
Elaboration de fonctions de croyance à partir de données GPS et SIG.

Etude de stratégies de fusion pour la localisation d'un véhicule.

Maan E. El Najjar* — Véronique Cherfaoui* — Philippe Bonnifait*
— Cyril Royère**.

* Laboratoire Heudiasyc, UMR 6599
CNRS/Université de Technologie de Compiègne
Département Génie Informatique
BP 20529, 60205 Compiègne Cedex
{prenom.nom}@hds.utc.fr

** LIVIC, Unité mixte INRETS - LCPC
13, route de la Minière, Bâtiment 140, SAtoy
78000 - Versailles
cyril.royere@inrets.fr

RÉSUMÉ. Positionner un véhicule automobile sur une carte numérique est une fonction essentielle pour utiliser les informations contenues dans la base de données par l'intermédiaire d'un Système d'Information Géographique (SIG). Si on utilise un récepteur GPS (Global Positioning System), la mise en correspondance de ses mesures avec les données du réseau routier de la base est une étape préalable à la localisation. Cette étape consiste à sélectionner le segment sur lequel le véhicule se trouve. Dans cet article, deux méthodes sont présentées. Elles sont basées sur une fusion multi-critère (distance, cap et vitesse) selon la théorie des croyances. Une attention particulière a été apportée à l'élaboration de fonctions de croyance à partir des données SIG et GPS. Des résultats expérimentaux, réalisés avec un GPS différentiel et une carte numérique précise, illustrent et permettent une comparaison des performances que l'on peut atteindre avec ces approches.

ABSTRACT. To localise a motor vehicle on a digital map by using a Geographical Information System (GIS) and a GPS receiver, the map matching of the estimated position with the road data base is necessary. This stage consists in selecting the segment on which the vehicle is located. In this article, two methods are presented. They are based on a multi-criterion fusion (distance, heading and velocity) using Belief Theory. A special attention is given to the development of Belief Functions from real measurements. Experimental results, carried out with a differential GPS and an accurate digital map, illustrate and allow a comparison of the performances reached with these approaches.

MOTS-CLÉS : Localisation, Mise en correspondance, Théorie des croyances, GPS, SIG.

KEYWORDS : Vehicle localization, Map matching, Belief theory, GPS, GIS.

1. Introduction

Pour l'assistance à la conduite automobile, les capteurs de perception, tels que les radars ou lidars, ont fait de grandes avancées ces dernières années, à tel point qu'il est possible d'élaborer, en temps réel, une représentation locale de la situation du véhicule sur la route et par rapport aux autres véhicules. Cependant, ces capteurs ont une zone d'auscultation limitée à cause, notamment, de leur domaine de balayage borné et à cause de la géométrie du réseau routier. Par exemple, un système de détection d'obstacle a ses performances considérablement réduites quand la voiture entre dans un virage serré ou se trouve en haut d'une côte. L'utilisation d'une carte numérique précise et d'un récepteur GPS est une solution pour avertir avec anticipation le conducteur de situations potentiellement dangereuses souvent situées en dehors de son champ de vision.

Le problème de la localisation du véhicule sur le réseau routier extrait d'une base de données géographiques est donc fondamental. Ce problème peut se formuler comme suit : connaissant une estimation de la position donnée par le récepteur GPS, il faut rechercher dans la base de données le segment sur lequel se situe le véhicule, si ce segment existe. En effet, le véhicule n'est pas forcément sur une route et même s'il est sur une route, cette route peut ne pas être représentée dans la base de données.

Classiquement, on commence par présélectionner tous les segments qui ont une intersection non nulle avec un pavé ou un disque de recherche selon la fonctionnalité proposée par le Système d'Information Géographique (SIG). Ensuite, il s'agit de sélectionner le segment à partir du sous-ensemble obtenu (cf. figure 1). Cette sélection (également connue sous le nom de "réduction de routes" (Taylor, 2000)) est en pratique assez compliquée. En effet,

- la position du point de recherche est estimée avec des erreurs qui peuvent, en plus, être aggravées par les effets de multi-trajets des ondes des signaux GPS. En outre, la transformation de passage entre les coordonnées 3D WGS84 (GPS) et les coordonnées planes de la carte (coordonnées Lambert en France) est approximative et variable en fonction de l'endroit où l'on se situe (erreurs dues à la projection conique)

- les coordonnées des segments sont entachées d'erreurs dues aux relevés des cartographes et aux arrondis des coordonnées en nombres entiers,

- le réseau routier de la base de données n'est pas toujours en accord avec la réalité, c'est-à-dire qu'il peut contenir des linéaires qui n'existent plus réellement ou bien de nouveaux tronçons ne sont pas encore dans la base,

- le fond de carte ne contient pas tous les détails des routes. Par exemple, tout rond-point de diamètre inférieur à 25 m est (sauf exception) représenté de façon dégénérée par un point,

- le déplacement du véhicule se fait sur une surface 3D alors que la carte représente une vue plane,

- le véhicule ne roule pas exactement sur le "linéaire" représentant la route.

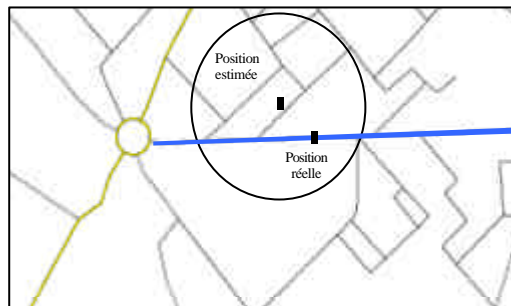


Figure 1. *Le problème de sélection de segments.*

Compte tenu des remarques précédentes, la solution du problème peut être vide (le véhicule n'est pas sur une route de la base de données), un segment, ou plusieurs segments. Dans ce dernier cas, on parle de situation ambiguë. Plus la carte est détaillée, c'est-à-dire plus les segments sont courts, et plus le positionnement GPS est imprécis, plus les situations ambiguës sont nombreuses.

Si on exclut les méthodes utilisant un itinéraire pré calculé, les travaux les plus anciens prenant explicitement en compte les erreurs de la cartographie et des capteurs sont ceux de (Kim *et al.*, 1996). Ces méthodes sont assez heuristiques et parfois peu fiables. Des méthodes purement géométriques (Christopher *et al.*, 2000) apportent une meilleure robustesse mais sans quantification de la confiance accordée au résultat. Dans (Scott, 94) et (Bétaille *et al.*, 2000), des méthodes statistiques sont utilisées. Une solution standard consiste à mettre à profit l'historique des étapes précédentes, c'est-à-dire que la mise en correspondance de l'étape « k » est utilisée pour faciliter la mise en correspondance « k+1 » (Zhao, 1997). L'inconvénient majeur qui en découle est qu'une erreur de mise en correspondance peut avoir des répercussions sur un nombre arbitrairement grand d'étapes successives. Cela peut arriver, par exemple, dans le cas de deux routes parallèles et proches. Pour les applications d'aide à la conduite automobile que nous envisageons, une mauvaise mise en correspondance persistante n'est pas acceptable. Au contraire, si la situation est ambiguë, le système de positionnement doit l'indiquer. Ainsi, dans cet article, le processus de mise en correspondance est considéré sans effet mémoire.

Le travail présenté par la suite expose deux méthodes de sélection de segments de la base de données routière. Elles sont basées sur la fusion de plusieurs critères de sélection selon la théorie des croyances, l'une portant un jugement local (El Najjar, 2002) et l'autre global (Royère, 2002). Les fonctions d'attribution de masse de croyance, communes aux deux approches, ont été particulièrement soignées de façon à quantifier de façon fine les imprécisions et les incertitudes.

L'article est organisé comme suit. Le paragraphe 2 présente le cadre général, les sources d'information et les modèles utilisés pour élaborer les fonctions d'attribution de croyance à partir des mesures GPS et des données de la base. Les étapes de combinaison des masses et les stratégies de décision font l'objet du paragraphe suivant. Dans la méthode globale, l'origine du conflit issu des combinaisons est

mémorisée de façon à en tenir compte lors de la phase de décision. Les deux approches sont illustrées sur un cas simple comportant peu de segments. Enfin, des résultats obtenus sur des données réelles enregistrées avec le véhicule du laboratoire illustrent les performances de ces méthodes sur deux séquences particulières : la sortie d'une route 2x2 voies et le cas d'une voiture ne se situant pas sur une route cartographiée.

2. Théorie des croyances et stratégie d'attribution des fonctions de masses

L'incertitude sur une hypothèse représente le doute sur son existence réelle ou sur sa validité. L'imprécision représente l'erreur associée à une donnée fournie par une source d'information (par exemple un capteur) par rapport à la valeur vraie idéale. Elle modélise simplement une partie de l'imperfection du moyen de perception. On peut interpréter l'imprécision comme une évaluation de l'aspect quantitatif de cette imperfection et l'incertitude comme une représentation de l'aspect qualitatif.

Quelques soient les données à traiter, leur précision et leur certitude seront toujours limitées par les caractéristiques des capteurs les fournissant. Malgré ce manque d'exactitude des mesures, on est amené souvent à prendre une décision. Pour que cette décision soit rationnelle et cohérente, il faut prendre en compte ces imprécisions et incertitudes.

La théorie des croyances permet de représenter aussi bien des informations riches que des informations pauvres. La stratégie de l'affectation des masses est souvent très dépendante du problème traité et peut aussi bien utiliser une représentation probabiliste, une représentation floue ou simplement une grandeur physique comme par exemple une distance ou un angle. Ainsi, nous avons consacré une grande attention à l'élaboration des fonctions d'attribution des masses.

