

Réseaux Évidentiels pour la fusion de données multimodales hétérogènes : Application à la détection de chutes

PAULO A. CAVALCANTE A.¹, JÉRÔME BOUDY¹, DAN ISTRATE², BERNADETTE DORIZZI¹, JOÃO C. M. MOTA³

¹ Département d'Electroniques et Physique, Telecom SudParis
9 rue Charles Fourier, 91011 Evry Cedex, France

² ESIGETEL

33 rue Victor Hugo, 94800 Villejuif, France

³ Département d'Ingénierie de Téléinformatique, Université Fédérale du Ceará (UFC)
Campus do PICI S/N, Bloco 725, C.P. 6007, 60455-970, Fortaleza, Brésil

¹Paulo.Cavalcante@telecom-sudparis.eu, Jerome.Boudy@telecom-sudparis.eu, Bernadette.Dorizzi@telecom-sudparis.eu

²Dan.Istrate@esigetel.fr

³Mota@gel.ufc.br

Résumé - Ces travaux de recherche se sont déroulés dans le cadre du développement d'une application de télévigilance médicale ayant pour but de détecter des chutes à travers l'utilisation de plusieurs types de capteurs possédant différents degrés d'imperfection et de confiance. Parmi les techniques de fusion multi-capteurs, les méthodes crédibilistes fondées sur les fonctions de croyance de Dempster-Shafer sont actuellement considérées comme les plus adaptées à la représentation et au traitement des informations imparfaites. En nous appuyant sur une représentation graphique de la théorie de Dempster-Shafer appelée Réseaux Évidentiels, nous proposons dans ces travaux une structure de fusion de données hétérogènes issues de plusieurs capteurs afin de maximiser les performances de détection automatique de chutes et ainsi de rendre le système plus fiable. La non-stationnarité des signaux recueillis sur les capteurs du système de télévigilance, telles que la présence de bruit de mesure, la variabilité des signaux enregistrés par les capteurs, les capteurs défaillants ou non fiables, peuvent rendre les Réseaux Évidentiels incohérents dans leurs décisions. Afin de compenser les effets résultant de cette la non-stationnarité, les Réseaux Évidentiels sont rendus évolutifs dans le temps, ce qui nous a conduits à introduire les Réseaux Evidentiels Dynamiques dans nos traitements et à les évaluer sur des scénarios de chute simulés correspondant à des cas d'usage variés.

Abstract - This work took place in the development of a remote home healthcare monitoring application designed to detect fall situations through several types of sensors which have different degrees of imperfection and trust. Among the multi-sensor fusion techniques, belief methods based on Dempster-Shafer Theory are currently considered as the most appropriate for the representation and processing of imperfect information. Based on a graphical representation of the Dempster-Shafer called Evidential Networks, a structure of heterogeneous data fusion from multiple sensors has been proposed in this work in order to maximize the performance of automatic fall detection and thus make the system more reliable. The sensors signals non-stationarity such as the presence of noise, the variability of signals recorded by the sensors, the failing or unreliable sensors may make Evidential Networks inconsistent in their decisions. In order to compensate the sensors signals non-stationarity effects, the time evolution is taken into account by introducing the Dynamic Evidential Networks which was evaluated by the simulated fall scenarios corresponding to various use cases.

1 Introduction

La population âgée est en forte croissance depuis ces dernières décades. Cette population âgée devient de moins en moins autonome et plus exposée à des risques d'accidents domestiques, notamment des cas de chutes à l'intérieur des habitations. Ce problème intéresse particulièrement les chercheurs dans le domaine des technologies de télésanté.

Les recherches sur les systèmes de détection de chute ont été largement développées dans les domaines des accéléromètres embarqués, de la vision, de la robotique et des systèmes multi-capteurs comme le système de télévigilance multimodale [7-8] développé par l'équipe INTERMEDIA de Télécom SudParis.

Dans le cadre de la fusion multi-capteurs, les méthodes Bayésiennes [17] et les méthodes credibilistes telles que

la théorie de Dempster-Shafer (DST) [1, 2], sont couramment utilisées pour traiter les degrés d'imperfection sous la forme d'incertitude dans le processus de fusion. Ces théories peuvent s'utiliser avec des représentations graphiques : Réseaux Bayésiens [16] et Réseaux Évidentiels Statiques (RES) [4-7].

