

GYROLIS : Logiciel de localisation de véhicule en post-traitement par couplage GPS – gyromètre – odomètre

David BÉTAILLE*

LCPC-MI, Centre de Nantes, France

■ RÉSUMÉ

Le logiciel GYROLIS est un produit de la recherche au LCPC dans les domaines de la robotique et de la localisation. Il fournit, par filtrage de Kalman et lissage, les coordonnées géographiques (latitude et longitude) d'un véhicule équipé d'un récepteur GPS, d'un gyromètre et d'un odomètre, ainsi que la précision associée. Les capteurs de localisation à l'estime (ici le gyromètre et l'odomètre) pallient l'indisponibilité du GPS en zone de masquage. GYROLIS s'utilise en post-traitement, à partir de données acquises en temps réel sur le véhicule instrumenté. L'article montre, pour deux gyromètres de classe différente (gyromètres à fibre optique KVH RD 2100 et micro-électro-mécanique MicroStrain 3DMG), que l'erreur de localisation en temps réel (de quelques mètres à quelques dizaines de mètres par minute sans GPS selon le capteur) est divisée par 1,5 (pour le KVH) et 3 (pour le 3DMG) par lissage. Les résultats sont fondés sur l'algorithme de Rauch-Tung-Striebel linéarisé. Ce logiciel, original car non spécialisé en calcul GPS ni dédié à un matériel particulier, s'adresse au secteur de la géomatique et particulièrement ses applications en milieu urbain. Il peut permettre, après calcul de la localisation du véhicule, de géoréférencer au final des données routières et des images collectées par des systèmes embarqués sur ce même véhicule.

GYROLIS: Post-processing of vehicle localization software via GPS - gyrometer - odometer coupling

■ ABSTRACT

The GYROLIS software application has been developed through LCPC research efforts in the fields of robotics and localization. By use of Kalman filtering and smoothing, this application outputs the geographic coordinates (i.e. latitude and longitude) of a vehicle equipped with a GPS receiver, a gyrometer and an odometer, along with the associated level of precision. The localization sensors used for estimation purposes (in this case, the gyrometer and odometer) compensate for the lack of GPS availability when traversing masking zones. GYROLIS is employed during the post-processing phase, on the basis of data acquired in real time on the instrumented vehicle. This article shows, for two gyroscopes of different categories (fiber-optic KVH RD 2100 and micro-electro-mechanical MicroStrain 3DMG), that the real-time localization error (ranging between a few meters and several tens of meters per minute without GPS, depending on the sensor) is divided by 1.5 (for KVH) and 3 (for 3DMG) by means of smoothing. Results are derived from the linearized Rauch-Tung-Striebel algorithm. This software, which draws its originality by not being strictly specialized in GPS calculations nor dedicated to any single type of equipment, is intended for the sector of geomatics with a focus on applications in urban environments. Following the vehicle localization calculation, this package allows identifying the ultimate geo-referencing of road data and images collected by systems onboard this same vehicle.

* AUTEUR À CONTACTER :

David BÉTAILLE

David.betaille@lcpc.fr

INTRODUCTION ET ÉTAT DE L'ART

De nombreuses villes, communautés urbaines et collectivités territoriales se dotent de bases de données routières et d'images, lesquelles sont collectées automatiquement par des véhicules spécialisés. GPS est le système clé servant au géoréférencement de tels véhicules (et donc des données et images collectées), mais on connaît ses limites dans les environnements complexes et propices au masquage des satellites que présentent en particulier les villes. Ainsi, d'autres capteurs, dits à l'estime (odomètre et gyromètre par exemple), sont nécessaires pour aider le positionnement par satellites. Il s'agit alors d'un système de localisation hybride, basé sur un algorithme de fusion de données.

La fusion dans GYROLIS repose sur un filtrage de Kalman avec rejet des solutions GPS aberrantes. Ceci est très classique et constitue le fondement théorique de nombreux algorithmes implémentés dans les systèmes de navigation temps réel pour l'automobile [1, 2]. GYROLIS manipule des données qui doivent être conformes à certaines spécifications, mais en terme de capteurs, le logiciel est ouvert : il offre la possibilité de régler les paramètres du filtre de Kalman pour toute instrumentation de véhicule, pour peu qu'elle comprenne un récepteur GPS (différentiel ou non), un gyromètre (mesure de la vitesse de rotation verticale, c'est-à-dire en cap, à la fréquence de 10 Hz minimum) et un odomètre (mesure de la distance parcourue).