Soit un problème visant à rechercher le(s) segment(s) crédible(s) parmi L segments candidats $Seg_1, Seg_2, \dots, Seg_L$ (après le filtre de présélection).

Le cadre de discernement est $\Theta = \{S_1, S_2, \dots, S_L, S_*\}$ où

- S_i est l'hypothèse : « le segment Seg_i est le segment sur lequel se situe le véhicule »
- S_* est l'hypothèse « le véhicule roule sur une route non cartographiée ».

Le référentiel de définition déduit du cadre de discernement est :

$$2^\Theta = \{\emptyset, S_1, \dots, S_m, \dots, S_*, S_1 \cup S_2, \dots, S_1 \cup S_*, \dots, S_1 \cup S_2 \cup S_m, \dots, \Theta\}$$

Où par simplification de notation $S_1 \cup S_2 = \{S_1, S_2\}$ et

$$\Theta = \{S_1, S_2, \dots, S_L, S_*\} = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_L \cup S_*.$$

Pour chaque segment, on définit une distribution de masses sur le sous-ensemble du référentiel de définition : $N_i = \{S_i, \bar{S}_i, \Theta\}$ $i \in \{1, \dots, L\}$

Où $\bar{S}_i = \bigcup_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^L S_k \cup S_*$ est la proposition : « le véhicule peut se situer sur d'autres

segments sélectionnés ou est sur une route non cartographiée » et où Θ est la proposition : « ce critère ne sait pas ».

Cette façon d'affecter les masses est connue sous le nom de « separate sources » (Appriou, 1999)(Denoeux, 1998) et nous l'appellerons « attribution de masses spécialisées ».

Dans la théorie des croyances, une fonction de croyance (ou de masse ou « mass function » ou encore « basic probability assignment ») est une fonction qui attribue des masses de croyance à toutes les propositions de N_i tel que la somme des masses soit unitaire.

2.1. Elaboration de fonctions d'attribution de croyance

Compte tenu des applications considérées, on envisage de n'utiliser que des critères géométriques car ils ne sont pas assujettis à l'erreur humaine.

Les deux critères mis en œuvre dans cet article peuvent être formulés comme suit :

- 1- plus un linéaire est proche de la position estimée, plus il est crédible et inversement,
- 2- plus un linéaire est colinéaire au cap du véhicule, plus il est crédible et inversement.

On remarquera que les critères sont entachés d'erreur et qu'ils peuvent être contradictoires.

Pour élaborer chaque attribution de masse ($m_{j,i}$), nous considérons la position GPS, un segment (Seg_i) et un critère (C_j). Nous proposons de prendre en compte l'imprécision des différentes sources d'information (GPS et base de données) et de considérer des phénomènes physiques comme, par exemple, une voiture à 130 Km/h ne peut être orthogonale à l'axe de la route.

Par ailleurs, de façon à anticiper les performances futures des systèmes de positionnement par satellites (GPS, Galiléo ou GLONASS), un récepteur GPS différentiel a été utilisé. Sa précision peut être métrique avec plus de 5 satellites en vue dans une bonne configuration. De la même façon, une carte précise «Géoroute V2» de l'Institut de Géographie National (IGN) a été utilisée. La précision relative de cette base de données est meilleure que 5 mètres, en zone urbaine.

2.2. Critère de Proximité

Le critère de proximité est basé essentiellement sur la mesure de la distance euclidienne entre la position estimée et chacun des segments candidats prélevés dans la base de données.

L'erreur d'estimation de la position est quantifiée par une ellipse d'équiprobabilité produite par le récepteur GPS (trame NMEA *GST*). La position estimée « E » se situe au centre de l'ellipse. Nous considérons des ellipses à 99% de chance de contenir la bonne valeur (sous hypothèse de distribution Normale).

Pour attribuer une masse à un segment candidat $[P_1P_2]$, la procédure est la suivante :

Notons « d » la distance du segment au point E : $d = \|\vec{EP}\| = d_{EP}$. Le point P' se situe à l'intersection de la droite (EP) et de l'ellipse (cf. figure 2). La distance « $d_{EP'}$ » dépend de l'angle β que fait le vecteur $\vec{EP'}$ dans le repère propre de l'ellipse.

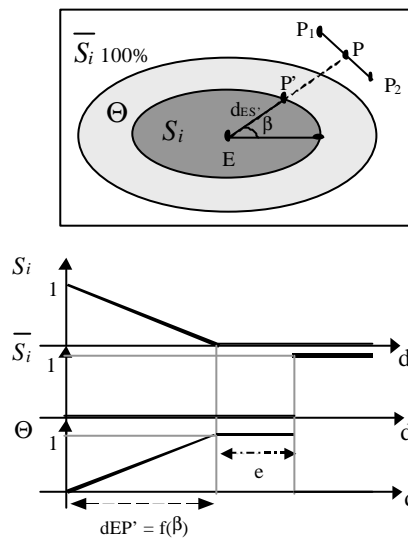


Figure 2. Affectation des masses pour le critère de proximité.

Pour quantifier le degré d'appartenance à l'ellipse d'erreur de position dans la zone $d < d_{EP'}$, on effectue une modélisation floue obtenue par transformation probabilité-possibilité (Lassere, 1997). La courbe supérieure de la figure 2 traduit la fonction suivant laquelle on affecte une masse à l'hypothèse S_i . En prenant le complément à un de la masse de S_i , on attribue une masse à la proposition Θ . Ensuite, la masse de Θ reste constante et unitaire entre $d_{EP'} < d < d_{EP'} + e$ pour prendre en compte l'erreur de la carte, l'erreur de la projection Lambert et l'erreur du

changement de coordonnées. Enfin, la masse de la proposition \bar{S}_i suit un échelon qui passe à un lorsque le point n'est pas dans l'ellipse augmentée de l'erreur "e". Ceci traduit le fait que le segment en cours d'analyse a dépassé le seuil limite de sélection.

Le problème devient plus compliqué quand on veut tenir compte de la largeur de la route. Ainsi, nous proposons de modéliser la chaussée par un pavé de largeur "l", centré sur le segment, et de longueur égale à celle du segment.

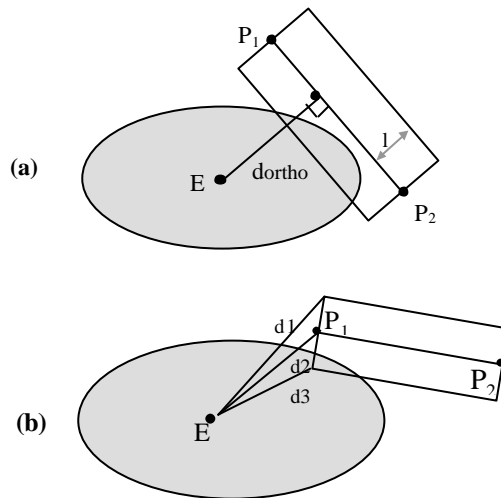


Figure 3. Distance point-pavé pour le critère de proximité.

En toute rigueur, la prise en compte du pavé induit une variation sur **b** et *d*. Pour simplifier les traitements, nous proposons la méthode suivante :

- 1) si la projection orthogonale de *E* existe sur le segment $[P_1P_2]$, $d = dortho - l$ (Figure 3a),
- 2) si la projection orthogonale de *E* n'existe pas sur le segment $[P_1P_2]$, $d = \min(d1, d2, d3)$ (Figure 3b).

2.3. Critère de cap et de vitesse

En pratique, le GPS est fusionné à une localisation à l'estime (odométrie avec les capteurs ABS) par un filtre de Kalman étendu (Bonnifait 2001). Ceci fournit des estimations du cap et la variance de l'erreur, ce qui est pertinent pour la quantification d'un critère angulaire formulé comme suit : « les segments sur lesquels peut se situer le véhicule sont ceux qui ont un angle **a** proche du cap **q** du véhicule, ceci étant d'autant plus vrai que la vitesse est élevée ».

Calculons :

$$Decart = \min(|\mathbf{a}-\mathbf{q}|, |\mathbf{a}-\mathbf{q}+\mathbf{p}|) \text{ avec } \mathbf{q} \in [0, \pi]$$

La figure 4 présente la modélisation floue de la valeur absolue de l'écart de cap du véhicule par rapport à l'angle d'un segment candidat. Cette courbe dépend de deux paramètres :

- 1- la vitesse du véhicule. La valeur q qui fixe l'angle limite, est liée à la vitesse mesurée : $q(v) = p/2 - kv$, avec $k = (4p^9)/Vmax$.
- 2- l'écart type de l'estimation du cap.

On suppose que $q \in [\hat{q} - 3s_q, \hat{q} + 3s_q]$. La valeur m de la figure 4 représente la croyance maximale qu'on peut accorder à l'hypothèse S_i . m varie en fonction de s_q de la façon suivante :

$$m(s_q) = 1 - \frac{6}{p} s_q$$

Ainsi, si l'estimation du cap est très imprécise alors l'hypothèse S_i sera quantifiée à 0.

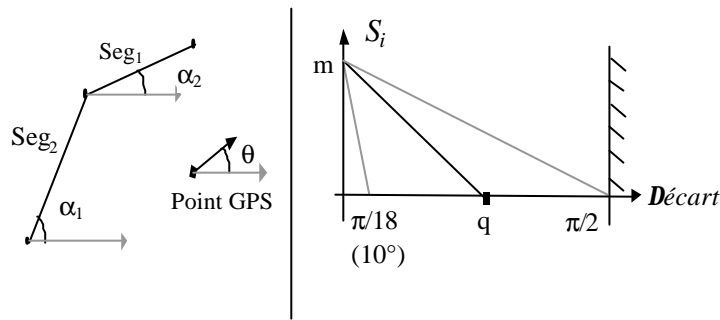


Figure 4. Affectation de la masse du S_i pour le critère de cap et de vitesse.

