



HAL
open science

Fusion multi-capteurs pour l'aide à la navigation routière

Abdelkabir Lahrech, Christophe Boucher, Jean-Baptiste Choquel,
Jean-Charles Noyer

► To cite this version:

Abdelkabir Lahrech, Christophe Boucher, Jean-Baptiste Choquel, Jean-Charles Noyer. Fusion multi-capteurs pour l'aide à la navigation routière. MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC, IRISA – IETR – LTSI, Nov 2005, Rennes, pp.252-259. inria-00000713

HAL Id: inria-00000713

<https://inria.hal.science/inria-00000713v1>

Submitted on 15 Nov 2005

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

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

Fusion multi-capteurs pour l'aide à la navigation routière

A. Lahrech, C. Boucher, J.-B. Choquel et J.-C. Noyer

Laboratoire d'Analyse des Systèmes du Littoral, Université du Littoral Côte d'Opale

50 rue F. Buisson, BP 699, 62 228 Calais Cedex, France

lahrech@lasl.univ-littoral.fr, boucher@lasl.univ-littoral.fr, choquel@lasl.univ-littoral.fr,

noyer@lasl.univ-littoral.fr

Résumé : Nous présentons dans cet article une méthode d'aide à la navigation routière pour la localisation des véhicules en milieu urbain, utilisant un récepteur GPS, un odomètre décrit ici comme un capteur de vitesse et une carte routière numérique. Dans cet environnement, le positionnement par GPS devient souvent difficile en raison principalement des phénomènes de réflexions ou d'absences des signaux satellitaires. L'approche utilisée repose sur un filtre non-linéaire fusionnant, suivant une structure centralisée, d'une part les mesures GPS et d'autre part celles de l'odomètre et de la base de données cartographiques en cas de masquages des satellites GPS. Le réseau routier du Système d'Informations Géographiques, vu ici comme une mesure dont on prend en compte l'incertitude et l'imprécision, est modélisé par un ensemble de routes dont on connaît la position et l'orientation. La problématique reste la sélection de la meilleure mesure cartographique permettant de corriger la trajectoire estimée du véhicule et celle-ci est résolue par le calcul d'un critère basé sur la distance de Mahalanobis. Pour illustrer ses performances et sa fiabilité en termes de positionnement 3-D d'un véhicule, cette méthode de fusion multi-capteurs est appliquée à un réseau de transport routier urbain où la visibilité des satellites GPS est souvent faible.

Mots-clés : Fusion multi-capteurs, filtrage non-linéaire, navigation par satellites.

1 INTRODUCTION

Les systèmes de navigation par satellites actuels tels que le GPS (Global Positioning System), ont des limites de précision et de fiabilité ne leur permettant pas de satisfaire pleinement aux exigences de disponibilité et de continuité de service, plus particulièrement en milieu urbain où la visibilité des satellites devient faible à l'approche de hauts immeubles, dans les tunnels, etc. [Kaplan, 1996]. Le signal GPS peut également être dégradé par les réflexions multi-trajets. On adjoint donc à ces systèmes reposant sur le GPS des capteurs permettant de mesurer le positionnement relatif du véhicule. Un des plus utilisés est l'odomètre que l'on trouve désormais comme équipement de série en tant que composante du système ABS (Antilock Braking Systems). Il mesure, via le comptage du nombre de tours de roue, la distance parcourue par le véhicule depuis sa position ini-

tiale [Najjar, 2003, Zhao, 2003, Abbott, 1999, Seo, 1999, Zhao, 1997]. Cette technique est appelée "navigation à l'estime". L'inconvénient majeur de ces capteurs additionnels reste l'accumulation de leurs erreurs de mesure au cours du temps.

Dans la plupart des applications de transport, le véhicule se déplace suivant un réseau routier et les informations d'une carte routière numérique peuvent être également utilisées pour corriger la position estimée. Ces informations sont en général contenues dans une base de données cartographiques incluse dans un SIG (Système d'Informations Géographiques). Chaque route y est décrite par un ensemble de segments pour lesquels on connaît la position de chaque point le constituant et l'orientation associée. Afin d'améliorer le positionnement du véhicule, il convient de réaliser la meilleure correspondance entre sa localisation et l'une des routes de la carte numérique. Il existe plusieurs méthodes pour traiter ce problème de mise en correspondance [Lakakis, 2004, Li, 2004, Quddus, 2003, Winter, 2003, Forsell, 2002, Greenfeld, 2002, Taylor, 2001, White, 2000]. La méthode proposée repose sur une modélisation statistique de la procédure de mise en correspondance associée à la métrique de Mahalanobis [Fukunaga, 1973].

Cet article détaille un algorithme de fusion centralisée pour un système de navigation en milieu urbain, utilisant le GPS, des odomètres et une carte routière numérique extraite d'un SIG. Cette méthode utilise les mesures de l'odomètre lorsqu'il devient impossible d'avoir accès au positionnement GPS. Dans ce cas, la base de données cartographiques est aussi utilisée comme une mesure, ce qui permet de tenir compte des imprécisions et incertitudes de la carte routière. Cet algorithme de fusion multi-capteurs repose sur un filtre non-linéaire [Bar-Shalom, 1993] fusionnant les mesures disponibles pour estimer les paramètres cinématiques du véhicule.