Mais GYROLIS travaille en temps différé (et non plus en temps réel) et il devient possible d'améliorer sensiblement la localisation d'un véhicule par un lissage des trajectoires calculées en traitant les données dans le sens horaire d'une part, et dans le sens anti-horaire d'autre part, c'est-à-dire en tenant compte non seulement des mesures passées, mais aussi des mesures futures. L'algorithme généralement appliqué dans le contexte bayésien est connu sous le nom de lisseur de Rauch-Tung-Striebel (RTS) dont une description peut être trouvée dans [3, 4], et son application est optimale pour les systèmes linéaires.

En fusion de données pour la localisation, l'algorithme RTS est appliqué au couplage des centrales inertielles (IMU) au GPS, avec l'espace d'état constitué non pas directement de la position à estimer mais en fait de la différence à la position vraie, cette différence suivant un modèle d'évolution linéaire [5, 6]. On se propose d'utiliser ici un état du système en position (et en cap) dont l'observation est directe par GPS (après projection) mais dont l'évolution est non linéaire. Ainsi cet article montre-t-il comment a été implémenté un lisseur de Rauch « étendu » (par analogie au filtre de Kalman étendu), qui permet par linéarisation au premier ordre de prendre en compte le modèle d'évolution du véhicule. Des éléments théoriques justifiant cette approximation pourront être lus dans [7].

GYROLIS présente une certaine originalité dans la mesure où l'offre du marché en fusion de données pour la localisation cible surtout les applications temps réel. De plus, l'offre pour la trajectographie en temps différé adresse, ou bien le calcul GPS cinématique seul à l'exclusion de tout autre capteur (Grafnav, GNSS Solutions, Trimble Total Control, Ski Pro...), ou bien des centrales inertielles complètes (c'est-à-dire instrumentant les 3 axes) dont le coût dépasse d'un ordre de grandeur (voire davantage) celui d'un seul gyromètre vertical assez satisfaisant pour nombre d'applications en navigation terrestre. Cette offre, très limitée, existe chez Ixsea (couplage « lâche » navigation inertuelle et positions GPS – *loose coupling*) et chez Applanix et Novatel (couplage « serré » navigation inertuelle et distances mesurées du récepteur GPS aux satellites – *tight coupling*), avec une spécialisation certaine des logiciels de fusion à des matériels particuliers. GYROLIS est ouvert du point de vue des capteurs. Il fusionne en 2D, et ne tirera donc pas le meilleur de centrales inertielles 3D de haut de gamme (celles-ci, exploitées par leurs logiciels dédiés, maintiennent une erreur sub-métrique là où GYROLIS, avec un seul gyromètre même excellent, atteint le mètre). Enfin, GYROLIS est diffusé gratuitement.

LES CAPTEURS À FUSIONNER

GYROLIS fusionne les données provenant de capteurs proprioceptifs (odomètre et gyromètre) et extéroceptifs (GPS).

■ GPS (différentiel)

Le positionnement par satellites apparaît naturellement très approprié pour fournir les coordonnées géographiques des véhicules, et leur utilisation ensuite dans des systèmes d'information géographique (SIG). Leur précision actuellement est de quelques mètres (la SA, *Selective Availability*, étant désactivée). Une précision sub-métrique sur des étendues larges de plusieurs centaines de kilomètres peut être obtenue en GPS différentiel grâce à des services payants de corrections diffusées par satellite géostationnaire, tels Omnistar en Europe, et plus récemment au moyen d'Egnos, qui est le service gratuit d'augmentation du GPS en Europe. Au sujet du GPS, le lecteur francophone pourra se référer à [8], qui illustre sur des exemples de séries temporelles de solutions l'intérêt du différentiel en terme de précision mais aussi de blancheur. En effet, ce sont principalement les délais atmosphériques sur les mesures GPS qui colorent l'erreur de position, et ils sont bien modélisés en DGPS. Ainsi, il reste l'éventualité de trajets multiples des signaux (surtout en ville), qui bien sûr affectent l'erreur résiduelle mais de manière assez transitoire en positionnement dynamique : un test de valeurs aberrantes est implémenté dans GYROLIS pour rejeter ces solutions.