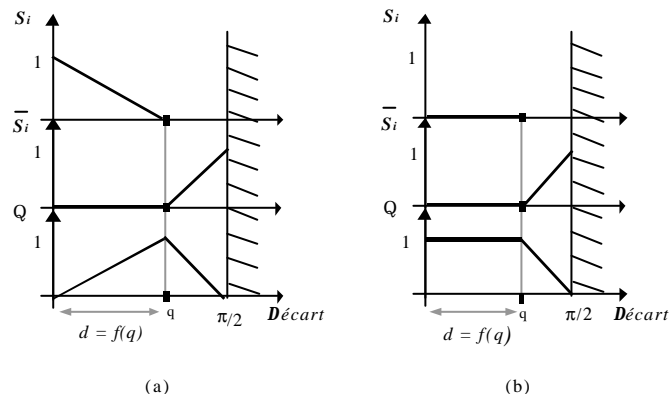


Figure 5. Exemples d'attribution de masses à une vitesse donnée

$$(a) : s_q = 0 \quad (b) : 3s_q = \frac{p}{2}.$$

Pour la masse de Θ , l'affectation se fait en complémentant par rapport à un. La masse de \bar{S}_i commence à partir de l'angle limite toléré pour une vitesse donnée (q) et il atteint m à l'angle $p/2$ (cf. figure 5).

3. Stratégies de fusion et de décision

Le résultat des attributions de masses spécialisées donne, pour une position GPS, un ensemble de distributions de masses $m_{j,i}()$. Rappelons la signification de chacune de ces distributions de masse:

$m_{j,i}(S_i)$: masse sur l'hypothèse : « le segment Seg_i est le segment sur lequel se situe le véhicule selon le critère C_j »

$m_{j,i}(\bar{S}_i)$: masse sur la proposition : « le véhicule peut se situer sur d'autres segments sélectionnés ou sur une route non cartographiée selon le critère C_j »

$m_{j,i}(\Theta)$: masse sur la proposition : « ce critère ne sait pas ».

Pour les 2 critères décrits dans la partie précédente, et pour L segments extraits de la base de données à l'aide du SIG pour une position GPS donnée, on dispose donc de $2 * L$ distributions de masse. Afin d'aboutir à une décision, il est nécessaire de combiner ces distributions.

3.1. Combinaison des distributions de masses

Nous avons choisi de combiner dans un premier temps les distributions de masse qui concernent le même segment. Ce choix est justifié d'une part par la simplicité des calculs et d'autre part, par la possibilité d'appliquer ensuite une décision locale ou globale.

La figure 6 illustre l'ensemble des distributions initiales et la façon dont elles vont être combinées.

L'opérateur de combinaison est un opérateur conjonctif défini dans un cadre général de la façon suivante :

$$m_{1..n}(A) = \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n = A} m_1(B_1).m_2(B_2)....m_n(B_n) \quad (1)$$

$$m_{1..n}(\emptyset) = \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n = \emptyset} m_1(B_1).m_2(B_2)....m_n(B_n) \quad (2)$$

En appliquant cet opérateur à la combinaison de deux critères concernant le même segment on obtient, pour chaque segment Seg_i , la distribution de masse suivante :

$$m_{12,i}(S_i) = m_{1,i}(S_i)m_{2,i}(S_i) + m_{1,i}(S_i)m_{2,i}(\Theta) + m_{1,i}(\Theta)m_{2,i}(S_i)$$

$$m_{12,i}(\bar{S}_i) = m_{1,i}(\bar{S}_i)m_{2,i}(\bar{S}_i) + m_{1,i}(\bar{S}_i)m_{2,i}(\Theta) + m_{1,i}(\Theta)m_{2,i}(\bar{S}_i)$$

$$m_{12,i}(\Theta) = m_{1,i}(\Theta)m_{2,i}(\Theta)$$

$$m_{12,i}(\emptyset) = m_{1,i}(S_i)m_{2,i}(\bar{S}_i) + m_{1,i}(\bar{S}_i)m_{2,i}(S_i)$$

		Segments						
		S ₁	S ₂	S ₃	...	S _i	..	S _L
Critères	C ₁	$m_{1,1}(S_1)$ $m_{1,1}(\bar{S}_1)$ $m_{1,1}(\Theta)$	$m_{1,2}(S_2)$ $m_{1,2}(\bar{S}_2)$ $m_{1,2}(\Theta)$	$m_{1,3}(S_3)$ $m_{1,3}(\bar{S}_3)$ $m_{1,3}(\Theta)$	...	$m_{1,i}(S_i)$ $m_{1,i}(\bar{S}_i)$ $m_{1,i}(\Theta)$	..	$m_{1,L}(S_L)$ $m_{1,L}(\bar{S}_L)$ $m_{1,L}(\Theta)$
	C ₂	$m_{2,1}(S_1)$ $m_{2,1}(\bar{S}_1)$ $m_{2,1}(\Theta)$	$m_{2,2}(S_2)$ $m_{2,2}(\bar{S}_2)$ $m_{2,2}(\Theta)$	$m_{2,3}(S_3)$ $m_{2,3}(\bar{S}_3)$ $m_{2,3}(\Theta)$	...	$m_{2,i}(S_i)$ $m_{2,i}(\bar{S}_i)$ $m_{2,i}(\Theta)$	..	$m_{2,L}(S_L)$ $m_{2,L}(\bar{S}_L)$ $m_{2,L}(\Theta)$
Combinaison		$m_{12,1}(S_1)$	$m_{12,2}(S_2)$	$m_{12,3}(S_3)$	...	$m_{12,i}(S_i)$	..	$m_{12,L}(S_L)$
		$m_{12,1}(\bar{S}_1)$	$m_{12,2}(\bar{S}_2)$	$m_{12,3}(\bar{S}_3)$	...	$m_{12,i}(\bar{S}_i)$	..	$m_{12,L}(\bar{S}_L)$
		$m_{12,1}(\Theta)$	$m_{12,2}(\Theta)$	$m_{12,3}(\Theta)$	...	$m_{12,i}(\Theta)$	..	$m_{12,L}(\Theta)$
		$m_{12,1}(\emptyset)$	$m_{12,2}(\emptyset)$	$m_{12,3}(\emptyset)$	...	$m_{12,i}(\emptyset)$	..	$m_{12,L}(\emptyset)$

Figure 6. Combinaison des masses selon les critères.

En observant ce résultat, on constate que l'on retrouve une distribution de masse sur les sous-ensembles S_i , \bar{S}_i et Θ , mais on a aussi de la masse sur l'ensemble vide $m(\emptyset)$. Cette masse représente la contradiction entre les critères au sujet du segment considéré. Cette masse permet d'exprimer le fait qu'un segment est bien orienté mais loin ou bien qu'un segment est proche mais mal orienté. On pourrait quantifier la croyance de chacune de ces propositions par un raffinement du cadre de discernement. Contrairement à la loi de combinaison de Dempster (Shafer, 1976) (Zadeh, 1986), la masse $m(\emptyset)$ n'est pas automatiquement utilisée pour calculer un facteur de normalisation. En effet, cette masse, parfois non négligeable, sera utilisée dans différentes stratégies de décision.

Ainsi, nous allons présenter dans les deux paragraphes suivants deux stratégies de sélection de segments à partir de l'ensemble des distributions $m_{12,i}$.

La première stratégie de décision est dite locale car elle va appliquer une loi de décision à chacune des fonctions de masse résultant de la combinaison. La décision

est prise en calculant à chaque résultat une crédibilité dite idéale. Cette stratégie est **locale** car elle traite les segments indépendamment les uns des autres.

La seconde stratégie consiste à combiner de nouveau les distributions de masse résultantes puis à appliquer une fonction de décision sur le résultat obtenu. La décision est prise en calculant la probabilité pignistique de chacune des hypothèses. Cette stratégie est dite **globale** car elle s'appuie sur une distribution de masses définie sur l'ensemble des segments considérés.

Chacune de ces stratégies sera illustrée sur la base de deux critères mais elles peuvent intégrer autant de critères et de segments que nécessite l'application.

3.2. Stratégie de sélection locale

La stratégie locale consiste à appliquer une règle de décision à chacune des distributions de masse résultante de la combinaison donnée en 3.1. Nous avons élaboré une loi basée sur la décision idéale (Kim *et al.*, 1990) qui consiste à déterminer si oui ou non un segment est crédible. Cette loi est définie de la manière suivante :

Pour chaque segment Seg_i ,

on dispose d'une distribution de masses : $m_{12,i}(S_i), m_{12,i}(\bar{S}_i), m_{12,i}(\Theta), m_{12,i}(\emptyset)$

Si $m_{12,i}(\emptyset) > 0.5$ alors le segment Seg_i n'est pas crédible

Sinon

on normalise suivant la règle de Dempster

$$K = \frac{1}{1 - m_{12,i}(\emptyset)}$$

$$\hat{m}_{12,i}(S_i) = K \cdot m_{12,i}(S_i)$$

$$\hat{m}_{12,i}(\bar{S}_i) = K \cdot m_{12,i}(\bar{S}_i)$$

$$\hat{m}_{12,i}(\Theta) = K \cdot m_{12,i}(\Theta)$$

$$m_{12,i}(\emptyset) = 0$$

On applique enfin la règle de décision dite idéale définie de la manière suivante :

$$\text{Soit la crédibilité } Cr(A) = \sum_{\emptyset \neq B \subseteq A} m(B),$$

$$\text{et la plausibilité } Pl(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B)$$

$$\text{Si } \forall A_j \neq A_i \quad Cr(A_i) > Pl(A_j)$$

alors A_i est idéalement crédible (la décision est non ambiguë)

Sinon il ne l'est pas.