L'introduction des réseaux Bayésiens pour la représentation des connaissances et l'inférence probabiliste a constitué une étape importante dans le développement de systèmes experts. Cependant, une des limitations des réseaux Bayésiens comme formalisme pour traiter l'incertitude, réside dans le fait que l'on doit faire l'hypothèse que toutes les données (connaissance du domaine, évidences accumulées) peuvent être représentées par des fonctions de probabilité. En réalité, ce n'est pas toujours possible, si la quantité de données est insuffisante.

L'application de classifieurs Bayésiens au contexte de la Télévigilance dépend de la disponibilité d'une base de données suffisamment représentative pour modéliser les situations de détresse visées (chute, tachycardie, ...), d'une façon fiable. La modélisation d'une personne qui chute est une tâche de grande complexité. Chaque personne est caractérisée par une manière de chuter qui peut se faire de plusieurs façons, en particulier les cas de chutes molles (avec un faible impact) qui sont difficiles à détecter. Les bases de données de chutes sont actuellement limitées à cause du manque d'enregistrements réalisés en situations réelles.

De ce fait, nous proposons dans ces travaux un modèle de fusion des systèmes de Télévigilance RFPAT et GARDIEN fondé sur les Réseaux Évidentiels Statiques (RES_{RG}) [7] pour la détection de chute, en se concentrant sur la détection des chutes molles. Les Réseaux Évidentiels sont des graphes acycliques orientés similaires à des réseaux Bayésiens mais au lieu d'utiliser des fonctions de probabilité, nous utilisons des fonctions de croyance. Ce réseau est en effet approprié parce que, d'une part, il a la capacité de traiter l'imperfection des données, souvent sous la forme d'incertitude, d'imprécision et de conflit, des classifieurs de diverses natures en mettant en œuvre des mécanismes d'inférence directe sur les observations d'entrée telles que les données actimétriques (mouvement, la posture) et de données vitales (fréquence cardiaque et chute). Par ailleurs, il évite une estimation non fiable des modèles statistiques dû à l'absence de base de données de chutes en conditions réelles comme souligné plus haut.

La non-stationnarité des signaux recueillis sur les capteurs du système de télévigilance, et engendrée par le bruit, de la variabilité des signaux, des capteurs défaillants ou non fiables, peut rendre les RES incohérents dans leurs décisions. Afin de compenser les effets résultant de la non-stationnarité de ces signaux, les RES sont rendus évolutifs dans le temps, ce qui nous a conduits à introduire les Réseaux Evidentiels Dynamiques (RED) [13]. Basé sur des approches dynamiques, telles que le Filtre de Croyance Temporelle (*Temporal Belief Filter, TBF*) [14], les RED sont des RES adaptatifs capables de modéliser et d'analyser l'influence du temps et de l'incertitude sur la dégradation du système.

Dans ce travail, nous cherchons à rendre le système monomodal GARDIEN capable de détecter des chutes dans des situations où le système de RFPAT n'est pas disponible (non port du terminal). Pour cela, nous proposons un RED [15], basé sur l'application du Filtre de Croyance Temporel à la sortie du RES composé du système GARDIEN seul, afin d'assurer la cohérence temporelle des signaux mesurés par les capteurs infrarouges. Cette approche a été évaluée grâce à des scénarios de chutes réelles simulés par des jeunes acteurs.

1.1 Le système de Télévigilance Médical

Mis en œuvre à Télécom SudParis avec la collaboration de l'Esigetel [11] et de l'INSERM-U558 [9], le système de Télévigilance Médicale [7,8] étudié dans ces travaux est composé de trois modalités : GARDIEN [9]

(capteur de signaux de mouvement, de posture et de localisation), RFPAT [10] (capteur de signaux de mouvement, de posture, de pouls et de chute) et ANASON [11] (capteur de signaux sonore). Dans ces travaux d'application des Réseaux Évidentiels, nous n'utilisons que deux de ces modalités: GARDIEN et RFPAT. Il reste encore à réaliser une étude sur la pertinence des informations sonores pour la détection de la chute. De ce fait, la modalité ANASON est prévue pour nos futurs travaux.