En ce qui concerne les expérimentations présentées dans cet article, un récepteur TRIMBLE Ag132 a été monté à bord des véhicules d'essais (récepteur mono-fréquence L1) fonctionnant en DGPS, à 1 Hz.

Malheureusement, le GPS ne peut pas offrir un positionnement en continu des véhicules. Les masquages des satellites sont nombreux, avec dégradation ou coupure des signaux, particulièrement dans des environnements difficiles tels que la ville ou la forêt et la disponibilité d'une solution de navigation requiert la visibilité de 4 satellites (aux 3 inconnues de position s'ajoute le décalage de l'horloge du récepteur par rapport au temps universel). Les capteurs de localisation à l'estime sont à l'évidence nécessaires en complément du GPS, dans la mesure où ils pallient les masquages de ce dernier. Les deux types de capteurs additionnels qu'admet GYROLIS en entrée sont l'odomètre et le gyromètre (de cap).

■ Odomètre

On suppose donc le véhicule doté d'un dispositif d'odométrie, par exemple un codeur électromécanique. Sa calibration est possible par GPS PPK (*Post-Processed Kinematic*) en mode statique entre deux stations situées le long d'une longue ligne droite (typiquement : 1 km). On estime que l'incertitude de calibration égale 1 « pas » du codeur sur la distance parcourue, en supposant que :

- les roues ne glissent pas,
- la surface routière est parfaitement plane,
- le GPS PPK produit une erreur de positionnement négligeable.

Ainsi, pour des pas odométriques de quelques dizaines de centimètres selon les véhicules, on a une erreur de mesure de la distance parcourue de moins de 1 %.

On note qu'il est tout à fait possible d'estimer le pas odométrique « en ligne », c'est-à-dire dans le processus de filtrage présenté plus loin, en plus du calcul de la position et du cap. Avec les capteurs à bord, il est facile de prouver l'observabilité du pas codeur, parallèlement à celle de la position et du cap, à la seule condition que le véhicule ne soit pas à l'arrêt [9]. Cependant, il existe un compromis entre la capacité du processus à identifier une variation (assez improbable) du pas codeur et la précision des positions et caps calculés. Après étude, on a fait de choix de fixer le pas codeur, le considérant donc comme pré-déterminé.

■ Gyromètre (de cap)

Il existe une large gamme de gyromètres (souvent couplés à des accéléromètres dans des centrales inertielles). Deux technologies sont à la base de ces instruments : la fibre-optique (FOG : fiber-optic gyro) et la micro-électro-mécanique (MEMS : *micro-electro-mechanic system*). En résumé, les FOG mettent en application l'effet Sagnac bien connu des opticiens, les MEMS l'effet piézo-électrique d'un quartz.

Afin d'illustrer le propos, ce papier présente des résultats pour deux gyromètres des deux technologies. Les véhicules d'essais sont donc équipés ou bien d'un gyromètre à fibre optique (KVH RD 2100) délivrant la vitesse de rotation verticale à la fréquence de 10 Hz, ou bien d'une centrale MEMS (MicroStrain 3DMG à 76 Hz) dont on n'utilise que l'axe vertical. Ainsi, on obtient le cap par intégration de la vitesse de rotation verticale mesurée.

Le **tableau 1** donne les principales caractéristiques des gyromètres utilisés.

On peut considérer que l'erreur de mesure des gyromètres se compose d'un biais bien connu et bien corrigé en température pour le KVH, mais mal connu et partiellement dépendant de la température (une part restant aléatoire) pour le 3DMG. Au biais s'ajoute un bruit supposé blanc, dont l'intégration donne ce qu'il est d'usage d'appeler la « marche aléatoire » du capteur : le bruit fait évoluer l'angle dans une enveloppe en racine carrée du temps après intégration.

Préalablement au processus de fusion, il convient d'identifier le biais pour ne garder qu'un modèle purement stochastique de type bruit blanc gaussien sur la composante de bruit du capteur. Pour les capteurs de biais variable, une estimation en ligne est possible. On peut aussi augmenter le niveau du bruit, de sorte qu'il englobe la part inconnue du biais.

tableau 1
Caractéristiques principales des gyromètres vitaux KVH RD 2100 et MicroStrain 3DMG.