Dans ce cas particulier des distributions de masses $m_{12,i}()$ le calcul de crédibilité idéale revient à vérifier que $\hat{m}(S) > \hat{m}(\bar{S}) + \hat{m}(\Theta)$ qui, dans le cas présent, revient à vérifier que $m(S) > m(\bar{S}) + m(\Theta)$.

Cette stratégie de sélection est dite pessimiste ou prudente. En effet dès qu'il y a un conflit important entre les 2 critères ou dès que la masse sur Θ (interprétée comme "peut-être est-ce ce segment") est importante, le segment est rejeté. Un segment n'est sélectionné que lorsque tout concorde localement (sans considérer les autres).

3.3. Stratégie de sélection globale

La stratégie de combinaison globale est illustrée par la figure 7. Comme dans l'approche locale, la première étape consiste à combiner pour chaque segment les distributions de masses provenant des différents critères. On obtient alors un ensemble de masses $m_{12,i}(S_i), m_{12,i}(\bar{S}_i), m_{12,i}(\Theta), m_{12,i}(\emptyset)$. Elles correspondent à des distributions de masses *spécialisées non normalisées*.

La stratégie globale consiste à combiner de nouveau ces distributions afin d'avoir une vue globale prenant en compte non seulement les critères, mais aussi les segments les uns par rapport aux autres. Dans le cas d'un seul segment candidat, il n'y a pas de recombinaison mais le conflit est géré avant d'appliquer la décision.

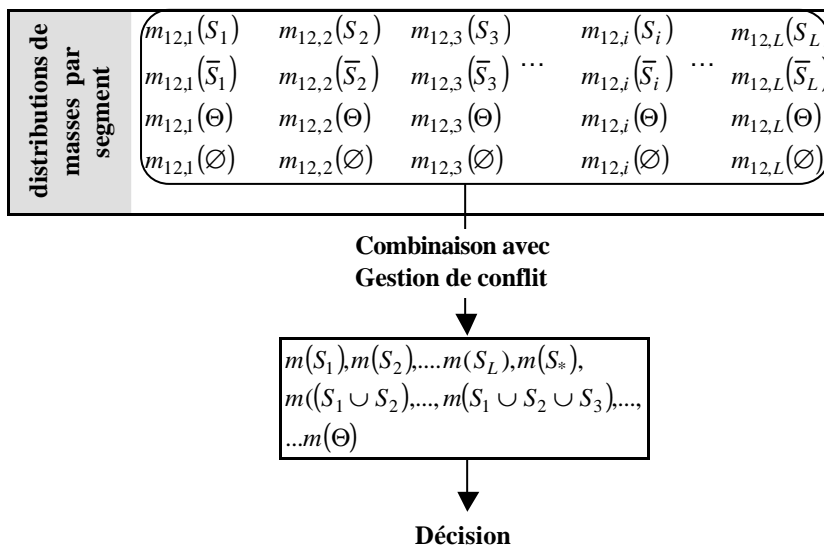


Figure 7. Seconde étape de combinaison des masses.

L'objectif est de combiner toute l'information disponible pour prendre une décision. Cette combinaison aboutit à la répartition de la masse sur la quasi-totalité du référentiel $2^\Theta = \{\emptyset, S_1, \dots, S_m, \dots, S_1 \cup S_2, \dots, S_1 \cup S_2 \cup S_m, \dots, \Theta\}$. Pour prendre une décision, la fonction de masse issue de la combinaison est transformée en distribution de probabilité sur des hypothèses singletons. Une telle approche mérite que l'on approfondisse la notion de conflit représentée par la masse sur l'ensemble vide $m(\emptyset)$. En effet, dans la théorie des croyances, on peut distinguer deux origines possibles au conflit (Janez, 1996) (Royère, 2002) :

– le conflit provient du fait que l'on se place dans le *monde ouvert* de Smets (Smets 1990a). La solution proposée par Smets consiste à considérer la masse sur l'ensemble vide comme la croyance qu'une nouvelle hypothèse peut être solution du problème. Le conflit vient alors d'une mauvaise définition du cadre de discernement. Smets appelle cela le monde ouvert et l'opération consiste à combiner avec l'opérateur conjonctif sans normaliser ensuite. L'ensemble vide est alors traité comme une classe de rejet.

– le conflit provient d'un réel conflit entre les sources qui ont une confiance pour des hypothèses différentes. Les hypothèses étant exclusives, il n'y a pas d'accord possible entre les sources. Certains auteurs ont proposé des opérateurs de distribution de conflit tels que l'opérateur de Yager (Yager 1987) et l'opérateur de Dubois et Prade (Dubois *et al.* 1988). Nous avons développé une variante de l'opérateur de Dubois et Prade, appelé opérateur conjonctif/disjonctif. Le principe de cet opérateur est de conserver lors de la combinaison les masses issues de la conjonction et les masses issues du conflit. L'objectif est de distribuer ensuite la masse conflictuelle sur les hypothèses ou les disjonctions d'hypothèses qui interviennent le plus dans le conflit.

3.3.1. Opérateur de gestion de conflit dans la combinaison conjonctive

Notre proposition de gestion de conflit se déroule en 2 phases. La première phase consiste à combiner l'ensemble des fonctions de masse dans un cadre appelée le *monde ouvert étendu* (Royère *et al.* 2000). Ce monde est dit ouvert étendu car il contient l'hypothèse S_* pour laquelle il n'y a pas d'affectation de masse. La masse sur cette hypothèse proviendra de la combinaison des $m_{12,i}(\bar{S}_i)$:

$$\begin{aligned} m_{1..L}(S_*) &= m_{1..L}(\bar{S}_1 \cap \bar{S}_2 \cap \dots \cap \bar{S}_L) \\ &= m_{12,1}(\bar{S}_1) m_{12,2}(\bar{S}_2) \dots m_{12,L}(\bar{S}_L) \end{aligned} \quad (4)$$

c'est-à-dire qu'elle résulte de tous les avis formulés par les sources concernant les hypothèses "le véhicule ne roule pas sur Seg_i ".

Le résultat de la combinaison conjonctive dans le monde ouvert étendu donne donc une distribution sur :

$$2^\Theta = \{\emptyset, S_1, \dots, S_L, S_*, S_1 \cup S_2, \dots, S_1 \cup S_*, \dots, S_1 \cup S_2 \cup S_3, \dots, \Theta\}$$

où la masse $m_{1..L}(S^*)$ représente la croyance de ne pas être sur une route cartographiée et $m_{1..L}(\emptyset)$ le conflit réel.

Etant donné la façon dont ont été définis les critères et plus particulièrement le critère de cap/vitesse, on peut réfléchir quant à la provenance du conflit généré par une combinaison globale. En effet, pour 2 segments de route éloignés du véhicule mais avec une direction similaire au cap de la voiture, la combinaison de ces distributions de masses élémentaires avec le critère distance va générer du conflit qui sera propagé dans la combinaison globale.

La redistribution de $m_{1..L}(\emptyset)$ est une phase nécessaire avant d'appliquer une règle de décision. Pour cela, nous avons suivi la même approche que (Lefevre *et al.* 2000) dans le sens où nous calculons et conservons les portions de masses résultantes de la combinaison de toutes les sources. La redistribution de la masse est donc une étape ultérieure à la combinaison proprement dite. Nous proposons de décrire l'ensemble de ces opérations par une formulation générale pour n distributions de masse.

Les notations sont les suivantes :

A : proposition (ou hypothèse composée ou sous-ensemble du référentiel de définition)

$m_{1..n}(A)$: masse sur A après combinaison de n distributions.

$m_{1..n}^*(A)$: portion de masse attribuée à A lors de la combinaison de n distributions.

$m_{1..n}(\emptyset)$: masse conflictuelle ou masse attribuée à \emptyset après combinaison de n distributions

$m_{1..n}^*(\emptyset)$: portion de masse conflictuelle ou portion de masse attribuée à \emptyset lors de la combinaison de n distributions

$m_{1..n}^{*C}(A)$: portion de masse attribuée à A lors de la distribution des portions de masses conflictuelles.

$m(A)$: masse attribuée à A après distribution des portions de masse conflictuelles.

Cette description se décompose en 3 étapes :

1) La première étape consiste à calculer les portions de masse avec la règle conjonctive (dans le monde ouvert étendu). La masse $m_{1..n}(\emptyset)$ est composée de portions de masses conflictuelles $m_{1..n}^*(\emptyset)$.

$$m_{1..n}(A) = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_n = A} m_1(B_1) m_2(B_2) \dots m_n(B_n) = \sum m_{1..n}^*(A)$$

$$m_{1..n}(\emptyset) = \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_n = \emptyset} m_1(B_1) m_2(B_2) \dots m_n(B_n) = \sum m_{1..n}^*(\emptyset) \quad (5)$$

2) La seconde étape consiste à distribuer les portions de masse conflictuelles $m_{1..n}^*(\emptyset)$ sur les sous-ensembles appropriés A :

$$m_{1..n}^*(\emptyset) \xrightarrow{\text{devient}} m_{1..n}^{*C}(A) \quad (6)$$

A est calculé de manière itérative par des opérations d'intersection/union :

$$\begin{aligned} \text{si } B_i \cap B_j = \emptyset \text{ alors } A_{ij} &= B_i \cup B_j \\ \text{si } B_i \cap B_j \neq \emptyset \text{ alors } A_{ij} &= B_i \cap B_j \end{aligned} \quad (7)$$

3) La dernière étape consiste à additionner les masses issues de la combinaison conjonctive et les masses conflictuelles.

$$m_{1..n}^C(A) = \sum^* m_{1..n}^{*C}(A) \quad (8)$$

$$m(A) = m_{1..n}(A) + m_{1..n}^C(A) \quad (9)$$

Ces opérations ne sont pas associatives et le résultat dépend donc de l'ordre de combinaison des sources. Cependant, Royère a montré que dans le cas particulier de sources spécialisées (normalisées ou non), l'opérateur conserve les propriétés d'associativité et de commutativité (Royère, 2002).