2 MODÈLE DE NAVIGATION 3-D

On résoud ce problème d'estimation en utilisant une représentation d'état. Les caractéristiques suivantes décrivent la dynamique 3-D du véhicule : l'accélération γ , la vitesse v et la position sont les composantes du vecteur d'état suivant les coordonnées x , y et z . Soit $X_t = (\gamma_t^x, v_t^x, x, \gamma_t^y, v_t^y, y, \gamma_t^z, v_t^z, z)^T$ le vecteur d'état.

2.1 Equation de dynamique

Pour décrire la dynamique du véhicule, on peut écrire un ensemble d'équations cinématiques comme, par exemple, suivant la composante en x [Bar-Shalom, 1993] :

$$\begin{cases} \gamma_{t+1}^x &= \gamma_t^x + w_t^{\gamma^x} \\ v_{t+1}^x &= \gamma_t^x \Delta t + v_t^x + w_t^{v^x} \\ x_{t+1} &= v_t^x \Delta t + x_t + w_t^x \end{cases}$$

où $(w_t^{\gamma^x}, w_t^{v^x}, w_t^x)$ sont des bruits blancs Gaussiens et Δt définit la période d'échantillonnage. L'introduction de bruits sur les trois composantes permet de prendre en compte d'une part les corrélations intrinsèques entre l'accélération, la vitesse et la position, et d'autre part d'autoriser le suivi de véhicules à accélération variable. La formulation matricielle conduit à cette équation :

$$\begin{pmatrix} \gamma_{t+1}^x \\ v_{t+1}^x \\ x_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \Delta t & 1 & 0 \\ 0 & \Delta t & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_t^x \\ v_t^x \\ x_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_t^{\gamma^x} \\ w_t^{v^x} \\ w_t^x \end{pmatrix}$$

Par conséquent, l'équation de dynamique peut être écrite comme suit :

$$X_{t+1} = FX_t + W_t \quad (1)$$

où F est la matrice de transition décrivant la dynamique du système et W_t est un bruit blanc Gaussien de moyenne nulle et de matrice de covariance Q_t :

$$F = \begin{pmatrix} F_x & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & F_y & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & F_z \end{pmatrix}$$

$0_{3 \times 3}$ est une matrice nulle de dimension 3×3 et :

$$F_x = F_y = F_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \Delta t & 1 & 0 \\ 0 & \Delta t & 1 \end{pmatrix}$$

2.2 Equations de mesure

L'estimateur utilise exclusivement la mesure GPS $\mathcal{Z}_{t+1}^{\text{GPS}}$ si elle est disponible :

$$\mathcal{Z}_{t+1}^{\text{GPS}} = \begin{pmatrix} x_{t+1}^{\text{GPS}} \\ y_{t+1}^{\text{GPS}} \\ z_{t+1}^{\text{GPS}} \end{pmatrix} = h^{\text{GPS}}(X_{t+1}) + V_{t+1}^{\text{GPS}} \quad (2)$$

où h^{GPS} est la fonction de mesure et $V_{t+1}^{\text{GPS}} \sim \mathcal{N}(0, R_{t+1}^{\text{GPS}})$ est un bruit blanc Gaussien.

Lorsque la mesure GPS n'est plus disponible, on utilise d'abord les mesures de l'odomètre [Zhao, 1997]. Celui-ci délivre une mesure quantifiée $\mathcal{Z}_{t+1}^{\text{ODO}}$ du déplacement du véhicule vu des roues droites et gauches :

$$\mathcal{Z}_{t+1}^{\text{ODO}} = \begin{pmatrix} \Delta D_{t+1}^R \\ \Delta D_{t+1}^L \end{pmatrix} = h^{\text{ODO}}(X_{t+1}) + V_{t+1}^{\text{ODO}} \quad (3)$$

où h^{ODO} est la fonction non-linéaire reliant les composantes du vecteur d'état aux mesures et

$V_{t+1}^{\text{ODO}} \sim \mathcal{N}(0, R_{t+1}^{\text{ODO}})$ est un bruit blanc Gaussien. Les déplacements mesurés s'écrivent pour la roue droite :

$$\begin{aligned} \Delta D_{t+1}^{R,x} &= v_t^x \Delta t + \frac{e}{2} \left(v_{t+1}^y [(v_{t+1}^x)^2 + (v_{t+1}^y)^2]^{-\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. - v_t^y [(v_t^x)^2 + (v_t^y)^2]^{-\frac{1}{2}} \right) \\ \Delta D_{t+1}^{R,y} &= v_t^y \Delta t - \frac{e}{2} \left(v_{t+1}^x [(v_{t+1}^x)^2 + (v_{t+1}^y)^2]^{-\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. - v_t^x [(v_t^x)^2 + (v_t^y)^2]^{-\frac{1}{2}} \right) \end{aligned}$$