Capteur	KVH RD 2100	MicroStrain 3DMG
Bruit (marche aléatoire)	$0,083^\circ \cdot h^{-1/2}$	$3,5^\circ \cdot h^{-1/2}$
Instabilité du biais (à température constante) à court terme (1 heure)	non significatif	$0,02^\circ \cdot s^{-1}$ en 1 h
Biais (sur toute la gamme de température)	$< 0,4^\circ \cdot s^{-1}$	$< 0,7^\circ \cdot s^{-1}$

LE MODÈLE ET L'ALGORITHME

■ Filtrage

GYROLIS est fondé sur une modélisation très classique du véhicule et des capteurs à bord, et la phase initiale du calcul puise dans la théorie bien connue du filtrage bayésien avec un EKF ou filtre de Kalman étendu. Le vecteur d'état (noté X_k à l'instant k d'échantillonnage temporel) contient la position projetée dans un plan localement tangent à la surface de la terre et le cap $X_k = (x_k, y_k, \theta_k)$. Il serait possible d'y ajouter le biais du gyromètre et éventuellement le pas odométrique, mais leur estimation se ferait au détriment de la position et du cap. Le vecteur de commande $U_k = (\Delta s_k, \omega_k)$ se compose de la vitesse angulaire et la distance parcourue ; quant au vecteur d'observation $Y_k = (x_{GPS_k}, y_{GPS_k})$, il se résume à la solution de navigation GPS (elle aussi projetée), quand elle est disponible. Les étapes du filtre implémenté sont résumées ci-dessous.

- Étape d'évolution (ou de prédition)

$$\begin{aligned} x_{k+1|k} &= x_{k|k} + \Delta s_k \cdot \cos(\theta_k + \Delta\theta_k / 2) + v_x \\ y_{k+1|k} &= y_{k|k} + \Delta s_k \cdot \sin(\theta_k + \Delta\theta_k / 2) + v_y \\ \theta_{k+1|k} &= \theta_{k|k} + \Delta\theta_k \end{aligned} \tag{1}$$

« Δs_k » représente la variation de distance parcourue entre deux instants d'échantillonnage et « $\Delta \theta_k$ » correspond à une variation élémentaire du cap dans le même temps (T_s). Avec un gyromètre, qui donne une vitesse de rotation « ω_k », on a : $\Delta \theta_k = \omega_k \cdot T_s$. Ces équations sont non linéaires. Les bruits de modèle (v_x et v_y additifs, l'équation en θ est exacte) et de commande (v_{odo} et v_{gyro} , additifs respectivement sur Δs_k et ω_k) sont supposés centrés, gaussiens et blancs, de matrice de variance-covariance Q_{mod} et Q_{com} . Le filtre de Kalman dit « étendu » s'applique en fait aux équations (1) linéarisées autour de l'état courant (développement de Taylor au premier ordre). La matrice de variance-covariance *a priori* $P_{k+1|k}$ est donnée par :

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + B_k Q_{com} B_k^T + Q_{mod} \quad (2)$$

où A_k et B_k représentent les matrices jacobienes d'évolution par rapport à l'état et à la commande (dérivées partielles des équations (1) par rapport à (x_k, y_k, θ_k) d'une part et à $(\Delta s_k, \omega_k)$ d'autre part, calculées en l'état et la commande courants à l'instant k).

Nota : s'il y a prédiction seule (en l'absence de position GPS), on remplace les notations $X_{k+1|k}$ et $P_{k+1|k}$ par $X_{k+1|k+1}$ et $P_{k+1|k+1}$ dans les équations (1) et (2) respectivement.

• Étape d'observation (ou d'estimation), elle aussi bruitée (bruits v_{xGPS} et v_{yGPS} , sur x_{GPS_k} et y_{GPS_k} , additifs), de matrice de variance-covariance Q_{gps}

$$X_{k+1|k+1} = X_{k+1|k} + K_{k+1} (Y_{k+1} - H X_{k+1|k}) \quad (3)$$

avec $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ et avec K_{k+1} , gain de Kalman, égal à :

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} H_{k+1}^T \left(H_{k+1} P_{k+1|k} H_{k+1}^T + Q_{gps} \right)^{-1} \quad (4)$$

La matrice de variance-covariance *a posteriori* $P_{k+1|k+1}$ est donnée par :

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1|k} \quad (5)$$

Le modèle d'évolution (qui sert à l'étape de prédiction) et l'observation GPS sont entachés d'erreur : on considère que l'erreur de prédiction et l'erreur d'observation sont caractérisées par des distributions normales, dont les moyennes sont supposées nulles et dont les variances doivent être ajustées en fonction des conditions de roulement/glisser et des capteurs choisis. La blancheur de l'erreur d'estimation de position GPS est une hypothèse communément admise, et dont on s'approche en GPS différentiel (DGPS). Enfin, on note que le modèle d'évolution dans le plan tangent (2D et non 3D) constitue une approximation corrigée à l'étape d'observation et donc négligeable (sauf à parcourir des dizaines de km sans GPS).