3.3.2. Règle de décision pour sélectionner un segment.

Sachant que la distribution de masse résultant de la combinaison globale est répartie sur l'ensemble \mathcal{P} et que la masse sur l'ensemble vide (conflit réel) est redistribuée par l'opérateur décrit précédemment, la règle de décision utilisée pour l'approche locale n'est pas adaptée au résultat de la combinaison.

L'utilisation d'une stratégie de combinaison globale a l'avantage de donner non seulement des masses sur les hypothèses simples (le véhicule est sur Seg_1) et leur contraire mais aussi des masses sur les hypothèses multiples (par exemple : le véhicule est sur Seg_1 ou sur Seg_3). L'exemple donné dans le paragraphe suivant illustre ce type de résultat. Ces résultats sont utiles dès lors que le choix d'un segment n'est pas imposé à chaque étape de localisation.

Cependant, afin de comparer les résultats des deux approches nous avons cherché à définir une fonction de croyance reportée sur les hypothèses simples du cadre de discernement. Les principales fonctions de croyances sont la crédibilité, la plausibilité (Shafer 1976) et la probabilité pignistique (Smets 1990).

La crédibilité définie par $Cr(A) = \sum_{\emptyset \neq B \subseteq A} m(B)$ n'est pas adaptée à ce problème puisqu'elle ne prend pas en compte la croyance sur les hypothèses multiples après combinaison. La crédibilité d'une hypothèse peut être très faible si une grande proportion de la masse de croyance est répartie sur les unions d'hypothèses.

La plausibilité définie par $Pl(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B)$ donne des résultats conduisant à une interprétation bien plus adaptée à notre application. Les segments ayant une plausibilité proche de 1 seront les segments qui doivent être sélectionnés. Cependant

la valeur de la plausibilité d'un segment n'apporte aucune indication sur l'ambiguïté de la situation lorsque plusieurs segments sont sélectionnés.

La probabilité pignistique définie par $P(A) = \sum_{A \subset B} \frac{|A \cap B|}{|B|} m(B)$ prend en compte

les croyances sur les hypothèses multiples mais conduit à un résultat « normalisé ». La somme des probabilités pignistiques sur les hypothèses singletons est égale à 1. Ceci conduit à des valeurs plus difficiles à seuiller mais la valeur de la probabilité pignistique d'une hypothèse reflète sa croyance par rapport aux autres hypothèses du cadre de discernement.

Les différentes fonctions de croyances définies ci-dessus sont illustrées dans le paragraphe suivant. Les résultats expérimentaux sont quant à eux illustrés à l'aide d'une probabilité pignistique associée à chaque segment candidat. Cette règle de décision est moins prudente que la règle utilisée dans la stratégie locale. Cependant elle peut être facilement modifiée selon les besoins de l'application.

4. Exemple de synthèse : l'approche d'un carrefour.

Pour illustrer sur un cas concret les deux stratégies, on considère un véhicule s'approchant d'un carrefour. Sur la figure 8, le véhicule suit la route correspondant aux segments 1 et 3 mais, à cause des différentes erreurs, sa position GPS est plus proche du segment 2 que des autres. Nous allons décrire l'attribution des fonctions de masses pour chacun des segments et ensuite, nous présenterons la décision prise par chacune des approches.

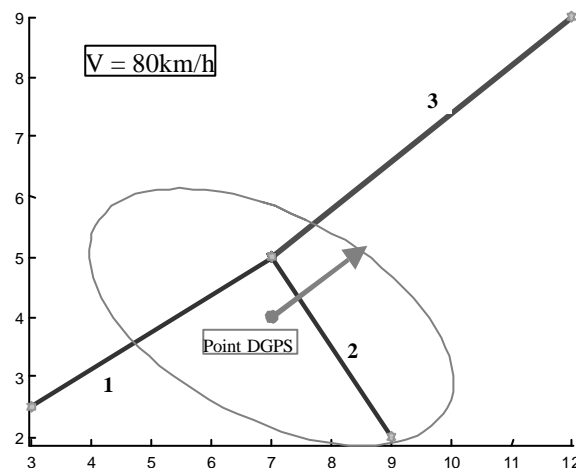


Figure 8. La position et le cap estimés du véhicule à l'approche du carrefour.

Les figures 9, 10 et 11 présentent les fonctions de masses générées par les fonctions d'attribution. Nous remarquons que, pour le segment 1 et 3, les deux critères, proximité et cap, sont en accord parce que les deux donnent une forte

croyance sur l'hypothèse S_i , peu de masse sur Θ et rien sur la proposition \bar{S}_i . Par contre, pour le segment 2 les deux critères sont en conflit total.

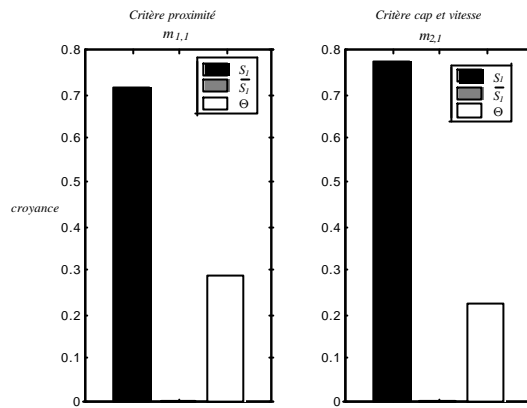


Figure 9. Masses pour Seg1.

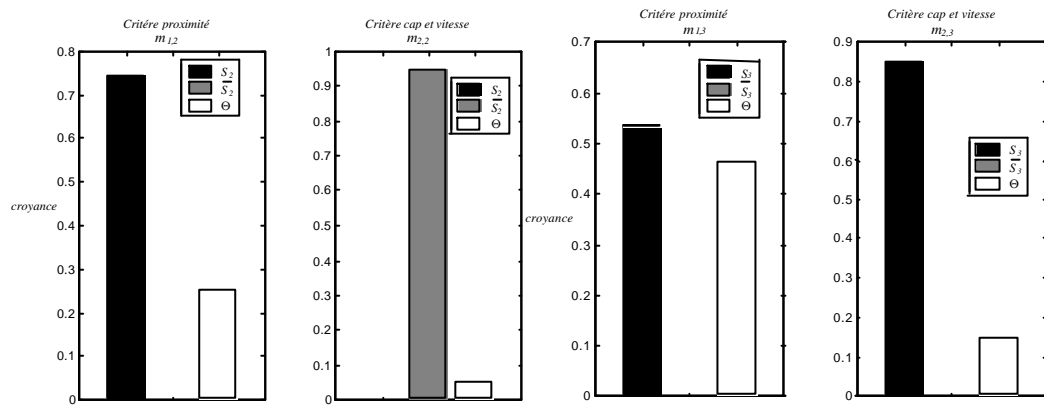


Figure 10. Masses pour Seg 2.

Figure 11. Masses pour Seg 3.

4.1. Approche locale

La figure 12 montre les résultats de la fusion avec l'opérateur de Dempster des deux critères sans normalisation. On peut remarquer que pour le segment 2, le conflit est très important. Par contre, l'accord des critères pour les segments 1 et 3 traduit une forte croyance sur la masse de l'hypothèse S_i .

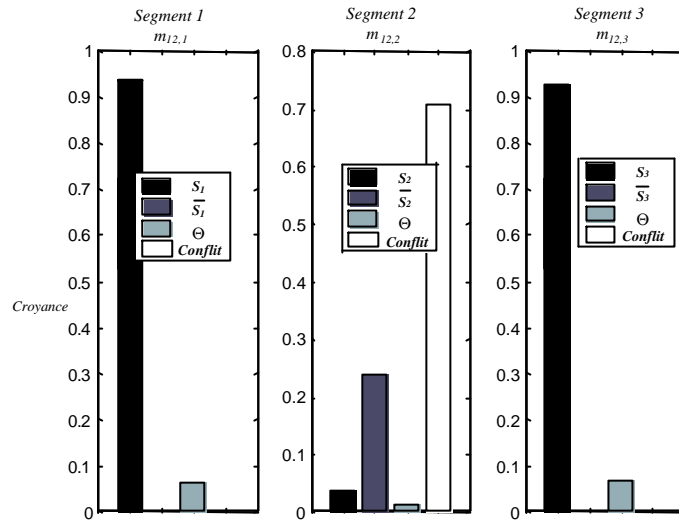


Figure 12. Résultat de la fusion des deux critères sans normaliser.

Pour décider si le segment Seg_i est un segment candidat, nous procédons comme exposé précédemment : si le conflit généré par la fusion est important, le segment est éliminé. Sinon, il faut que la crédibilité de l'hypothèse S_i soit plus grande que la somme de la plausibilité de \bar{S}_i et Θ . Ainsi, les segments 1 et 3 sont sélectionnés.