2 Les Réseaux Évidentiels

De façon analogue aux Réseaux Bayésiens, la théorie de Dempster-Shafer [1,2] peut être mise en œuvre dans une représentation graphique acyclique orientée appelée Réseau Évidentiel [4-7]. Les Réseaux Evidentiels sont destinés à représenter et traiter les informations imparfaites issues des systèmes complexes (multi-sources). Un Réseau Évidentiel est basé sur un raisonnement ontologique décomposant l'espace des hypothèses dans un arbre de décision. Il est défini par : $G = ((N, A), M)$, où (N, A) représente le graphe avec N l'ensemble de nœuds, A l'ensemble des arcs et M l'ensemble de masses associées à chaque nœud. Quand un nœud n n'est pas un nœud racine (entrée), c'est-à-dire quand il a des nœuds parents, sa distribution de masses est définie par des opérations évidentielles de propagation [5-7] qui quantifient la relation entre ce nœud et ses parents. Quand un nœud est racine, une table des masses est définie à partir d'une étape d'affectation des fonctions de masse [7].

2.1 Le Réseau Évidentiel pour la détection de chutes

Le système de Télévigilance Médicale [7,8], RFPAT et GARDIEN, fournissent des informations redondantes et complémentaires et leur fusion peut nous fournir des mesures plus fiables par rapport aux systèmes utilisés séparément.

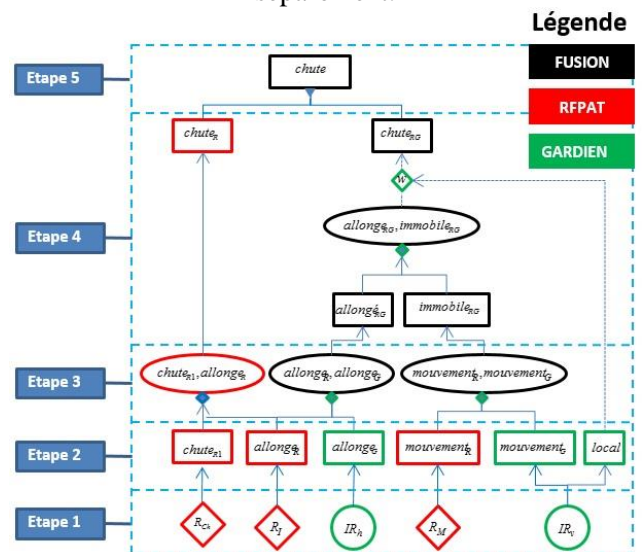


Figure 1 : Réseau Évidentiel proposé pour l'inférence d'activités de chute de la personne.

Le but de la fusion est de permettre au système existant RFPAT de détecter, dans des situations très spécifiques et difficiles, le cas de chute molle. En effet nous rappelons que le système RFPAT seul présente une bonne sensibilité de détection de chutes estimée lors d'évaluations

en milieu hospitalier. Nous proposons donc de le fusionner avec les informations contextuelles issues du système GARDIEN, c'est-à-dire, l'ensemble des informations observées dans l'habitat.

S'appuyant sur les travaux de [5,6], qui ont proposé un Réseau Évidentiel pour la reconnaissance d'activités dans des environnements de type "Smart Home", nous proposons dans cette section un modèle de fusion des systèmes de Télévigilance RFPAT et GARDIEN fondé sur les Réseaux Évidentiels Statiques (RES_{RG}) [7], illustré en Figure 1. Le Réseau Évidentiel proposé permet d'introduire un modèle de fusion sous la forme d'un arbre de décision pour la détection de chutes.

Les informations actimétriques et contextuelles extraites des différentes modalités de Télévigilance RFPAT (nœuds en couleur rouge) et GARDIEN (nœuds en couleur verte) sont illustrées en Figure 1. La fusion entre les deux systèmes est représentée par les nœuds en couleur noire. Les données binaires brutes issues des capteurs infrarouges du système GARDIEN, représentées par les nœuds circulaires, et les données post-traitées issues du système RFPAT, représentées par les nœuds en losange, sont les évidences d'entrée de ce réseau. Les nœuds carrés représentent les informations contextuelles (la localisation de la personne représentée par le nœud "local"), les nœuds rectangulaires représentent les activités (mouvement, posture et chute) et les nœuds elliptiques représentent les activités composées.