■ Lissage

À l'issue du filtrage de Kalman, qui est applicable en temps réel, GYROLIS se propose de tirer partie du temps différé. La causalité n'est pas contraignante et on va chercher à lisser les sorties du filtre. La phase de lissage qui suit celle du filtrage est donc nettement plus originale. Le lisseur s'initialise en le dernier état prédit (ou estimé) après application du filtre de Kalman : $X_{k+1,lis} = X_{k+1|k+1}$, avec comme matrice de variance-covariance : $P_{k+1,lis} = P_{k+1|k+1}$. Puis on obtient l'état lissé suivant en ajoutant à l'état prédit (ou estimé) une correction proportionnelle à l'écart entre l'état lissé pré-

cédent et l'état correspondant prédict par le filtre de Kalman. Le gain, pour un modèle d'évolution non linéaire, comporte à nouveau la jacobienne A_k . Ainsi les équations de lissage s'écrivent, s'il y a prédition et estimation :

$$X_{k,lis} = X_{k|k} + C_k (X_{k+1,lis} - X_{k+1|k}) \quad (6)$$

avec C_k , gain de lissage, égal à :

$$C_k = P_{k|k} A_k^T P_{k+1|k}^{-1} \quad (7)$$

La matrice de variance-covariance *après lissage* $P_{k,lis}$ est donnée par :

$$P_{k,lis} = P_{k|k} + C_k (P_{k+1,lis} - P_{k+1|k}) C_k^T \quad (8)$$

S'il y a prédition seule, la notation indiciaire $_{k+1|k+1}$ remplace $_{k+1|k}$ dans les équations (6) à (8).

■ Algorithme complet

L'algorithme complet déroule les étapes suivantes à la période d'échantillonnage : $T_s = 0,1$ s (le cas échéant, GYROLIS pré-intègre les mesures du gyromètre à la fréquence de 10 Hz) :

- calcul de la trajectoire filtrée : on note que 10 prédictions se suivent entre deux estimations. Celles-ci donnent lieu à détection et rejet éventuels de solution GPS aberrante (une distance de Mahalanobis est calculée et l'on recherche pour la loi du χ^2 avec une confiance donnée, par exemple 95 %, si cette distance est acceptable) ;
- calcul de la trajectoire lissée : on repasse par les mêmes étapes de prédition et d'estimation successives que lors du filtrage.

Au final, les trajectoires filtrée et lissée sont fournies, ainsi que les précisions estimées.

On note que les états $X_{k+1|k}$ et les matrices de variance-covariance $P_{k+1|k}$ intermédiaires quand il y a prédition et estimation ne sont généralement pas conservées quand on procède au seul filtrage ; ils deviennent nécessaires au lissage.

RÉSULTATS

GYROLIS a été écrit sous Matlab en utilisant l'environnement graphique pour ouvrir les fichiers de données, régler les paramètres de filtrage, afficher les résultats... Au final, le code a été compilé au moyen de la *toolbox compiler* et des librairies C/C++ usuelles associées.

figure 1
Paramètres de réglage pour les deux configurations
a : gyromètre KVH
b : gyromètre 3DMG.