4.2. Approche globale

Le référentiel de définition pour la combinaison globale dans le monde ouvert étendu devient $\Theta = \{S_1, S_2, S_3, S_*\}$ et le cadre de discernement :

$$2^\Theta = \left\{ \begin{array}{l} \emptyset, S_1, S_2, S_3, S_*, S_1 \cup S_2, S_1 \cup S_3, S_1 \cup S_*, S_2 \cup S_3, S_2 \cup S_*, S_3 \cup S_*, \\ \bar{S}_1, \bar{S}_2, \bar{S}_3, \bar{S}_*, \Theta \end{array} \right\}$$

où $\bar{S}_1 = S_2 \cup S_3 \cup S_*$, $\bar{S}_* = S_1 \cup S_2 \cup S_3$ et c

Pour illustrer les résultats obtenus, reprenons les trois phases d'application de l'opérateur. La première phase consiste à combiner les trois distributions de masses $m_{12,1}()$, $m_{12,2}()$ et $m_{12,3}()$ dans le monde ouvert étendu avec l'opérateur conjonctif. La

méthode de redistribution du conflit nécessite que les portions de masse soient conservées lors des 2 combinaisons (combinaison par segment et combinaison globale). Pour simplifier la notation, le résultat de cette combinaison est nommé $m_{123}(\cdot)$ en omettant les indices sur les critères. Cette notation fait référence aux formules générales (5). La figure 13 montre le résultat de la combinaison globale avant la redistribution du conflit. Seules les masses non nulles sur les sous-ensembles du cadre de discernement sont affichées.

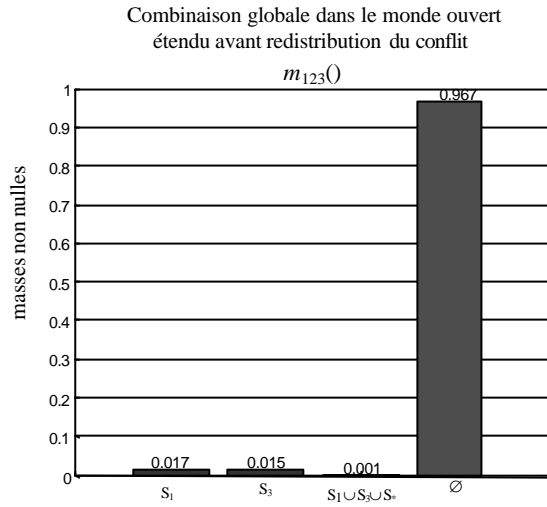


Figure 13. Résultat de la combinaison globale dans le monde ouvert étendu.

On remarque que la masse sur le conflit $m_{123}(\emptyset)$ est très grande. Ce conflit est généré en partie lors la combinaison des critères par segment (segment 2) et, en partie, lors de la combinaison globale: les segments 1 et 3 sont très proches et le conflit du segment 2 se propage. On remarque aussi que, dans cet exemple, la masse sur S_* est nulle. En effet, selon la formule (4), $m_{123}(S_*) = m_{12,1}(\bar{S}_1) \cdot m_{12,2}(\bar{S}_2) \cdot m_{12,3}(\bar{S}_3) = 0$ car $m_{12,1}(\bar{S}_1) = 0$ et $m_{12,3}(\bar{S}_3) = 0$.

La seconde étape consiste à redistribuer les portions de masses conflictuelles $m_{123}^*(\emptyset)$ sur les sous-ensembles A avec l'opérateur décrit dans les formules (6) et (7). La figure 14 donne les valeurs de masses conflictuelles $m_{1..n}^C(A)$ qui ont été affectées aux sous-ensembles concernés. On remarque qu'une grande partie de la masse conflictuelle est redistribuée sur le sous-ensemble $\{S_1, S_3\}$ (ou $S_1 \cup S_3$).

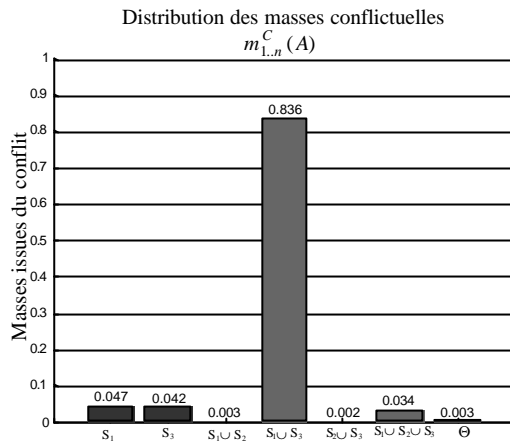


Figure 14. Distribution de la masse conflictuelle.

Enfin la dernière étape qui consiste à additionner les masses issues de la conjonction (sauf $m_{123}(\emptyset)$) et les masses conflictuelles donne les résultats de la figure 15.

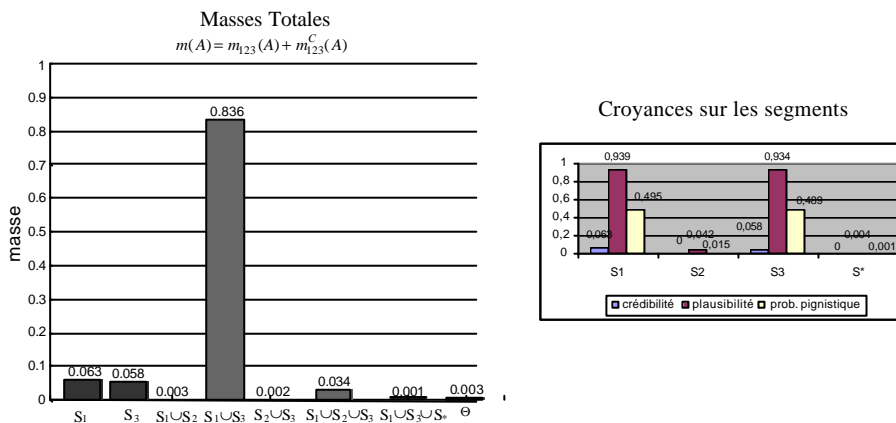


Figure 15. (a) Masses totales après distribution de conflit. (b) Crédibilité, Plausibilité et Probabilité pignistique sur chacun des segments du cadre de discernement

On voit clairement dans la figure 15 (a) que le maximum de masse est attribué à la proposition $S_1 \cup S_3$ soit «le véhicule roule sur Seg_1 ou sur Seg_3 » avec une croyance de 0,836. Cette distribution peut être directement utilisée pour la localisation et le suivi de routes.

Dans le cas d'une fonction qui doit conduire à une décision pour un segment, la figure 15 (b) montre les résultats des différentes fonctions proposées. Cet exemple

montre l'utilité d'une fonction de décision différente de la crédibilité. En effet $Cr(S_1)=0,063$ et $Cr(S_3)=0,058$. Il est difficile d'accorder une confiance à ces hypothèses avec des valeurs de crédibilité aussi faible.

La plausibilité donne des résultats conduisant à une interprétation bien plus adaptée à notre application. Comme on le voit sur la table ci-dessous les segments Seg_1 et Seg_3 de l'exemple ont une plausibilité proche de 1. Cependant, la valeur de la plausibilité d'un segment (par exemple Seg_1) n'apporte aucune indication sur l'ambiguïté de la situation lorsque plusieurs segments sont sélectionnés (par exemple Seg_1 et Seg_3).

La probabilité pignistique recadre ces croyances les unes par rapport aux autres. Dans l'exemple, les hypothèses S_1 et S_3 ont des probabilités pignistiques élevées par rapport aux autres mais leur valeur proche de 0,5 montre qu'elles se partagent à elles deux presque la totalité de la croyance globale.

La stratégie de sélection de segments peut consister à prendre celui dont la probabilité est la plus grande ou ceux qui ont une probabilité pignistique supérieure à un seuil. Dans les expérimentations suivantes, nous afficherons tous les segments qui ont une probabilité pignistique supérieure à 0,1.

En guise de première conclusion, on peut noter que les deux méthodes ont sélectionné les bons segments alors que la situation n'était pas simple à traiter.

5. Expérimentation et résultats

La base de données que nous avons utilisée est un fond de carte *Géoroute V2* de l'IGN. Les segments ont été extraits à l'aide du SIG Géoconcept et, le récepteur GPS utilisé était un AgGPS132 de marque Trimble fonctionnant en mode différentiel avec correction satellitaire Omnistar.

La figure 16 présente une vue globale d'un essai effectué sur Compiègne (appelé trajet 1 par la suite). Cet essai a été fait sur une 2×2 voies et la séquence que l'on traite correspond aux instants où le véhicule quitte la route pour aller sur une bretelle de sortie. Il s'agit d'une situation difficile pour tout système de sélection de segments.

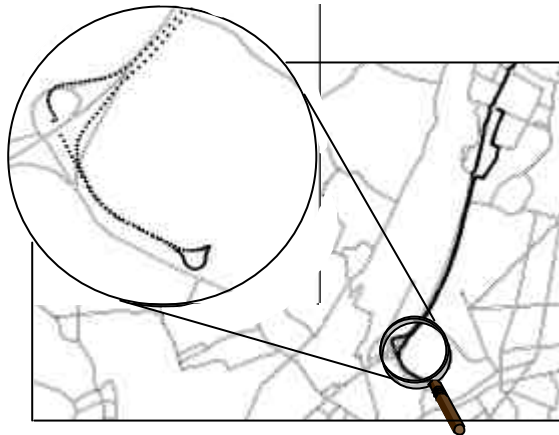


Figure 16. Vue en plan de l'essai sur le fond de carte "Géoroute"
(les positions DGPS sont en pointillés).