$$\Delta D_{t+1}^R = r_R^{-1} \sqrt{(\Delta D_{t+1}^{R,x})^2 + (\Delta D_{t+1}^{R,y})^2} + V_{t+1}^{\text{ODO},R} \quad (4)$$

et pour la roue gauche :

$$\begin{aligned} \Delta D_{t+1}^{L,x} &= v_t^x \Delta t - \frac{e}{2} \left(v_{t+1}^y [(v_{t+1}^x)^2 + (v_{t+1}^y)^2]^{-\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. - v_t^y [(v_t^x)^2 + (v_t^y)^2]^{-\frac{1}{2}} \right) \\ \Delta D_{t+1}^{L,y} &= v_t^y \Delta t + \frac{e}{2} \left(v_{t+1}^x [(v_{t+1}^x)^2 + (v_{t+1}^y)^2]^{-\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. - v_t^x [(v_t^x)^2 + (v_t^y)^2]^{-\frac{1}{2}} \right) \end{aligned}$$

$$\Delta D_{t+1}^L = r_L^{-1} \sqrt{(\Delta D_{t+1}^{L,x})^2 + (\Delta D_{t+1}^{L,y})^2} + V_{t+1}^{\text{ODO},L} \quad (5)$$

où r_R et r_L sont les rayons des roues droites et gauches, e est l'entraxe correspondant à la distance séparant les deux points de contact des roues avec le sol. Aidé de ce capteur, le système de navigation peut détecter un changement de vitesse et de direction du véhicule et ainsi corriger sa trajectoire estimée. Cependant, ce capteur a le défaut d'accumuler les erreurs de positionnement au cours du temps. Il convient également de remarquer la modélisation de l'odomètre, que l'on envisage ici comme un capteur de vitesse, ce qui permet notamment d'intégrer au modèle les erreurs inhérentes à ce type de capteur.

Pendant cette absence de positionnement GPS, le filtre fusionne également les données d'une carte routière extraites d'un SIG. La base de données cartographiques est composée d'un ensemble de routes décrites par des segments. Chaque segment routier est caractérisé par un nombre fini de points, parmi lesquels un noeud correspond à une extrémité ou à une transition d'un segment à un autre sur la carte numérique. Les attributs du noeud sont ici l'information de localisation $(x_{t+1}^{\text{MAP}}, y_{t+1}^{\text{MAP}})$ et d'orientation $\theta_{t+1}^{\text{MAP}}$ du segment routier.

$$\mathcal{Z}_{t+1}^{\text{MAP}} = \begin{pmatrix} x_{t+1}^{\text{MAP}} \\ y_{t+1}^{\text{MAP}} \\ \theta_{t+1}^{\text{MAP}} \end{pmatrix} = h^{\text{MAP}}(X_{t+1}) + V_{t+1}^{\text{MAP}} \quad (6)$$

où h^{MAP} est la fonction non-linéaire reliant les composantes du vecteur d'état aux mesures et V_{t+1}^{MAP} est un bruit blanc Gaussien additif de moyenne nulle et de matrice de covariance R_{t+1}^{MAP} . Cette matrice intègre les erreurs de relevés calibrées par le fournisseur de la base de données cartographiques. Elle tient également compte des facteurs d'échantillonnage et d'échelle de la carte routière numérique.

$$\begin{cases} x_{t+1}^{\text{MAP}} &= x_{t+1} + V_{t+1}^{\text{MAP},x} \\ y_{t+1}^{\text{MAP}} &= y_{t+1} + V_{t+1}^{\text{MAP},y} \\ \theta_{t+1}^{\text{MAP}} &= \arctan \left(\frac{v_{t+1}^y}{v_{t+1}^x} \right) + V_{t+1}^{\text{MAP},\theta} \end{cases} \quad (7)$$

En cas de mise en correspondance correcte et suivant la précision de la carte, cette information additionnelle conduit à un meilleur positionnement du véhicule en zone urbaine. Une telle modélisation statistique de la mesure cartographique autorise une intégration directe de l'imprécision et de l'incertitude de la carte, que ne permet a priori pas une approche déterministe.

3 LOCALISATION DU VÉHICULE

Ce problème d'estimation multi-capteurs est résolu à l'aide d'un filtre de Kalman étendu qui fusionne les mesures GPS, celles de l'odomètre et celles de la carte routière numérique [Bar-Shalom, 1995]. Nous détaillons ci-dessous la structure de fusion centralisée de ce filtre (cf. Figure 1).