a b	Offset gyro (en °/s) : <input type="text" value="-0.05"/>		Offset gyro (en °/s) : <input type="text" value="0"/>				
	Pas codeur (en m) : <input type="text" value="0.1208"/>		Pas codeur (en m) : <input type="text" value="0.1208"/>				
Ecart-types (i.e. racine carrée des variances) :				Ecart-types (i.e. racine carrée des variances) :			
odomètre :	<input type="text" value="0.049"/>	m	odomètre :	<input type="text" value="0.049"/>	m		
x et y modèle :	<input type="text" value="0.15"/>	m	x et y modèle :	<input type="text" value="0.15"/>	m		
cap modèle :	<input type="text" value="0"/>	*	cap modèle :	<input type="text" value="0"/>	*		
gyromètre :	<input type="text" value="0.0044"/>	°/s	gyromètre :	<input type="text" value="5"/>	°/s		
gps :	<input type="text" value="2"/>	m	gps :	<input type="text" value="2"/>	m		
dgps :	<input type="text" value="0.5"/>	m	dgps :	<input type="text" value="0.5"/>	m		
Position antenne / milieu essieu arrière (en m) :				Position antenne / milieu essieu arrière (en m) :			
<input type="text" value="2.41"/>	<input type="text" value="en avant"/>	<input type="button" value="▼"/>	<input type="text" value="2.41"/>	<input type="text" value="en avant"/>	<input type="button" value="▼"/>		
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="à gauche"/>	<input type="button" value="▼"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="à gauche"/>	<input type="button" value="▼"/>		

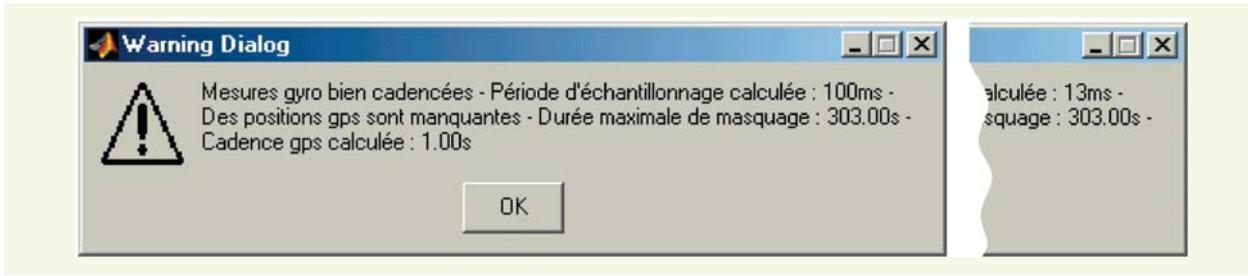


figure 2

*Diagnostic GYROLIS
des données en présence
pour le KVH (10 Hz) et le
3DMG (76 Hz).*

L'interface graphique de GYROLIS permet de régler les variances des bruits de modèle, de commande et de mesure (figure 1). De façon assez pragmatique, le réglage peut se faire au moyen d'un jeu d'essais-erreurs sur tout site où les conditions d'observation GPS sont idéales et pour lesquels le logiciel simulera des périodes de masquage. Le réglage est convenable quand les erreurs prédictes enveloppent bien les erreurs vraies. Il n'est valide que pour l'échantillonnage choisi, à savoir $T_s = 0,1$ s.

On illustre le propos à partir d'un essai réalisé en ville de Rezé avec un véhicule équipé de deux gyromètres de classe différente. Les réglages peuvent être faits sur la première moitié du parcours, non masquée, alors que la deuxième l'est pendant 5 minutes (figure 2).

On note que l'écart type appliqué à l'odomètre est proportionnel à son pas : $\text{pas}/\sqrt{6}$ (c'est l'écart type d'une différence de lois uniformes) et que le modèle en x et y est caractérisé par un seul écart type ($v_x = v_y$) réglé à 0,15 m (c'est l'erreur que l'on considère possible en 0,1 s). Pour le gyromètre KVH, on admet que la pure marche aléatoire s'applique (cf. tableau 1) et donc l'écart type égale cette marche aléatoire divisée par $\sqrt{T_s}$. Par contre, l'écart type ainsi calculé est petit pour le 3DMG dont on sait que le biais varie, et on le règle donc par un processus d'essais-erreurs (cf. figure 3). Enfin, le GPS est submétrique (0,5 m) car différentiel EGNOS.