2.2 Processus d'inférence du réseau

La hiérarchie et les liaisons entre les nœuds du réseau établissent des relations de dépendance à plusieurs niveaux entre les systèmes RFPAT et GARDIEN. Les Opérations Évidentielles représentent les relations de compatibilité entre les espaces de discernement appartenant aux nœuds du réseau. De cette manière cela permet la propagation des croyances vers les nœuds du réseau. Les étapes du processus d'inférence du RES_{RG} sont résumées comme suit et détaillées en [7].

Etape 1) Affectation des fonctions de masses : Pour l'inférence de l'état de la personne surveillée dans ce Réseau Évidentiel, initialement une *étape d'affectation de masses* est établie à partir de l'interprétation des valeurs mesurées par les capteurs. Nous avons utilisé ici des hypothèses basées sur les valeurs de sensibilité et de spécificité fournies par les fabricants.

Etape 2) Transfert des fonctions de masses : Dans cette étape les distributions de croyance des nœuds d'entrée sont interprétées et transférées aux nœuds compatibles à travers l'opération évidentielle "multivalued mapping" [5-7] afin de donner un premier niveau sémantique aux informations mesurés par les capteurs.

Etape 3) Fusion des informations redondantes : Dans les nœuds composés une nouvelle distribution de croyance est créée à partir des distributions de croyances de nœuds redondants à l'aide de l'opération évidentielle *somme pondérée* [5-7], permettant de lever le doute, d'augmenter la fiabilité et de diminuer l'incertitude des estimations inférées par le réseau.

Etape 4) Fusion des informations complémentaires : La fusion d'informations complémentaires nous permet de générer une nouvelle information dans le réseau ne pouvant être obtenue séparément avec chacun des capteurs. Pour cela les opérations évidentielles *somme pondérée* et "evidential mapping" [5-7] sont utilisées.

Etape 5) Règle de combinaison de Dempster-Shafer : Afin d'aboutir au consensus final entre les distributions de croyances inférées à l'étape 4 par les systèmes RFPAT et GARDIEN, et ainsi de lever le doute, d'augmenter la fiabilité et de diminuer l'incertitude des estimations inférées par le réseau, la règle de combinaison de Dempster-Shafer [5-7] permet d'obtenir une nouvelle distribution de croyance qui représentent les croyances relatives à l'état inféré de la personne surveillée : non-chute ou chute.

3 Réseaux Évidentiels Dynamiques

Le modèle de fusion des systèmes RFPAT et GARDIEN basé sur les Réseaux Évidentiels Statiques (RES_{RG}) présentée en Section 2 précédente, permet d'une part, de confirmer une chute détectée par le système RFPAT, d'autre part, de détecter les cas de chutes molles, non détectés par le système RFPAT.

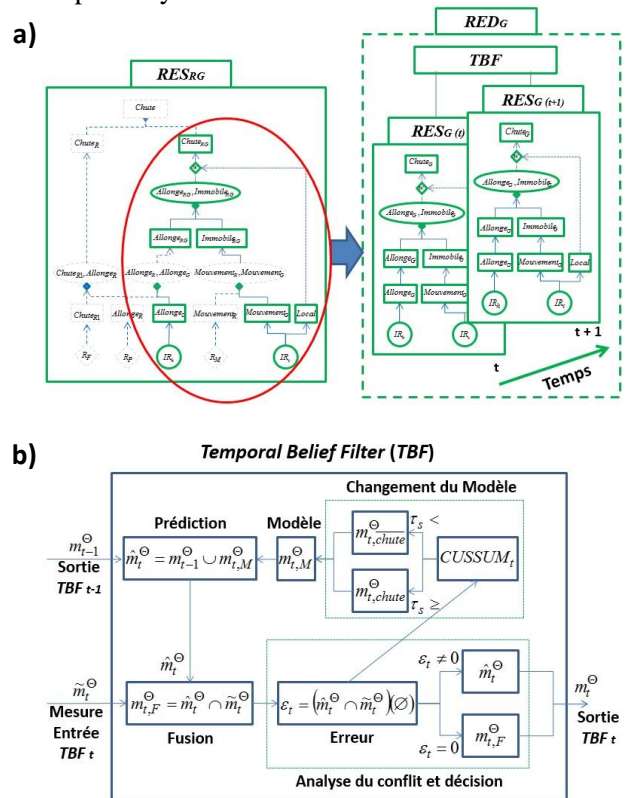


Figure 2 : a) Modèle de fusion GARDIEN basé sur l'Application du modèle TBF ; b) Étapes du modèle TBF

