
Mise en œuvre d'une plateforme de suivi de l'actimétrie associée à un système d'identification

Yoann Charlon^{*,**} – Walid Bourenane^{*,**} – Eric Campo^{*,**}

* CNRS ; LAAS ; 7 avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse Cedex 4, France
{ycharlon, wbourenn, ecampo}@laas.fr

** Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE, UT1, UTM, LAAS ; F-31077 Toulouse Cedex 4, France

RÉSUMÉ. Dans cet article, nous présentons une plateforme de suivi de l'actimétrie de personnes atteintes de troubles cognitifs au sein d'une unité de soins. Notre système est constitué d'un réseau de capteurs de mouvements, d'une étiquette d'identification embarquée sur le patient et d'un capteur de présence installé dans le lit. Une phase d'apprentissage est effectuée à partir de données de positions et de déplacements des patients, le système détermine alors un modèle de comportement basé sur ses habitudes de vie. Un algorithme d'analyses permet ainsi de détecter une situation anormale, et d'alerter le personnel médical en temps réel. Une application Web réservée au personnel permet d'accéder aux données et au profil des patients observés.

MOTS-CLÉS : Actimétrie, Alzheimer, réseau de capteurs, communication sans fil, technologie ZigBee, fusion de données, géolocalisation, instrumentation.

1. Introduction

Dans un contexte de population vieillissante, la prise en charge des personnes dépendantes s'impose comme un sujet économique et sociétal majeur. La France compte plus de 1,1 millions de personnes dépendantes et ce chiffre est amené à croître de 1 à 2% par an d'ici 2040. Ainsi, environ 2 millions de personnes dépendantes auront besoin d'un accompagnement en 2020 [PAM 06]. Les technologies pour la santé constituent un marché important, dynamique et à hautes valeurs ajoutées. Le marché français était estimé en 2005 à 6,7 milliards d'euros [ALC 06]. Il inclut les appareils médicaux, l'assistance technique, les bénéfices médicaux et l'aide à domicile [ALC 07].

Cette situation économique favorable associée aux progrès récents dans le domaine des technologies de l'information, des réseaux de capteurs, et de la miniaturisation des dispositifs permet d'envisager de nouvelles solutions technologiques pour l'aide à la prise en charge des personnes dépendantes, notamment dans le cadre d'établissements médicalisés. Néanmoins, l'utilisation de ces technologies dans une démarche de suivi médical ne possède pas encore de cadre juridique et éthique. De nombreuses questions restent en suspens, notamment sur l'utilisation et la fiabilité de ces technologies, le niveau de confidentialité des données échangées, et l'acceptabilité sociale des différents acteurs [VAR 05].

Le LAAS-CNRS travaille dans le domaine de la domotique médicale depuis près de 20 ans. Il a mené plusieurs projets expérimentaux de mise en œuvre de plateformes d'aide à l'autonomie en institution. Cela a donné lieu à plusieurs publications dont les principaux résultats sont :

- La validation d'un modèle de suivi du comportement du patient, fondé sur l'apprentissage des habitudes de vie en institution [CHA 03].
- Une architecture type basée sur le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvements lié à une interface logicielle de suivi des patients [BON 08]
- Une évaluation positive du personnel sur ces aspects d'aide à la sécurité et au diagnostic [CAM 04].

L'insuffisance majeure de ces systèmes basés sur la détection des mouvements concerne l'absence d'identification des patients observés [CHA 09]. La surveillance est limitée à des tranches horaires où le patient est seul dans une pièce, par exemple la nuit dans sa chambre. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'identifier les patients avec un équipement complémentaire d'identification [CAM 10].

Le projet HOMECARE se situe dans le prolongement de ces travaux. Il concerne la mise en œuvre et la validation d'une solution technique, pour l'aide à la surveillance en établissement spécialisé pour personnes dépendantes. L'évaluation de cette solution est considérée ici sous l'angle de la satisfaction des patients, des familles, des institutions, et du personnel médical. Toutes ces considérations techniques et humaines sont évaluées dans le contexte d'une unité de soins pour Alzheimer amenant à :

- des recommandations dans les champs concernés : techniques, médico-techniques, sociales et humaines,
- la définition d'un cahier des charges référent,
- la définition d'un système global diffusable industriellement.