Intéressons nous d'abord aux résultats obtenus avec la stratégie locale.

Au début de la sortie, deux segments sont crédibles (segments en gras sur la figure 17) : l'un correspond à la 2×2 voies et l'autre à la bretelle de sortie. On remarque que le segment qui correspond à la bretelle d'entrée (situé de l'autre côté de la route) n'est pas sélectionné.

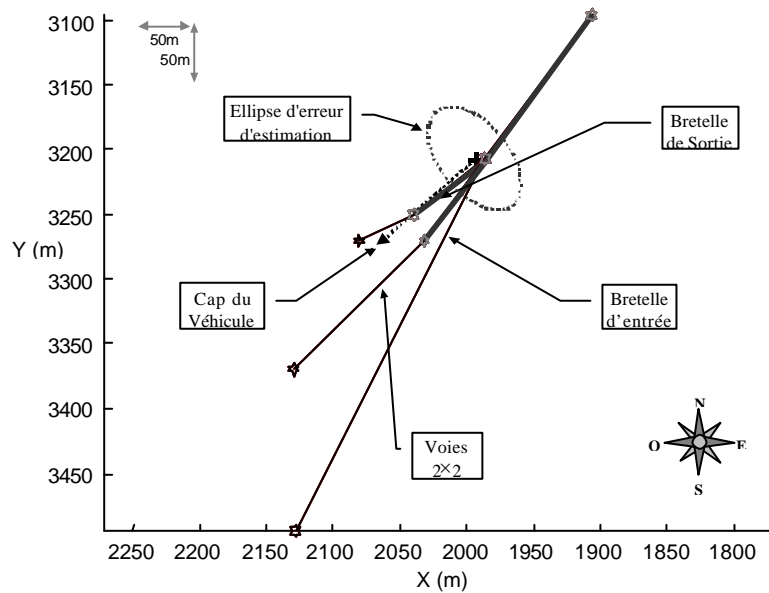


Figure 17. Résultats de la méthode locale à l'entrée de la bretelle.
(les segments crédibles sont en traits forts).

Plus loin (figure 18), la situation est toujours ambiguë car des segments de la 2×2 voies et de la bretelle de sortie sont crédibles. Par contre, quelques secondes après, l'ambiguïté est levée car les segments sélectionnés appartiennent tous à la même route (figure 19).

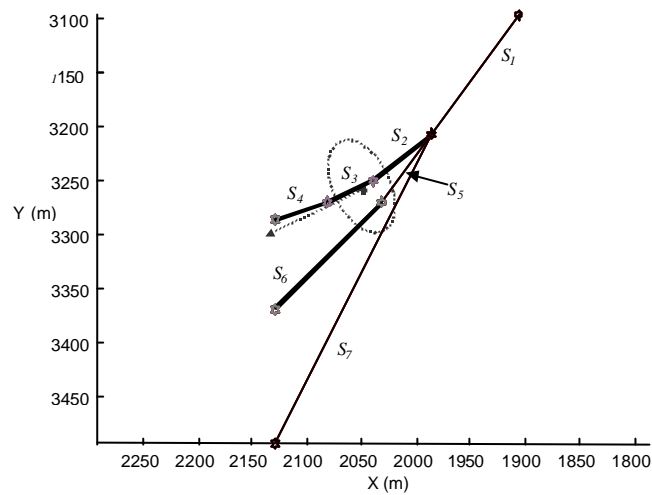


Figure 18. Résultats de la méthode locale dans la bretelle.

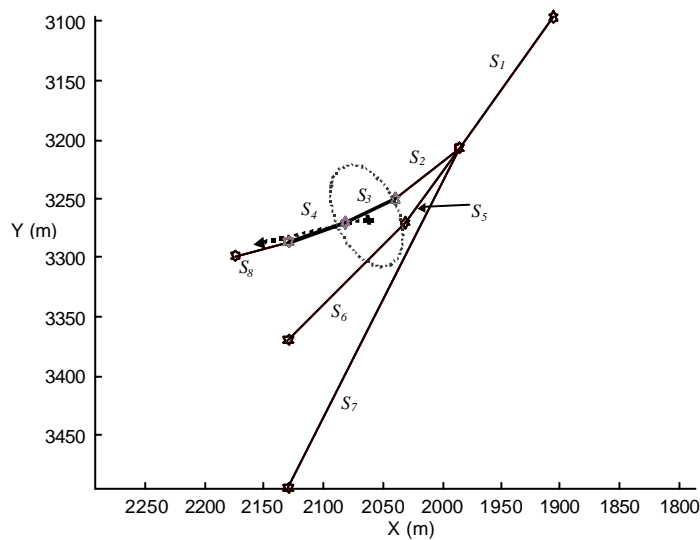


Figure 19. Le véhicule est positionné sur la bretelle de sortie.

Compte tenu de ces résultats, on peut remarquer que la stratégie d'attribution des masses aux critères est correcte et que la méthode présente une bonne aptitude à détecter puis lever une ambiguïté.

Afin de comparer les résultats obtenus par les 2 stratégies de combinaison, nous montrons, sur les figures 20 et 21, l'évolution, en fonction du temps, de la croyance de chacun des segments, suivant les stratégies locale et globale lors de la même séquence. La figure 20 affiche la crédibilité idéale de chaque segment retenu (le seuil à 0,5 résulte de la méthode). La figure 21 affiche la probabilité pignistique des segments (le seuil à 0,1 est fixé arbitrairement pour éliminer des graphiques les propositions peu crédibles).

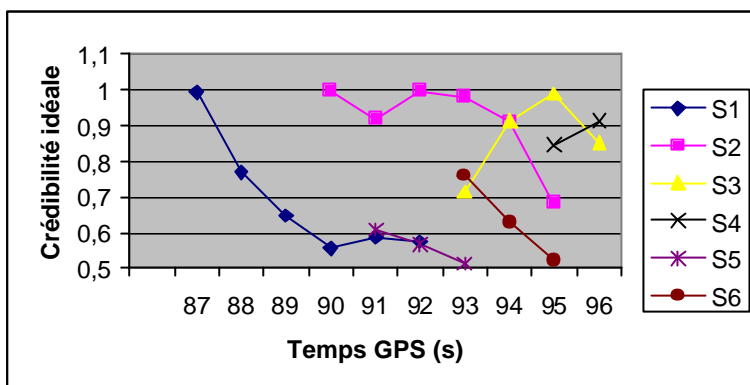


Figure 20. Evolution de la croyance des segments selon la méthode locale (trajet 1).

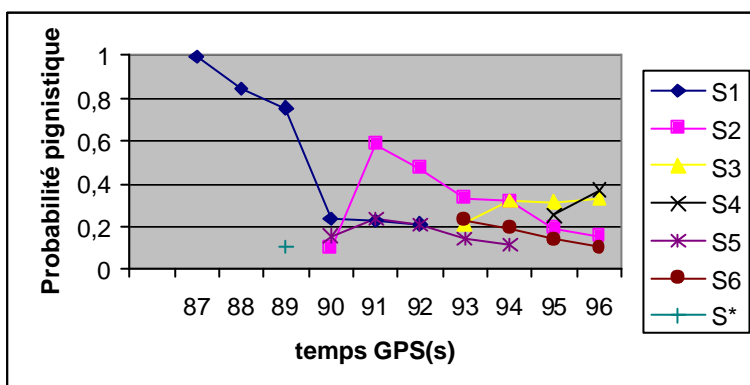


Figure 21. Evolution de la croyance des segments selon la méthode globale (trajet 1).

Les résultats de ces deux approches sont tout à fait comparables. A chaque temps GPS, les segments sélectionnés sont les mêmes et la croyance maximum (crédibilité dans un cas et probabilité pignistique dans l'autre) est attribuée au même segment. En prenant le maximum de chacune de ces courbes, on suit le trajet du véhicule : Seg1 jusqu'au temps 90 puis Seg2 jusqu'au temps 94 puis Seg3 jusqu'au temps 96. Par exemple, au temps GPS 93, 4 segments sont sélectionnés : Seg2, Seg3, Seg5 et Seg6 et le maximum est attribué à Seg2.

Cependant, on peut remarquer que la méthode locale attribue une crédibilité proche de 1 à Seg2 alors que la méthode globale attribue une probabilité de 0,375.

Cette différence s'explique par le fait que cette valeur se calcule sur une seule distribution de masse (combinaison globale). La valeur donnée ainsi par la méthode globale reflète en partie l'ambiguïté de la situation et on peut utiliser cette valeur pour quantifier la confiance accordée au processus de sélection.

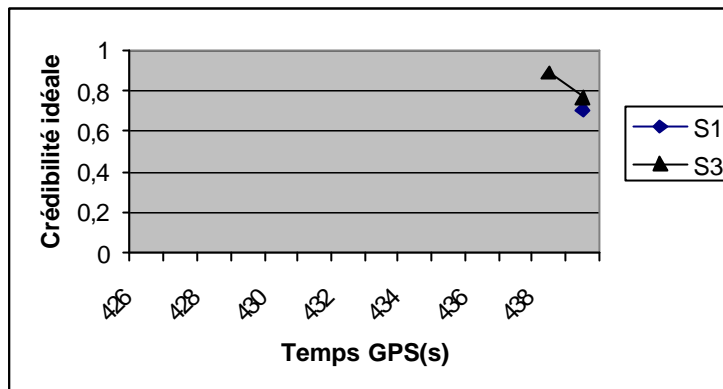


Figure 22. Evolution de la croyance des segments selon la méthode locale (trajet 2).