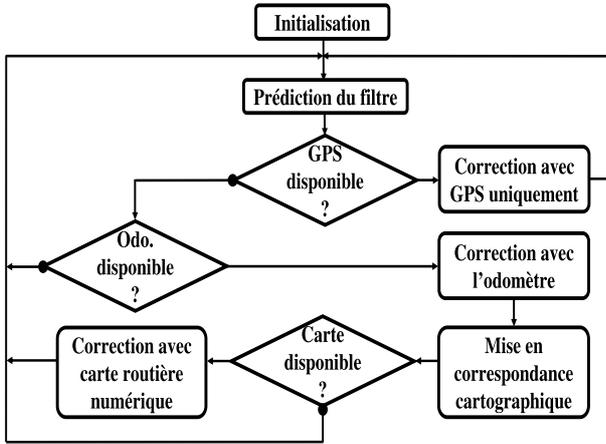


FIG. 1 – Structure du filtre

3.1 Prédiction de la position 3-D du véhicule

La position prédite est calculée à partir de l'équation de dynamique (cf. Equation 1) :

$$\begin{cases} \hat{X}_{t+1/t} = F\hat{X}_{t/t} \\ \tilde{P}_{t+1/t} = F\tilde{P}_{t/t}F^T + Q_t \end{cases} \quad (8)$$

où $\hat{X}_{t/t}$ est l'estimation des caractéristiques cinématiques du véhicule à l'instant t sachant les mesures jusqu'à l'instant t , et $\tilde{P}_{t/t}$ est la covariance de l'erreur de prédiction associée.

Les paramètres de mouvement sont mis à jour à chaque instant et utilisés dans les équations du filtre pour prédire la localisation 3-D du véhicule et ses caractéristiques de dynamique (cf. Equation 8).

3.2 Gestion du GPS, des odomètres et de la carte routière numérique

Le filtre fusionne exclusivement les mesures GPS lorsqu'elles sont disponibles, sinon il traite séquentiellement les mesures de l'odomètre et celles de la carte routière numérique pour estimer les paramètres de dynamique et

de positionnement du véhicule. Il repose sur une structure centralisée de fusion et les mesures sont traitées séquentiellement afin de minimiser la dimension de leurs bruits.

3.2.1 Mesure GPS

Quand la mesure GPS est disponible, le filtre estime les paramètres 3-D du véhicule en utilisant la mesure GPS prédite $\hat{Z}_{t+1}^{\text{GPS}} = h^{\text{GPS}}(\hat{X}_{t+1/t})$. Tout d'abord, le gain de Kalman et la matrice de covariance prédite sont calculés en utilisant uniquement la mesure GPS.

$$\begin{cases} K_{t+1}^{\text{GPS}} = \tilde{P}_{t+1/t}(h^{\text{GPS}})^T(h^{\text{GPS}}\tilde{P}_{t+1/t}(h^{\text{GPS}})^T + R_{t+1}^{\text{GPS}})^{-1} \\ \tilde{P}_{t+1/t+1}^{\text{GPS}} = \tilde{P}_{t+1/t} - K_{t+1}^{\text{GPS}}h^{\text{GPS}}\tilde{P}_{t+1/t} \\ \hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{GPS}} = \hat{X}_{t+1/t} + K_{t+1}^{\text{GPS}}\tilde{M}_{\text{GPS}} \end{cases} \quad (9)$$

où :

- $\tilde{M}_{\text{GPS}} = (Z_{t+1}^{\text{GPS}} - \hat{Z}_{t+1}^{\text{GPS}})$;
- $\hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{GPS}}$ est l'estimation de la dynamique et du positionnement 3-D du véhicule à l'instant $t+1$ en utilisant uniquement les mesures GPS.

3.2.2 Mesure de l'odomètre

Si le GPS ne délivre plus de positionnement, le filtre va tout d'abord utiliser la mesure de l'odomètre pour mettre à jour les paramètres : le gain de Kalman et la matrice de covariance associée sont alors calculés.

$$\begin{cases} K_{t+1}^{\text{ODO}} = \tilde{P}_{t+1/t}H_{\text{ODO}}^T(H_{\text{ODO}}\tilde{P}_{t+1/t}H_{\text{ODO}}^T + R_{t+1}^{\text{ODO}})^{-1} \\ \tilde{P}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}} = \tilde{P}_{t+1/t} - K_{t+1}^{\text{ODO}}H_{\text{ODO}}\tilde{P}_{t+1/t} \\ \hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}} = \hat{X}_{t+1/t} + K_{t+1}^{\text{ODO}}\tilde{M}_{\text{ODO}} \end{cases} \quad (10)$$

où :

- $\tilde{M}_{\text{ODO}} = (Z_{t+1}^{\text{ODO}} - \hat{Z}_{t+1}^{\text{ODO}})$;
- $\hat{Z}_{t+1}^{\text{ODO}} = h^{\text{ODO}}(\hat{X}_{t+1/t})$;
- $H_{\text{ODO}} = \nabla_X h^{\text{ODO}}|_{\hat{X}_{t+1/t}}$ est la matrice Jacobienne de la fonction de mesure de l'odomètre évaluée à partir du vecteur $\hat{X}_{t+1/t}$.

Les odomètres permettent de corriger ici les paramètres 2-D (les composantes en x et y du vecteur d'état) et pour améliorer la localisation du véhicule, le filtre fusionne également la mesure de la base de données cartographiques du SIG.