Dans la suite de cet article, nous présentons la mise en œuvre de la plateforme, les résultats préliminaires, et les premières recommandations techniques.

2. Présentation du projet

HOME CARE s'inscrit dans la suite logique du projet PROSAFE dont il reprend le concept [CHA 03]. Le système est basé sur la prévention d'« incidents temps-réel » dans un environnement médicalisé. Le concept consiste à établir dans un premier temps des modèles d'habitudes des personnes en utilisant des techniques d'apprentissage basées sur les réseaux de neurones [CHA 95] et les statistiques. Dans un deuxième temps, on mesure l'écart du comportement du patient par rapport à ses habitudes pour détecter trois types d'incidents : la chute, la fugue et l'agitation.

L'analyse des activités en temps-réel est basée sur l'apprentissage des habitudes de vie et le calcul de la moyenne des événements observés sur les 30 derniers jours. Les événements « temps réel » sont comparés avec ce modèle de référence et une alarme est générée en cas de dépassement de seuil.

Parallèlement au calcul des seuils de détection, une procédure d'apprentissage supervisée exploite la levée de doutes. La personne responsable d'une intervention en cas d'alarme, doit préciser au système la véracité du diagnostic en validant, ou en refusant, l'alarme selon la situation constatée. Dans le cas d'une fausse alarme, le seuil est ainsi automatiquement ajusté.

Le modèle de comportement aide également au diagnostic par l'observation de phénomènes lents tels que : la déambulation et les effets d'un traitement sur le comportement du patient.

2.1. Présentation du cahier des charges

Le cahier des charges initial de ce projet spécifie la suite chronologique des tâches suivantes : enrichissement des acquis, intégration d'une solution fonctionnelle et opérationnelle, élaboration d'un cahier des charges opérationnel, exploitation et évaluation du système en vue d'une industrialisation.

Au niveau technique, les fonctions suivantes doivent être assurées à l'issue du déploiement opérationnel de la plateforme :

- Suivi du patient 24/24h.
- Identification et géolocalisation des patients.
- Interfaces ergonomiques et optimisées.
- Critères d'activités enrichis.
- Mise à disposition de données simplifiées pour le personnel médical.

Pour mener à bien ces objectifs, ce projet s'appuie sur la collaboration de quatre pôles de compétences majeurs : la recherche avec le laboratoire LAAS-CNRS, l'industrie avec les sociétés CEDOM et ATOS ORIGIN, la médecine avec l'hôpital de Caussade, et le domaine éthique pour l'évaluation des usages avec l'Institut Européen de Télémedecine du CHU de Toulouse.

L'évaluation de la pertinence de HOME CARE commencera lorsque toutes les mises au point techniques seront terminées. Elle sera réalisée à deux niveaux : par une équipe de terrain composée des personnels opérationnels chargés de constituer un dossier de suivi et par le comité de pilotage du projet qui tirera les conclusions des différents avis qui lui seront communiqués.

3. Présentation de la plateforme

L'architecture générale de la plateforme est illustrée sur la figure 1. L'unité de soins est instrumentée par des capteurs qui récoltent des données d'activités du patient, puis les envoient vers l'organe de collecte de données (PC médical). Après traitement par l'application temps-réel, les données sont enregistrées sur le serveur d'application (base de données). Au bout de 30 jours d'acquisitions, l'unité de traitement mathématique définit le modèle de comportement du patient (profil) et calcule les seuils de détection des alarmes temps-réel. Une application Web exploite sous forme graphique les données d'activités du patient et son profil (fiche patient). L'accès aux fiches patient est sécurisé par un mot de passe.

