoor Localization with Wearable RF devices in 868MHz and 2.4 GHz Bands, in *Proc. IEEE–Healthcom2014*, Natal-Brazil, Oct. 2014, pp.136-9
- [10] G. Deak, K. Curran, and J. Condell, "A survey of active and passive indoor localisation systems," *Computer Communications*, vol. 35, no. 16, pp. 1939–1954, 2012.
- [11] J. Poujaud, N. Noury, and J.-E. Lundy. Identification of inactivity behavior in smart home. In *Proc. IEEE EMBC*, pp. 2075–2078, (2008).
- [12] A. T. Winfree, Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators, *Journal of theoretical biology*. 16(1), 15–42, (1967).
- [13] N. Barkai and S. Leibler, Biological rhythms: Circadian clocks limited by noise, *Nature*. 403 (6767), 267–268, (2000).
- [14] G. LeBellego, N. Noury, G. Virone, M. Mousseau, J. Demongeot, A model for the measure- ment of patient activity in a hospital suite, *IEEE TITB*, 10(1), 92–99, (2006).
- [15] G. Virone, N. Noury, and J. Demongeot, A system for automatic measurement of circadian activity deviations in telemedicine, *IEEE TBME*. 49(12), 1463–1469, (2002).
- [16] N. Noury, T. Hadidi, M. Laila, A. Fleury, C. Villemazet, V. Rialle, and A. Franco. Level of activity, night and day alternation, and well being measured in a smart hospital suite. In *Proc. IEEE-EMBS*, pp. 3328–3331, (2008).
- [17] Loïc Sevrin, Norbert Noury, Nacer Abouchi, Fabrice Jumel, Bertrand Massot, Jacques Saraydaryan, Characterization of a multi-user indoor positioning system based on low cost depth vision for monitoring human activity in a smart home, in *Proc. the IEEE–EMBC’15*, Milano, 2015 (under publication).
- [18] N. Noury, M. Berenguer, H. Teyssier, M.-J. Bouzid, M. Giordani, Building an index of activity of inhabitants from their activity on the residential electrical power line. *IEEE JBHI*, 15(5), 758–766, (2011).