3.2.3 Base de données cartographiques

La difficulté est ici de corréler la précédente position estimée avec les informations de la carte routière. Il est donc nécessaire de mettre en correspondance cette localisation avec l'un des segments du réseau routier du SIG. Il existe plusieurs solutions à ce problème de suivi multi-cibles multi-capteurs, telles que les méthodes d'Association Probabiliste des Données ou les techniques de Suivi Multi-Hypothèses [Bar-Shalom, 1995], les méthodes de minimisation de fonctions de similitude [Fukunaga, 1973], etc.

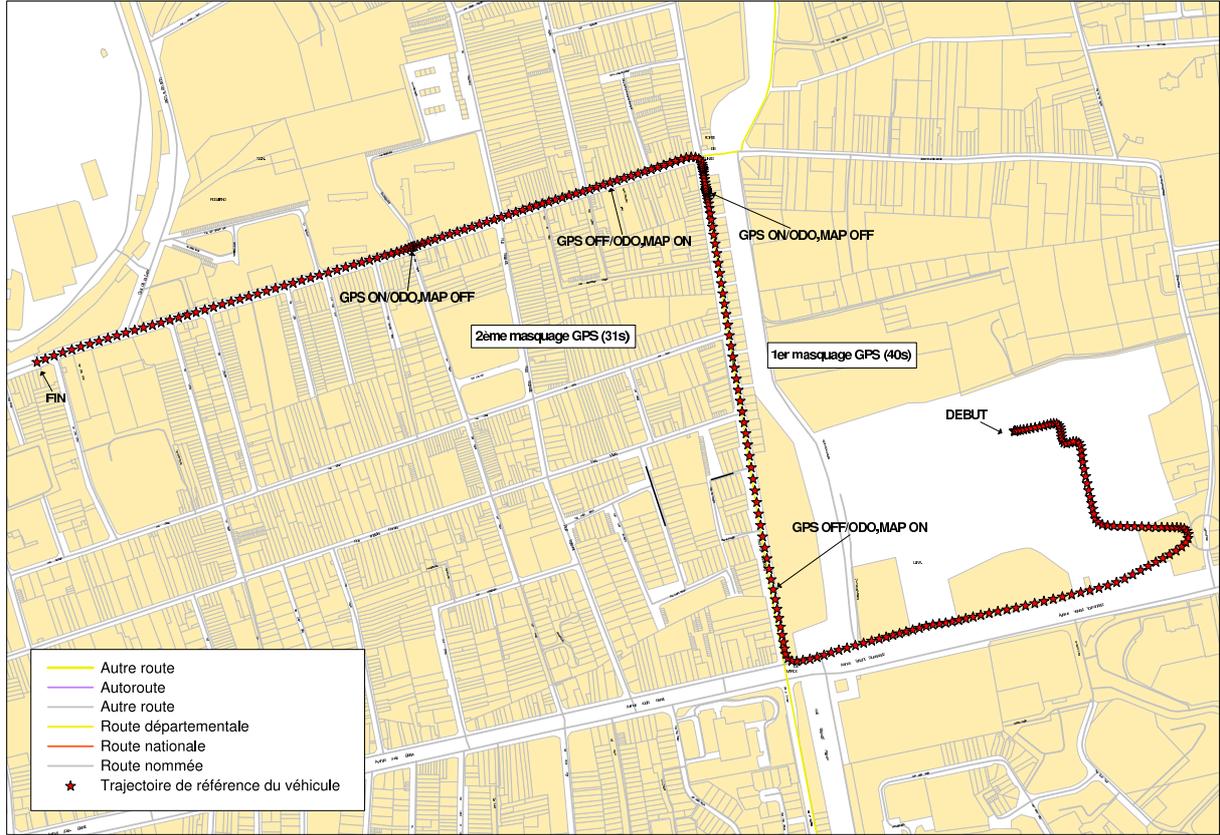


FIG. 2 – Scénario de transport urbain

La solution proposée repose sur la minimisation de la distance de Mahalanobis entre la position 2-D prédite sur la carte routière et chaque descripteur du réseau routier (coordonnées du noeud et orientation du segment) à l'instant $t + 1$. Ces distances normalisées sont calculées et le correspondant le plus probable est détecté par minimisation de $d = d(\mathcal{Z}_{t+1}^{\text{MAP}}, \hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}})$:

$$d = \tilde{M}_{\text{MAP}}^T (H_{\text{MAP}} \tilde{P}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}} H_{\text{MAP}}^T + R_{t+1}^{\text{MAP}})^{-1} \tilde{M}_{\text{MAP}} \quad (11)$$

où :

- $\tilde{M}_{\text{MAP}} = (\mathcal{Z}_{t+1}^{\text{MAP}} - \hat{X}_{t+1}^{\text{MAP}})$;
- $\hat{X}_{t+1}^{\text{MAP}} = h^{\text{MAP}}(\hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}})$;
- $H_{\text{MAP}} = \nabla_X h^{\text{MAP}}|_{\hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}}}$ est la matrice Jacobienne de la fonction de mesure de la carte numérique évaluée à partir du vecteur $\hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}}$.