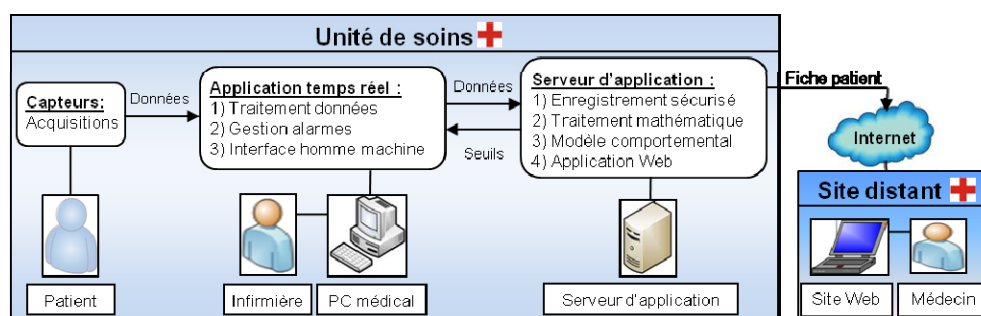


Figure 1. Architecture générale.

3.1. L'architecture matérielle

3.1.1. Le réseau de capteurs sans fil

Ce réseau est constitué par deux types de capteurs : des capteurs de mouvements infrarouges et des capteurs de présence piézoélectriques pour le lit. Ces capteurs possèdent un module de communication radio intégré. Pour chaque détection, ils envoient une trame radio contenant l'identifiant du capteur vers un récepteur relié à l'organe de collecte de données. Ils possèdent un mode de communication « longue portée » où chaque détecteur peut relayer la trame jusqu'au récepteur. Ils sont paramétrables à distance via une interface logicielle dédiée. L'alimentation est réalisée à l'aide de deux piles de 1,5V (AAA). L'autonomie de ces capteurs est comprise entre trois mois et une année en fonction du nombre de détections.

Le capteur de mouvements est placé au plafond et orienté vers le sol, la zone de couverture est réglable de 1 à 2 m² à l'aide de caches de différentes tailles et formes. En fonction du réglage de la sensibilité (faible, moyenne ou forte), il est capable de détecter du simple passage d'une personne jusqu'au mouvement d'un membre (bras, tête...). L'intervalle de temps entre chaque détection est paramétrable de 0,5 s à 2 s.

Le capteur de présence du lit détecte les couchés et levés du patient dans son lit. Il se présente sous la forme d'un coussin plat que l'on place sous le matelas du patient. A partir du relevé des heures de levés et couchés du patient, on enrichit le modèle de comportement.

3.1.2. Le réseau de capteurs ZigBee

Le système développé au LAAS se décompose en deux parties (cf. figure 2) :

- un émetteur radio embarqué sur le patient : le TAG,
- un récepteur radio placé dans la pièce à surveiller : la Balise.

La communication radio entre ces éléments exploite la technologie ZigBee [Zig 05]. Le choix de ce protocole est particulièrement adapté à notre application car il consomme très peu d'énergie. Le dispositif TAG fournit un identifiant lié à la personne instrumentée toutes les 3s. Il transmet également un message radio d'alarme en cas de chute. Un système de contrôle interne de la pile envoie une alerte lorsque la capacité de celle-ci est inférieure à 20%. L'architecture électronique du TAG a été développée autour du composant 13213 de Freescale regroupant un microcontrôleur et un modem radio 2,4Ghz compatible ZigBee. L'accéléromètre 3 axes choisi pour la détection de chute est l'ADXL345 de chez Analog Device. Le choix de ces composants a fait l'objet d'une attention particulière au niveau de leurs performances énergétiques, afin de maximiser l'autonomie du système alimenté par une pile lithium CR2032 d'une capacité de 180 mA/h. Avec une consommation moyenne inférieure à 200µA, l'autonomie du TAG est d'environ 900h.



Figure 2. L'ensemble TAG/Balise ZigBee.

Les dimensions du TAG sont de 4*2,2 cm avec une épaisseur de 5 mm. Une deuxième version du TAG est en cours d'étude, l'une des pistes étudiées s'oriente vers la miniaturisation et l'intégration de ce dispositif dans un vêtement.