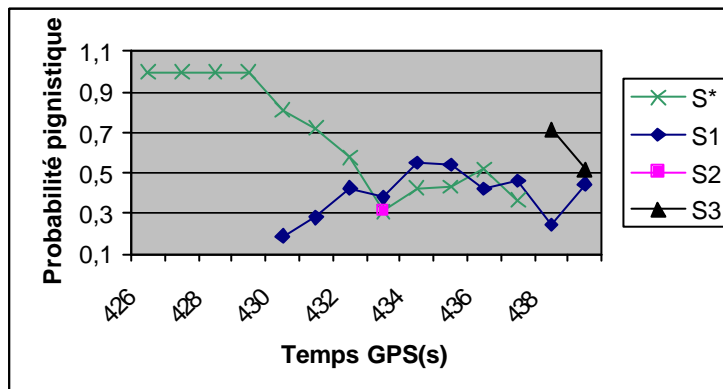


Figure 23. évolution de la croyance des segments selon la méthode globale (trajet 2).

Les figures 22 et 23 montrent l'évolution de la croyance sur chacun des segments au cours d'un second trajet (noté trajet 2) : le véhicule roule sur une route non cartographiée avant de rejoindre le réseau routier cartographié dans la base IGN.

Les résultats de la méthode locale sont donnés dans la figure 22. Aucun segment crédible n'est sélectionné avant le temps 438. La méthode globale illustrée par la figure 23 fait apparaître le segment S* qui correspond à l'hypothèse « le véhicule ne roule pas sur une route cartographiée ». La probabilité pignistique, très élevée pour

cette hypothèse au départ, décroît lorsque le véhicule se rapproche des routes cartographiées. On notera qu'entre les temps 433 et 438, les valeurs de probabilités pignistiques montrent une certaine ambiguïté dans le positionnement.

Sur ce deuxième trajet, les expérimentations montrent encore des résultats satisfaisants et comparables avec les deux approches.

6. Conclusion

L'utilisation de la théorie des croyances est très pertinente pour un problème de sélection de segments d'une base de données, compte tenu des nombreuses sources d'erreur affectant ce problème. Des méthodes fusionnant plusieurs critères de mise en correspondance sont de surcroît bien adaptées à condition que les fonctions d'attribution de masses reflètent correctement la réalité. Dans le cas étudié ici, les niveaux de bruit affectant les données (données de la base, erreurs du GPS, erreurs de changement de coordonnées, de projection, etc.) sont des paramètres essentiels à quantifier soigneusement pour une sélection robuste.

Les deux méthodes de fusion proposées donnent des résultats similaires dans les situations étudiées. Elles ont la qualité d'être bien adaptées, l'une comme l'autre, à l'ajout de nouveaux critères considérant, par exemple, la vitesse du véhicule et la vitesse limite des segments. Egalement, elles pourraient mettre à profit d'autres capteurs, augmentant ainsi la fiabilité du système.

Par rapport à la méthode locale, l'approche globale offre l'avantage de donner une fonction de croyance qui prend en compte l'ensemble des segments. Ainsi, la valeur avec laquelle on sélectionne un segment reflète l'ambiguïté (ou non) de la situation. D'autre part, la méthode de gestion de conflit par une combinaison dans le monde ouvert étendu permet de quantifier la croyance de ne pas être sur une route cartographiée et de détecter l'approche par le véhicule d'une route répertoriée. Par contre, la stratégie globale est plus complexe et donc son implémentation temps réel aussi.

D'un autre côté, la méthode locale, plus simple à intégrer dans un système temps réel, produit des résultats comparables en ce qui concerne la sélection de segments. Un seuillage du conflit permet d'éliminer les situations conflictuelles au sens de la contradiction des critères. Les situations sont ambiguës lorsque plusieurs segments n'appartenant pas à une même route sont sélectionnés avec une crédibilité idéale. Par contre, dans le cas d'un véhicule ne se situant pas sur une route cartographiée, il est impossible de savoir si des segments peu crédibles sont quand même à proximité.

Les perspectives de ce travail sont relatives à l'étude de méthodes de mise en correspondance utilisant des critères topologiques comme l'utilisation de la connexité avec des segments précédemment sélectionnés ou de l'attribut de sens attaché à chaque segment. Enfin, lorsque la phase de sélection n'est pas ambiguë, nous envisageons d'utiliser le ou les segments sélectionnés pour recalibrer l'estimation de la position du véhicule. Ceci peut être précieux notamment en cas de masquage des satellites GPS.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le GDR-ISIS et le Conseil Régional de Picardie (pôle DIVA) qui ont contribué au financement de ces travaux.

7. Bibliographie

- Appriou. A. « Multisensor Signal Processing in the Framework of the Theory of Evidence », NATO/RTA, SCI Lecture Series 216 on Application of Mathematical Signal Processing Techniques to Mission systems, November, 1999.
- Christopher E. White, Bernstein D and Kornhauser A., « Some map matching algorithms for personal navigation assistants ». Transportation Research Part C 8 Elsevier Science Ltd., pp 91-108, 2000.
- Bétaille D. et Bonnifait P., « Road Maintenance Vehicles Location using DGPS, Map-Matching and Dead-Reckoning: Experimental Results of a Smoothed EKF ». IAIN World Congress in association with the US ION annual meeting. San Diego, pp. 409-416, June 26-28 2000.
- Bonnifait P., « Localisation dynamique en extérieur par couplage lâche d'odométrie et de DGPS large zone ». Journées Nationales de la Recherche en Robotique. Giens. 14-17 octobre 2001.
- Denoeux. T., « Application du modèle des Croyances Transférables en Reconnaissance de Formes. », Traitement du Signal, 14(5):443-451, 1998.
- El Najjar M. E. and Bonnifait P., « Multi-criteria fusion for the selection of roads of an accurate map », Proceedings of the 15th IFAC world congress, Barcelona, Spain, 2002.
- Janez F., « Fusion de sources d'information définies sur des référentiels non exhaustifs différents », Thèse de doctorat de l'Université d'Angers, Novembre 1996.
- Kim H. and Swain P. H., « A Method Of Classification for Multisource Data in Remote Sensing Based on Interval-Valued Probabilities », Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, TR-EE 90-48, July 1990.
- Kim J.S., Lee, J.H., Kang, T.H., Lee, W.Y. and Kim, Y.G., « Node based map matching algorithm for car navigation system ». Proceedings of the 29th ISATA Symposium, Florence, Vol. 10, pp121-126, 1996.
- Lasserre V., Mauris G. and Foulloy L., « A simple probability-possibility transformation for measurement error representation: a truncated triangular transformation ». Proc. of IFSA'97, Prague, Vol. 3, pp. 476-481, 1997.
- Lefevre E., Colot O., Vannoorenberghe P., De Brucq D., « A generic framework for resolving the conflict in the combination of belief structures », Proceeding of 3rd International conference on Information Fusion, Paris, 2000.
- Royère C., Gruyer D., Cherfaoui V., « Data association with Believe Theory » Proceeding of 3rd International conference on Information Fusion, Paris, 2000.

- Royère C. « Contribution à la résolution du conflit dans la théorie de l'évidence. Applications à la perception et la localisation des véhicules intelligents » Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, janvier 2002.
- Scott C., « Improved GPS positioning for motor vehicles through map matching », ION-94, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, Utah, Sept. 20-23, 1994.
- Shafer G., A. « Mathematical Theory Of Evidence ». Princeton University Press, Princeton, 1976.
- Smets P., « The combination of evidence in the Transferable Belief Model », IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 12 (5), 447-458, 1990.
- Smets P., « Constructing the pignistic probability function in a context of uncertainty », Uncertainty in Artificial Intelligence 5, M. Henrion, R.D. Shachter, L.N. Kanal, and J.F. Lemmer (Editors), Elsevier Science Publishers, p. 29-39, 1990.
- Taylor G., Blewitt Geoffrey, « Road Reduction Filtering Using GPS », 3th AGILE Conference on Geographic Information Science – Helsinki, Finland, May 25-27, 2000.
- Yager R.R., « On the Dempster-Shafer framework and new combination rules », Information sciences, 4:93-138, 1987.
- Zadeh L.A., « A Simple View of Dempster-Shafer Theory of Evidence and its Implication for the Rule of Combination ». The AI Magazine, 1986.
- Zhao Yilin, « Intelligent Transportation Systems : Vehicle Location and Navigation Systems ». By Artech House, April 1997, ISBN 0-89006-861-5.

Maan E. El Najar est ingénieur en systèmes industriels avancés de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Il est actuellement à l'Université de Technologie de Compiègne et prépare une thèse au sein du laboratoire Heudiasyc. Ses travaux de recherche portent sur la localisation dynamique d'un véhicule et la fusion de données pour des applications de sécurité routière active.

Véronique Cherfaoui est maître de conférences à l'Université de Technologie de Compiègne. Ses travaux de recherches au laboratoire Heudiasyc UMR CNRS 6599 portent sur l'évaluation de l'incertitude dans les systèmes de fusion de données multi-capteur.

Philippe Bonnifait est Maître de Conférences à l'Université de Technologie de Compiègne. Son activité de recherche concerne la fusion de données et l'estimation d'état de systèmes non linéaire. L'application principale est le problème de la localisation dynamique d'automobiles à des fins d'assistance à la conduite.

Cyril Royère a obtenu le grade de docteur en contrôle des systèmes à l'Université de Technologie de Compiègne. Il est chargé d'études et de recherches à l'INRETS pour le laboratoire LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicule - Infrastructures - Conducteur). Ses activités de recherche concernent la fusion de données provenant de différents capteurs (Radar, Lidar, Stéréovision) dans le cadre de la route automatisée.