La correction apportée par la carte est utilisée comme une mesure usuelle, ce qui permet de tenir compte de la précision de la carte routière numérique du SIG.

$$\begin{cases} K_{t+1}^{\text{MAP}} = \tilde{P}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}} H_{\text{MAP}}^T (H_{\text{MAP}} \tilde{P}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}} H_{\text{MAP}}^T + R_{t+1}^{\text{MAP}})^{-1} \\ \tilde{P}_{t+1/t+1}^{\text{MAP}} = \tilde{P}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}} - K_{t+1}^{\text{MAP}} H_{\text{MAP}} \tilde{P}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}} \\ \hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{MAP}} = \hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{ODO}} + K_{t+1}^{\text{MAP}} \tilde{M}_{\text{MAP}} \end{cases} \quad (12)$$

Finalement, le filtre délivre le vecteur d'état estimé $\hat{X}_{t+1/t+1}^{\text{MAP}}$ qui contient les paramètres 3-D de localisation

et de mouvement du véhicule. Si l'algorithme ne peut pas mettre en correspondance la position estimée à partir des odomètres avec les informations cartographiques routières, le filtre fonctionne en boucle ouverte et aucune mesure de la carte n'est utilisée pour corriger la localisation du véhicule. Cette étape évite une mauvaise mise en correspondance cartographique qui peut conduire à une dégradation de la qualité du positionnement.

4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous présentons ci-dessous quelques résultats expérimentaux afin de quantifier les apports de la solution proposée.

4.1 Scénario de transport urbain

Notre véhicule test est équipé d'un récepteur GPS Novatel qui calcule le positionnement GPS. La campagne de mesures a été réalisée en milieu urbain durant 5 minutes et 25 secondes. Le véhicule a atteint la vitesse maximale de 16,5 mètres/seconde (environ 60 kilomètres/heure). La vitesse est assez variable du fait des nombreuses accélérations ou décélérations, voire même des arrêts/redémarrages en raison des feux de circulation et des piétons. Il y a deux zones où le positionnement GPS est absent en raison d'un nombre de satellites visibles insuffisants : la première a duré 40 secondes et la deuxième 31 secondes. Durant ces périodes, l'estimateur utilise les mesures des odomètres qui sont délivrées à la

fréquence de 1 Hz, tout comme la mesure GPS lorsqu'elle est disponible. Il fusionne aussi l'information de positionnement des segments routiers urbains extraits de la base de données du SIG MapInfo Professional (cf. Figure 2).

4.2 Positionnement du véhicule

Nous présentons ici les résultats obtenus à partir de notre algorithme de fusion appliqué à des données expérimentales. Durant les périodes d'absence de positionnement GPS, le filtre utilise les mesures des odomètres et celles de la carte routière numérique. La fiabilité des mesures des odomètres a été évaluée à 90% en raison de leurs erreurs intrinsèques comme le dérapage, la pression des roues, etc. La carte routière est discrétisée à la valeur de 5 mètres. Pour calculer les erreurs, nous utilisons la trajectoire de référence du véhicule qui a été estimée à partir de données DGPS. Le système DGPS est une version améliorée du système GPS qui permet d'obtenir une précision en positionnement inférieure au mètre ; son principe repose sur la mise en oeuvre de deux récepteurs GPS : l'un est positionné à un endroit parfaitement connu géographiquement (station de référence), et l'autre (récepteur mobile) est utilisé pour mesurer la position sur le terrain. La station de référence peut ainsi transmettre par radio au récepteur mobile les corrections de positionnement à apporter aux données reçues des satellites.

La figure 3 montre l'erreur de vitesse 3-D du véhicule. Nous pouvons remarquer que cette erreur est d'environ 1 mètre/seconde en cas d'absence de positionnement GPS. L'utilisation conjointe des odomètres et de la base de données cartographiques permet de limiter les erreurs de vitesse et de corriger avec précision les caractéristiques dynamiques du véhicule.

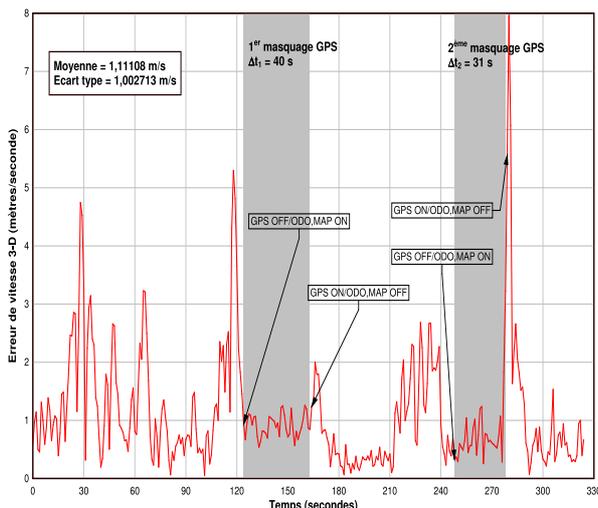


FIG. 3 – Erreur de vitesse du véhicule

La figure 4 montre l'erreur de positionnement 3-D du véhicule. Elle montre aussi que la solution proposée conduit à de bonnes précisions d'estimation, plus particulièrement pendant les périodes d'absence de positionnement GPS : l'écart-type est d'environ 1,25 mètres.