La Balise géographiquement fixe est alimentée sur secteur. Elle reçoit les données du TAG et les transmet vers le serveur d'application. Le dispositif Balise est constitué de deux parties : le dispositif TAG en configuration récepteur radio, et une carte support pour le TAG associée à un composant qui convertit les données au format TCP/IP. Ainsi, la communication de la balise vers le serveur d'application s'appuie sur le protocole Ethernet. Afin de maximiser la compatibilité avec les établissements de santé, pouvant ne pas être équipés de connectique réseau, il a été également prévu de pouvoir utiliser des modules à Courants Porteurs en Ligne (CPL), en remplacement du bus Ethernet. Nous explorons également d'autres possibilités pour la remontée de ces informations. La solution la plus pertinente pour s'affranchir de l'infrastructure du site médicalisé serait de développer un module radio longue portée adapté.

La figure 3 illustre la remontée d'information du TAG vers le serveur d'application. Elle illustre aussi la distribution des informations vers le personnel médical.

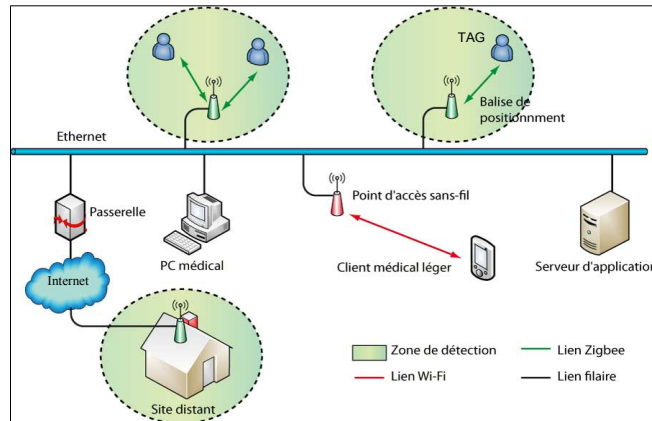


Figure 3. L'architecture de communication des données.

3.2. Déploiement de la plateforme

L'expérimentation est menée sur trois patients suivis en continu. La plateforme est déployée dans les chambres des patients, le couloir, la salle de vie, la terrasse et le jardin. L'organe de collecte se situe dans une salle réservée au personnel médical. Les pièces surveillées sont équipées des capteurs de mouvements distribués dans l'espace de manière à couvrir la totalité de la surface de la pièce sans zone de recouvrement. La zone de couverture de chaque capteur a été relevée et reportée sur le plan virtuel de l'hôpital, puis enregistrée dans un système de coordonnées. La phase de calibration prend environ 2 heures par pièce mais reste figée tant que les détecteurs ne sont pas déplacés. Une Balise ZigBee est associée à chaque pièce surveillée. Le déploiement des Balises s'étend également à la terrasse et au jardin pour détecter la fugue d'un patient. La figure 4 montre les zones de surveillance déployées au sein de l'unité de soins Alzheimer de l'hôpital de Caussade.

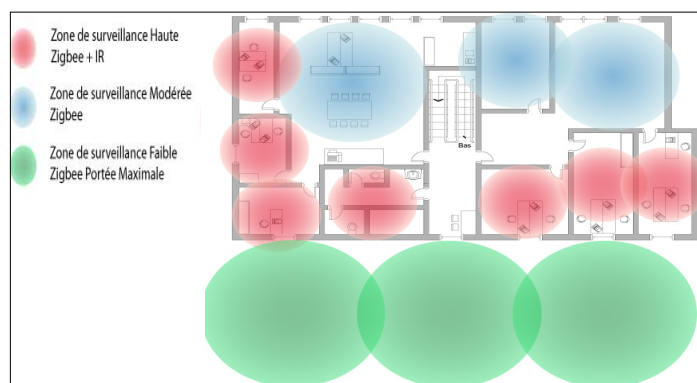


Figure 4. Principe des zones de surveillances.

3.3. Fonctions de la plateforme

3.3.1. La géolocalisation

Plusieurs méthodes de localisation « indoor » exploitent la puissance du signal radio reçu (RSSI) au niveau des nœuds fixes (Balises) et les combinent pour extraire la position occupée par le nœud mobile (TAG). Ces méthodes comportent plusieurs degrés de complexité en fonction de la précision à atteindre.

Nous citons ci-après trois méthodes de localisation dans l'ordre croissant de complexité :

- La localisation par zones [WEN 10],
- La localisation exploitant des positions de référence du mobile dans son environnement (cartographie de RSSI) [TSU 10],
- La localisation basée sur des modèles mathématiques de propagation des ondes [NAV 09].