Lorsque le système RFPAT n'est pas présent dans notre système de télévigilance, le système GARDIEN doit être suffisamment autonome pour détecter des situations de chutes de la personne télévigilée. De ce fait, afin d'offrir plus d'autonomie au système GARDIEN et ainsi de compenser les effets résultant de la non-stationnarité des signaux provenant des capteurs infrarouges et de l'influence de capteurs éventuellement défectueux, nous proposons un modèle de fusion GARDIEN par Réseaux Évi-

dentiels Dynamiques (RED_G) [15] fondés sur l'application du modèle appelé Filtre de Croyance Temporelle (*Temporal Belief Filter, TBF*) introduit par Ramasso [14] (Figure 2.a.). Basé sur les modèles de croyances transférables (*Transferable Belief Model, TBM*) [3], le modèle *TBF*, garantit : la *cohérence temporelle* entre deux instants de temps consécutifs à la sortie du réseau, l'*élimination du conflit* issu du processus de fusion, et l'*exclusivité* par rapport à une seule hypothèse à la sortie du réseau permettant d'éliminer au maximum l'incertitude et l'imprécision.

Le modèle *TBF*, représenté dans la Figure 2.b, se résume en quatre étapes : la *prédiction*, la *fusion*, la *détection de conflit* et le *changement du modèle*.

4 Évaluations, Résultats, Conclusions et Perspectives

Les modèles de fusion RES_{RG} et RED_G proposés dans ces travaux sont évalués sur les bases de données enregistrées à Telecom SudParis. Ces bases sont composées de scénarios simulés ayant des situations normales (5 scénarios) et anormales (33 scénarios de chute, dont 16 chutes dures et 17 chutes molles). Le modèle de fusion RES_{RG} proposé est alors évalué par rapport au système RFPAT seul, a atteint une sensibilité globale de détection de chutes de 94%. Les Réseaux Évidentiels pour la détection de chutes semblent dès lors prometteurs pour l'amélioration de détection de chutes particulières, les chutes molles non détectées par le système RFPAT. Ce type de réseau est en effet approprié à notre problématique d'une part, parce qu'il nous fournit un modèle basé sur l'expertise humaine, en réponse au manque de données dans des situations réelles de chutes empêchant l'apprentissage statistique de modèles fiables. D'autre part, car il a la capacité de traiter et fusionner des données issues de plusieurs modalités hétérogènes.

Afin d'évaluer l'autonomie du système GARDIEN pour la détection de chutes, dans des cas où le système RFPAT n'est pas présent dans notre modèle de fusion, une comparaison des performances entre les modèles RED_G et RES_{RG} est proposée. De ce fait, le RED_G a été évalué sur les mêmes bases données de chutes utilisées pour les évaluations du RES_{RG} . Dans les premières expériences réalisées, le modèle RED_G semble dès lors suffisamment autonome pour la détection de chutes en général (dures et molles), présentant une sensibilité de 97% et une spécificité de 80%. Un des avantages de l'utilisation des RED est d'éviter des incohérences au niveau de la décision du RES et ainsi pouvoir détecter des chutes lorsque la personne ne porte pas le terminal ambulateur portable RFPAT. Un autre avantage est de pouvoir détecter des chutes avec le système GARDIEN seul qui est très peu intrusif et peut être installé dans toute l'habitation. Cependant certains cas de fausses alertes sont constatés lors de situations d'immobilité de la personne entraînant une baisse de la spécificité du système. La fusion avec le système RFPAT pourrait ici lever le doute et éviter certaines fausses alertes.