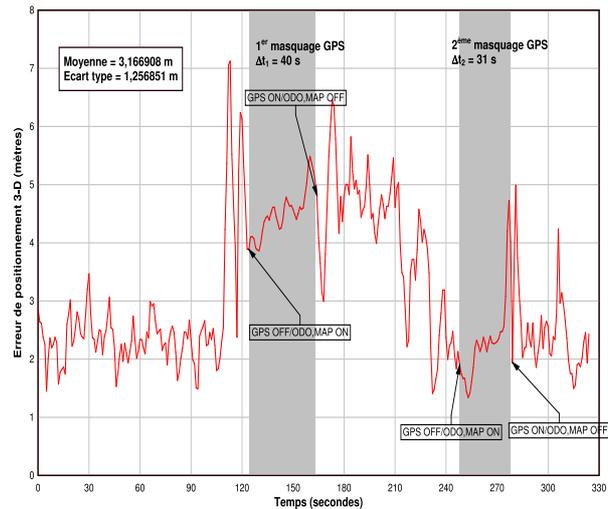


FIG. 4 – Erreur de positionnement du véhicule

Finalement, nous présentons la trajectoire estimée du véhicule sur la figure 5 en se focalisant sur les deux zones de masquage GPS qui constituent notre problématique. Celle-ci est tracée directement sur le plan de la ville et comparée à la trajectoire de référence du véhicule. Le positionnement du véhicule est donné en coordonnées UTM (est, nord et hauteur ellipsoïdale) et affiché à la fréquence de 1 Hz, ce qui explique les variations visualisées entre deux symboles consécutifs, en raison d'une accélération ou décélération de la voiture.

Clairement, la méthode proposée permet un positionnement précis du véhicule tout en utilisant les mesures de la carte routière numérique pour limiter les erreurs cumulées des odomètres pendant les périodes d'absence GPS.

5 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une méthode d'estimation du mouvement et de positionnement d'un véhicule utilisant le GPS, l'odométrie différentielle et la base de données cartographiques routières d'un SIG. La problématique principale est ici de corriger, en cas d'absence de positionnement GPS, la localisation du véhicule à partir de mesures des odomètres, que l'on modélise comme des capteurs de vitesse, et d'une carte routière numérique que l'on modélise comme une mesure. Notre méthode permet ainsi de tenir compte des erreurs de la carte numérique (quantification, positionnement, orientation, etc.) dans la statistique des bruits de mesure. Ensuite, la procédure de mise en correspondance est réalisée via le calcul d'un critère de distance reposant sur la métrique de Mahalanobis.

Notre approche repose sur un filtre non-linéaire centralisé qui fusionne les mesures disponibles. Les avantages sont montrés à l'aide d'un scénario réel de transport urbain, ce qui atteste de la stabilité de la méthode et l'apport de la modélisation adoptée en termes de précision en localisation de véhicule en l'absence de positionnement GPS.