Les avantages de la localisation par zones choisie pour notre algorithme (cf. figure 5) sont : un développement logiciel simple et un déploiement rapide sur site. Cette méthode consiste à choisir l'emplacement des nœuds fixes dans le bâtiment de manière à éviter les zones de recouvrement. Le système compare les niveaux de RSSI à chaque instant et choisit le nœud fixe le plus proche du nœud mobile. Dans notre cas, les Balises sont positionnées au centre de chaque pièce à surveiller. La puissance d'émission du TAG est paramétrée pour que sa zone de couverture radio soit adaptée aux pièces surveillées. De plus, l'atténuation des signaux par les murs du bâtiment évite les zones de recouvrement. Suite au choix de la pièce où se situe le patient, le réseau de capteur sans fil peut affiner la localisation en donnant la position à l'intérieur de la pièce.

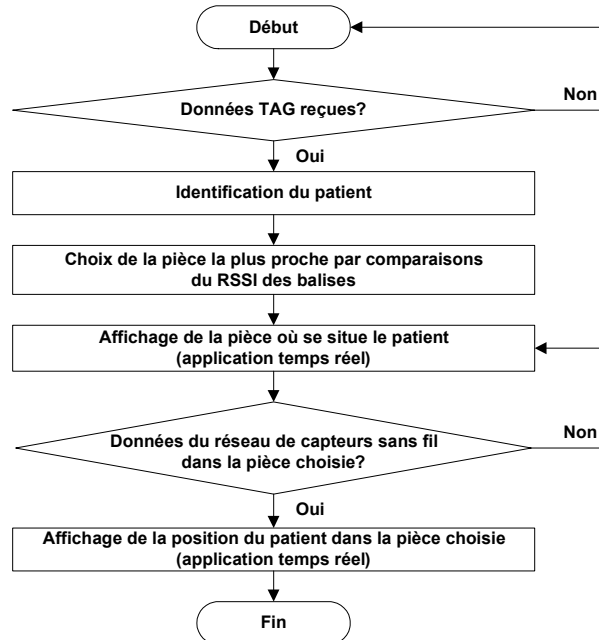


Figure 5. L'algorithme de localisation.

La localisation à l'aide d'un réseau de balises ZigBee améliore le concept de suivi en précisant au système la pièce où se situe le patient. Par contre, le système ne peut pas dissocier la position de plusieurs personnes dans une même pièce. Pour améliorer ce point, il semble nécessaire d'utiliser une méthode de localisation plus précise afin d'affiner la corrélation entre le réseau de Balises ZigBee et le réseau de capteurs sans fil.

3.3.2. La détection de chutes

Cette fonction est basée sur l'analyse des variations de l'accélération que subit le corps humain pendant une chute. Elle est implémentée dans le microcontrôleur du TAG et exploite les données de l'accéléromètre 3 axes. Les algorithmes de détection de chutes basés sur des seuils d'accélérations [KAN 07- BOU 10] sont un bon compromis entre performances et consommation énergétique. Le paramètre utilisé pour calculer l'accélération est le vecteur somme V_s [1] qui contient les composantes statique et dynamique de l'accélération.

$$V_s = \sqrt{(A_x)^2 + (A_y)^2 + (A_z)^2} \text{ avec } A_x, A_y, A_z \text{ l'accélération (g) des axes } x, y, z \quad [1]$$

Notre algorithme (cf. figure 6) utilise trois seuils d'accélération pour caractériser une chute : un seuil pour détecter la chute libre, un seuil pour détecter le choc avec le sol et un seuil pour déterminer la posture après le choc.