Pour nos travaux futurs nous proposons de travailler plus particulièrement dans deux directions : l'*extension*

du réseau à des cas de détresses diverses et l'*adaptativité du réseau* basée sur les algorithmes dynamiques permettant à la fois d'adapter leurs paramètres (poids et fonctions de masses) en fonction des signaux des capteurs présents et de conférer à leur architecture graphique une aptitude à se reconfigurer, visant à optimiser le processus même de fusion. Une comparaison plus complète et systématique des approches statistiques et dynamiques est également envisagée.

5 Remerciements

Ces travaux sont financés par CNPQ (*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*) dans le cadre du programme de mobilité brésilien *Ciências sem Fronteiras* et par le projet European FP7 CompanionAble (www.companionable.net).

6 Références

- [1] A. P. Dempster, "Upper and Lower Probabilities Induced by Multivalued Mapping", *Annals of Mathematical Statistics*, p. 325–339, 1967.
- [2] G. Shafer, *A mathematical theory of evidence*, vol. 1. Princeton university press Princeton, 1976.
- [3] P. Smets and R. Kennes, "The transferable belief model", *Artificial intelligence*, vol. 66, n° 2, p. 191–234, 1994.
- [4] C. Simon and P. Weber, "Evidential networks for reliability analysis and performance evaluation of systems with imprecise knowledge", *Reliability, IEEE Transactions on*, vol. 58, n° 1, p. 69–87, 2009.
- [5] H. Lee, J. S. Choi, and R. Elmasri, "Sensor data fusion using dsm theory for activity recognition under uncertainty in home-based care", in *Advanced Information Networking and Applications, 2009. AINA'09. International Conference on*, 2009, p. 517–524.
- [6] X. Hong, C. Nugent, M. Mulvenna, S. McClean, B. Scotney, and S. Devlin, "Evidential fusion of sensor data for activity recognition in smart homes", *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, n° 3, p. 236–252, 2009.
- [7] P. A. A. Cavalcante, J. Boudy, D. Istrate, H. Medjahed, B. Dorizzi, J. C. Mota, J.-L. Baldinger, T. Guettari, and I. Belfeki, "Evidential Network-Based Multimodal Fusion for Fall Detection", *International Journal of E-Health and Medical Communications (IJEHMC)*, vol. 4, no 1, pp. 46–60, 2013.
- [8] H. Medjahed, "Distress situation identification by multimodal data fusion for home healthcare telemonitoring", Institut Mines Télécom SudParis, 2010.
- [9] F. Steenkeste, H. Bocquet, M. Chan, and B. Vellas, "Remote monitoring system for elders in a geriatric hospital", in *Promoting Independence & Quality of Life for older persons: an international conference on aging Arlington*, 1999, p. 2–4.
- [10] J.-L. Baldinger, J. Boudy, B. Dorizzi, J.-P. Levrey, R. Andreao, C. Perpère, F. Delavault, F. Rocaries, C. Dietrich, and A. Lacombe, "Telesurveillance System for Patient at Home: the MEDIVILLE system", in *Computers Helping People with Special Needs*, Springer, 2004, p. 400–407.
- [11] D. Istrate, E. Castelli, M. Vacher, L. Besacier, and J.-F. Serignat, "Information extraction from sound for medical telemonitoring", *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, vol. 10, no 2, p. 264–274, 2006.
- [12] M.-H. Masson, "Apports de la théorie des possibilités et des fonctions de croyance à l'analyse de données imprécises", Université de Technologie de Compiègne, 2005.
- [13] P. Weber and C. Simon, "Dynamic evidential networks in system reliability analysis: A Dempster Shafer approach", in *Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on*, 2008, p. 603–608.
- [14] E. Ramasso, M. Rombaut, and D. Pellerin, "A temporal belief filter improving human action recognition in videos", in *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings. 2006 IEEE International Conference on*, 2006, vol. 2, p. II–II.
- [15] P. A. A. Cavalcante, "Réseaux Évidentiels pour la fusion de données multimodales hétérogènes : Application à la détection de chutes", Institut Mines Télécom SudParis, 2012.
- [16] D. Bellot, "Fusion de données avec des réseaux bayésiens pour la modélisation des systèmes dynamiques et son application en télé-médecine", Université Henri Poincaré, 2002.
- [17] Kittler, J., Hatef, M., Duin, R.P.W., Matas, J., "On combining classifiers", *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 20, no 3, pp. 226–239, 1998.