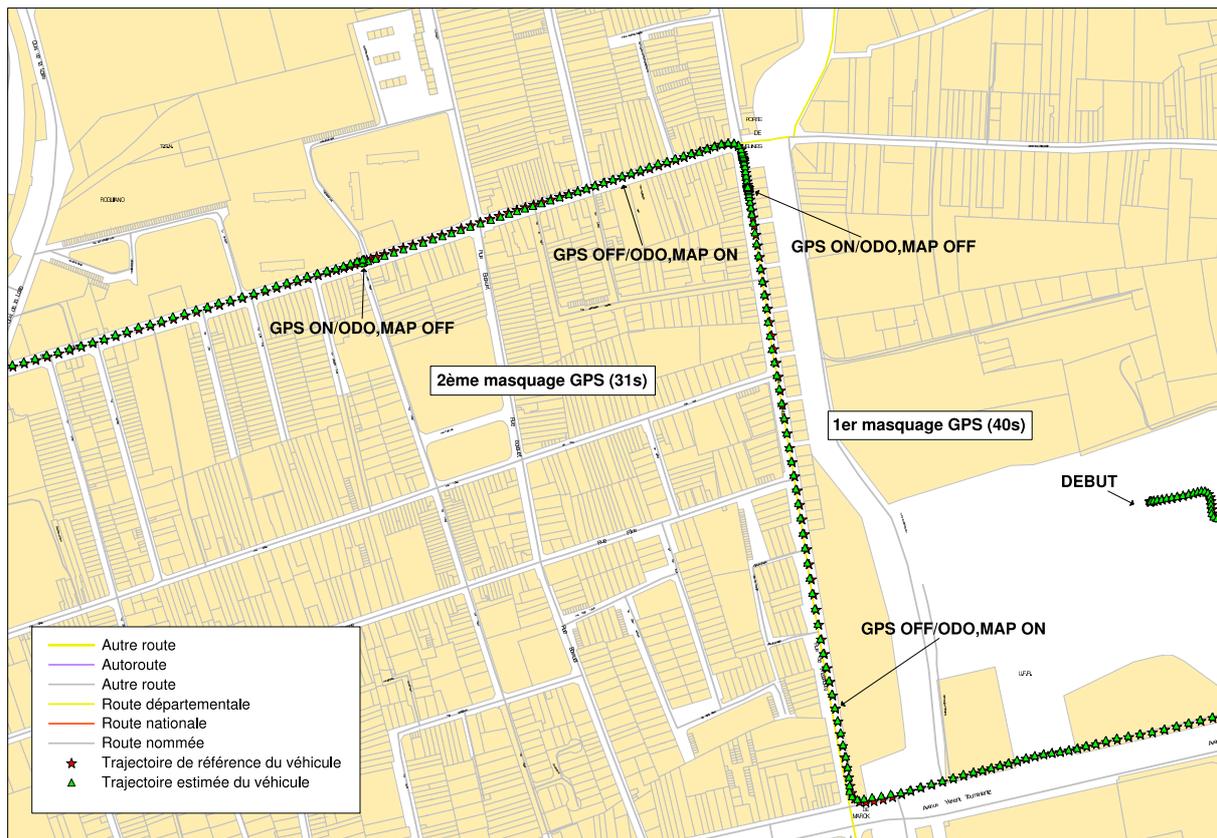


FIG. 5 – Trajectoire estimée du véhicule

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la Région Nord/Pas-de-Calais pour son support financier dans le cadre du projet PEPSAT (Pôle de compétences Européen sur le Positionnement Satellitaire appliqué à la mobilité Terrestre) ainsi que Messieurs Bury et Rousseau, respectivement Directeur et Technicien de l'OPHLM de la Communauté d'Agglomération du Calaisis (CAC) pour la mise à disposition des données cartographiques de la ville de Calais.

BIBLIOGRAPHIE

- [Abbott, 1999] Abbott E. et Powell D., Land-vehicle navigation using GPS. *Proceedings of the IEEE*, 87(1) :145–162.
- [Bar-Shalom, 1993] Bar-Shalom Y. et Li X.-R., *Estimation and Tracking : Principles, Techniques and Software*. Artech House.
- [Bar-Shalom, 1995] Bar-Shalom Y. et Li X. R., *Multitarget Multisensor Tracking*. YBS Publication.
- [Forssell, 2002] Forssell U., Hall P., Ahlqvist S. et Gustafsson F., Map-aided positioning system. *Proceedings of the FISITA 2002 World Automotive Congress, Helsinki, Finland*.
- [Fukunaga, 1973] Fukunaga K. et Hostetler L., Optimization of k-nearest neighbor density estimates. *IEEE Transactions on Information Theory*, 19(3) :320–326.
- [Greenfeld, 2002] Greenfeld J., Matching GPS observations to locations on a digital map. *81th Annual Meeting*

of the Transportation Research Board.

- [Kaplan, 1996] Kaplan E., editor *Understanding GPS : principles and applications*. Artech House.
- [Lakakis, 2004] Lakakis K., Savvaidis P., Ifadis I. M. et Douka I. D., Quality of map-matching procedures based on DGPS and stand-alone GPS positioning in an urban area. *FIG Working Week 2004*.
- [Li, 2004] Li J., Taylor G., Brunson C., Olden A., Steup D. et Winter M., A test-bed simulator for GPS and GIS integrated navigation and positioning research : Bus positioning, using GPS observations, odometer readings and map matching. *Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics - Geospatial Information Research : Bridging the Pacific and Atlantic*, pages 32–38, University of Gävle, Sweden.
- [Najjar, 2003] Najjar M. E. et Bonnifait P., A roadmap matching method for precise vehicle localization using belief theory and kalman filtering. *11th IEEE International Conference on Advanced Robotics*.
- [Quddus, 2003] Quddus M. A., Ochieng W. Y., Zhao L. et Noland R. B., A general map matching algorithm for transport telematics applications. *GPS Solutions Journal*, 7(3) :157–167.
- [Seo, 1999] Seo H., Lee J., Hwang D., Sung T. et Lee S., A decoupled GPS/DR integration kalman filter utilizing carrier measurements. *12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*.

- [Taylor, 2001] Taylor G., Blewitt G., Steup D., Corbett S. et Car A., Road reduction filtering for GPS-GIS navigation. *Transactions in GIS*, 5(3) :193–207.
- [White, 2000] White C., Bernstein D. et Kornhauser A., Some map-matching algorithms for personal navigation assistants. *Transportation Research, Part C*, 8 :91–108.
- [Winter, 2003] Winter M. et Taylor G., Modular neural networks for map-matched GPS positioning. *4th International Conference on Web Information Systems Engineering Workshops*, pages 106–111.
- [Zhao, 2003] Zhao L., Ochieng W., Quddus M. et Noland R., An extended kalman filter algorithm for integrating GPS and low cost dead reckoning system data for vehicle performance and emissions monitoring. *Journal of Navigation*, 56(2) :257–275.
- [Zhao, 1997] Zhao Y., *Vehicle Location and Navigation Systems*. Artech House.