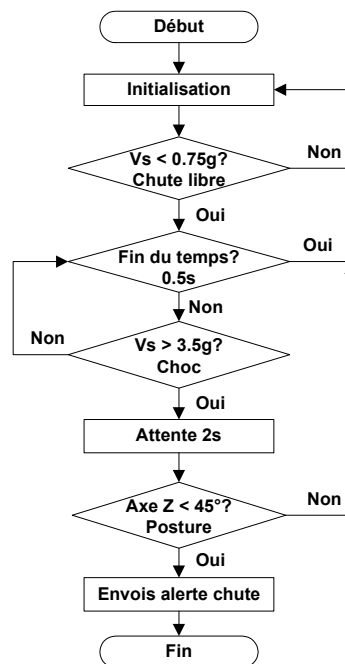


Figure 6. L'algorithme de chute.

Une première campagne d'essais menée avec trois volontaires a permis de définir les seuils d'accélération et temps de transitions de notre algorithme de chute (gabarit). La position du TAG a une importance au niveau de l'axe vertical (axe Z) pour détecter la posture après la chute. La fréquence d'acquisition de l'accéléromètre est de 400 Hz ré-échantillonnée à 100 Hz. La figure 7 présente la mesure du paramètre V_s pendant une chute vers l'avant sur un matelas, avec le TAG collé dans le dos de l'un de nos volontaires (condition d'utilisation réelle).

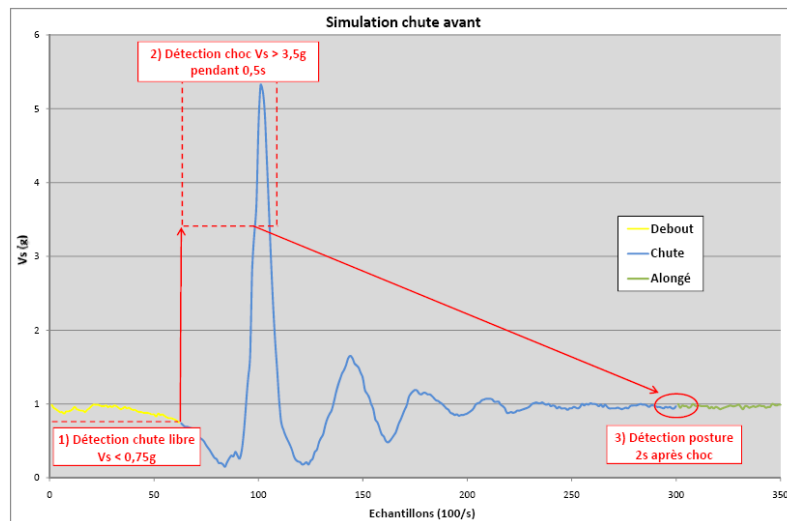


Figure 7. Mesure du paramètre V_s associé au gabarit de chute

Une deuxième campagne d'essais est actuellement en cours pour évaluer les performances de cette fonction. Suite à une chute, le TAG envoie un message d'alerte avec la trame radio d'identification. Couplé à la fonction de géolocalisation, le système indique l'identité de la personne, le lieu et l'heure de la chute. Ces informations sont ensuite relayées vers l'élément portatif de la personne en charge de la surveillance. En cas de perte du message d'alerte, un mécanisme de retransmission permet de garantir la liaison radio entre le TAG et la Balise.

3.3.3. Le suivi de l'actimétrie

L'activité de groupe correspond aux mouvements effectués par l'ensemble des patients de l'unité de soins. Elle est assurée par le réseau de capteurs de mouvements des salles communes. On découpe l'activité de groupe par tranche horaire d'une heure. Cette fonction permet au personnel médical d'analyser les périodes d'activités plus importantes afin de renforcer si nécessaire la surveillance.

L'activité nocturne du patient est assurée par l'association du capteur de mouvement placé au dessus du lit et du capteur de présence placé sous le matelas. Le capteur de mouvements est paramétré avec la sensibilité maximum et un intervalle de temps minimum (0,5s) afin de détecter un maximum de mouvements de la personne quand elle est dans son lit.

La marche est évaluée par la distance parcourue dans les chambres des patients [CAM 08]. On recense dans un premier temps tous les déplacements effectués par le patient pour chaque trajectoire de 3 zones distinctes (cf. figure 8) dans une période donnée (30 jours), avec une vitesse de déplacement de la personne supposée constante (1m/s). On en déduit alors la vitesse de déplacement en prenant en compte le temps de passage de la zone 1 à la zone 3. A partir des données de déplacements, on analyse également les trajectoires [CAM 10] et le critère de déambulation.

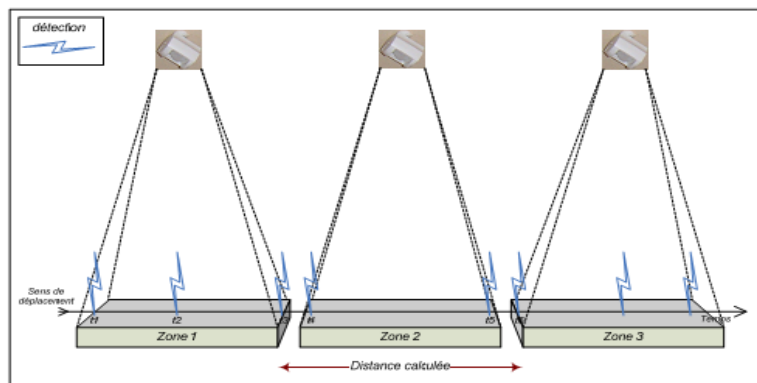


Figure 8. Principe de l'évaluation de la distance parcourue.

4. Résultats

La première version de la plateforme installée est fonctionnelle. Un premier patient a été sélectionné par les médecins avec l'accord de la famille. Deux autres patients sont en cours de sélection. La campagne de suivi du premier patient a été lancée il y a cinq mois. Les données recueillies ont permis de définir son modèle comportemental. Aucune alarme réelle de fugue, de chute ni d'agitation n'est à signaler pour le moment. Le nombre de fausses alarmes est de moins d'une par jour. L'activité de groupe a également été relevée dans les salles communes. Les figures 9 et 10 illustrent quelques paramètres mesurés à partir des données collectées.

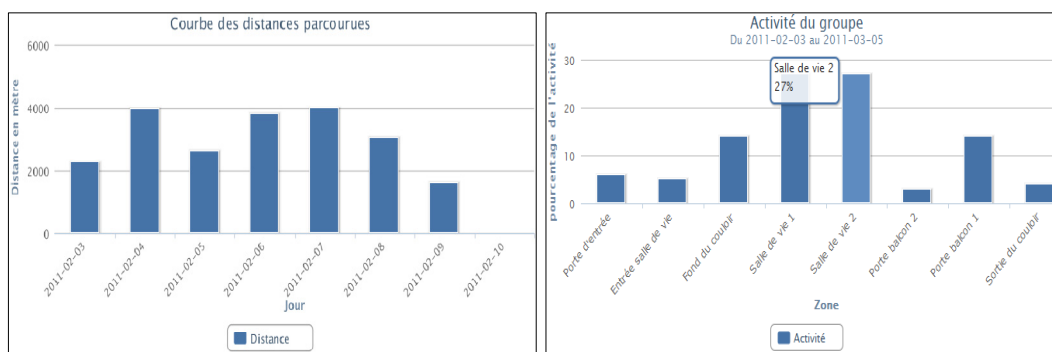


Figure 9. Distances parcourues par le patient.

Figure 10. Activité de groupe.

5. Conclusion

La fonction d'identification, améliore le système mais ne résout pas le problème de la localisation de plusieurs patients dans une même pièce. Pour améliorer ce point, il semble nécessaire d'ajouter une fonction de localisation plus fine associant les données de plusieurs balises. Les tests en cours doivent permettre de valider le dispositif global et de proposer des optimisations notamment en termes de sécurisation des données sur serveur, d'amélioration du dispositif technique embarqué sur la personne, et de robustesse des algorithmes de traitement. Des mécanismes de sécurité sont également à l'étude pour garantir le déclenchement d'une alarme sur le dispositif portable du personnel en charge de la surveillance.

6. Remerciements

Nous tenons à remercier le personnel médical de l'unité Alzheimer de l'hôpital de Caussade pour sa disponibilité et son implication dans l'expérimentation ainsi que les partenaires industriels du projet. Ce travail est financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme TecSan 2009-2012.

7. Bibliographie

- [ALC 06] ALCIMED, « Les technologies pour la Santé à Domicile », 2006.
- [ALC 07] ALCIMED, « Etude prospective sur les technologies pour la santé et l'autonomie », 2007.
- [BON 08] BONHOMME S., CAMPO E., ESTÈVE D., GUENNEC J., « PROSAFE-extended, a telemedicine platform to contribute to medical diagnosis », *Journal of Telemedicine and Telecare*, 14(3), 2008, pp. 116-118.
- [BOU 10] BOURKE A., PEPLIN V., GAMBLE M., O'CONNOR R., MURPHY K., BOGAN E., MCQUADE E., FINUCANE P., OLAIGHIN G., NELSON J., « Assessment of Waist-worn Tri-axial Accelerometer Based Fall-detection Algorithms using Continuous Unsupervised Activities », *32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Buenos Aires, Argentina, August 31 – September 4, 2010
- [CHA 95] CHAN M., HARITON C., RINGEARD P., CAMPO E., « Smart house automation system for the elderly and the disabled », *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 2, 1995, pp. 1586-1589
- [CHA 03] CHAN M., CAMPO E., ESTÈVE D., « Prosafe, a multisensory remote monitoring system for elderly or the handicapped », *1st International Conference on Smart home & health Telematics*, 2003, Paris, France.
- [CHA 09] CHAN M., CAMPO E., ESTÈVE D., « Smart home – Current features and future perspectives », *Maturitas*, vol. 64, n°2, 2009, pp. 90-96.
- [CAM 04] CAMPO E., CHAN M., « Diagnostic system based on learning habits in high-risk situations for the elderly », *10th Intern. Conf. on Information Systems Analysis and Synthesis*, Orlando, Floride (USA), 2004, pp. 364-368.

- [CAM 08] CAMPO E., BONHOMME S., ESTÈVE D., GUENNEC J., « Help to monitoring of elderly by using physical activities criteria », *6th International Conference of International Society for Gerontechnology – ISG'08*, Pise, Toscane, Italie, 4-7 Juin 2008.
- [CAM 10] CAMPO E., CHAN M., BOURENNANE W., ESTÈVE D., « Behaviour monitoring of the elderly by trajectories analysis », *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2010)*, Buenos Aires (Argentine), 2010, pp. 2230-2233.
- [CAM 10] CAMPO E., CHAN M., BOURENNANE W., ESTÈVE D., « Remote monitoring platforms for prevention and detection of elderly deviant behaviour », *3rd International Conference: E-Medical systems*, May 12-14-10 Morocco.
- [KAN 07] KANGAS M., KONTTILA A., WINBLAD.I., JÄMSÄ T., « Determination of simple thresholds for accelerometry-based parameters for fall detection », *Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Cité Internationale, Lyon, France, August 23-26, 2007
- [NAV 09] NAVARRO-ALVAREZ E., SILLER M., « A Node Localization Scheme for Zigbee-based Sensor Networks », *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Antonio, Tx, USA – October 2009
- [PAM 06] PAMMOLLI F., RICCABONI M., OGLIALORO C., MAGAZZINI L., BAI0 G., SALERNO N., « Medical devices competitiveness and impact on public health expenditure », Study prepared for the Directorate Enterprise of the European Commission- CERM- University of Florence, July 2005.
- [TSU 10] TSUJI J., KAWAMURA H., SUZUKI K., IKEDA T., SASHIMA A., KURUMATANI K., « ZigBee based indoor localization with particle filter estimation », *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on*, Istanbul, 10-13 Oct. 2010
- [WEN 10] WEN-HSING K., YUN-SHEN C., GWEI-TAI J., TAI-WEI L., « An intelligent positioning approach: RSSI-based indoor and outdoor localization scheme in ZigBee networks », *Proceedings of the Ninth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Qingdao, 11-14 July 2010
- [VAR 05] VARSHNEY .U, « Pervasive Healthcare: Applications, Challenges and Wireless Solutions », *Communications of the Association for Information Systems*, VOL. 16, No. 1, 2005, p. 3.
- [ZIG 05] ZigBee Alliance, ZigBee Specification, ZigBee Document 053474r06, version 1.0 (2005) - <http://www.zigbee.org>