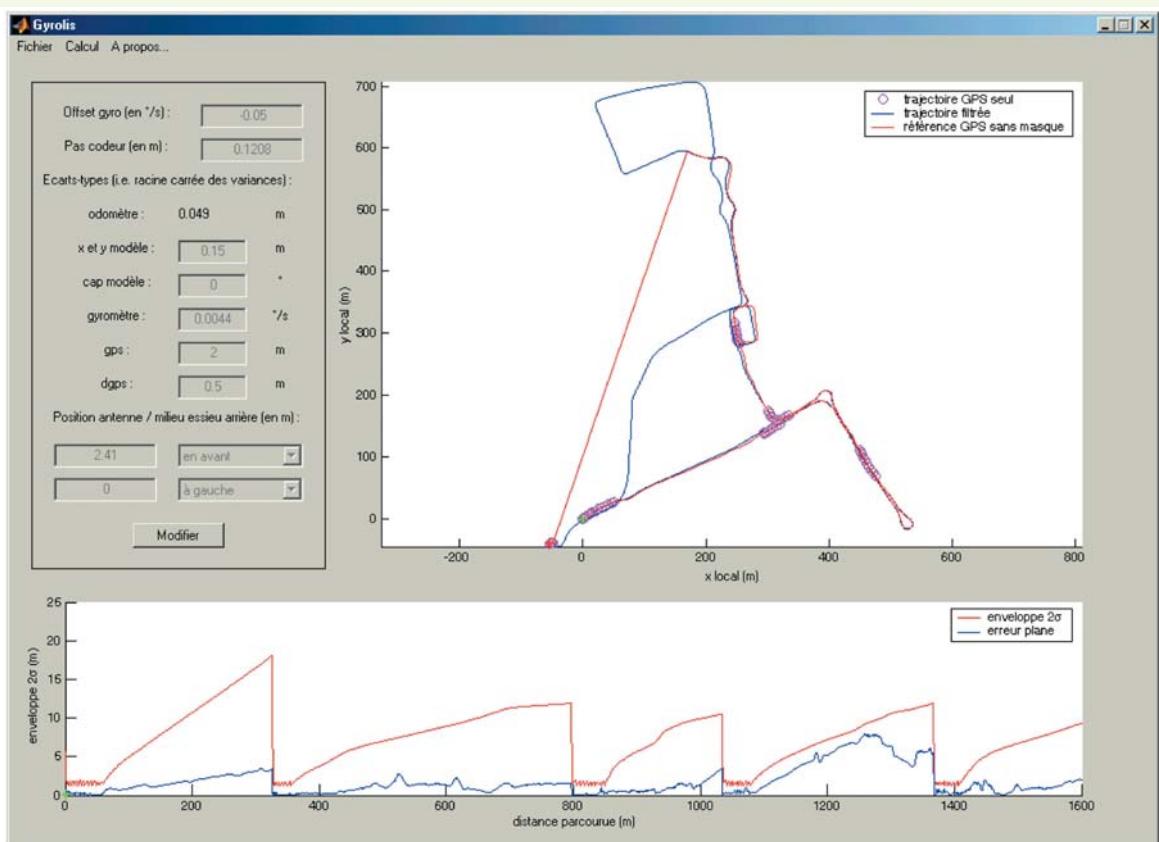
Les figures 3a à 6a, pour le gyromètre KVH et les figures 3b à 6b pour le gyromètre 3DMG montrent le résultat :

- du filtrage avec simulation de masques d'une minute (afin de régler les paramètres) ;
- du lissage avec la même simulation (à comparer au filtrage précédent en terme d'erreur) ;
- puis du filtrage simple (applicable en temps réel) ;
- et enfin du lissage (applicable en temps différé seulement).

Sur cette série de figures, on trouvera en haut à gauche un rappel des paramètres de réglage ; en haut à droite une vue en plan de la trajectoire du véhicule où les axes x et y (gradués en m) représentent les axes de projection locale tangente à la terre ; en bas l'erreur prédicta et, pour les figures 3 et 4, l'erreur vraie (en m) le long du parcours (en m).

Les ronds magenta représentent les solutions de navigation GPS en présence, tandis que les trajectoires calculées en filtrage ou lissage par GYROLIS figurent en trait continu bleu. Le lecteur se référera aux légendes portées en haut à droite de chaque figure.

Pour le KVH, l'erreur de position croît en $t^{1/2}$ car l'erreur d'intégration angulaire est petite devant l'erreur du modèle d'évolution, et le bruit blanc correspondant à ce dernier est intégré une fois. Par contre, cette même erreur croît en $t^{3/2}$ pour le 3DMG, ce qui équivaut à intégrer deux fois le bruit blanc modélisant l'erreur du gyromètre, qui est alors prépondérante.



a

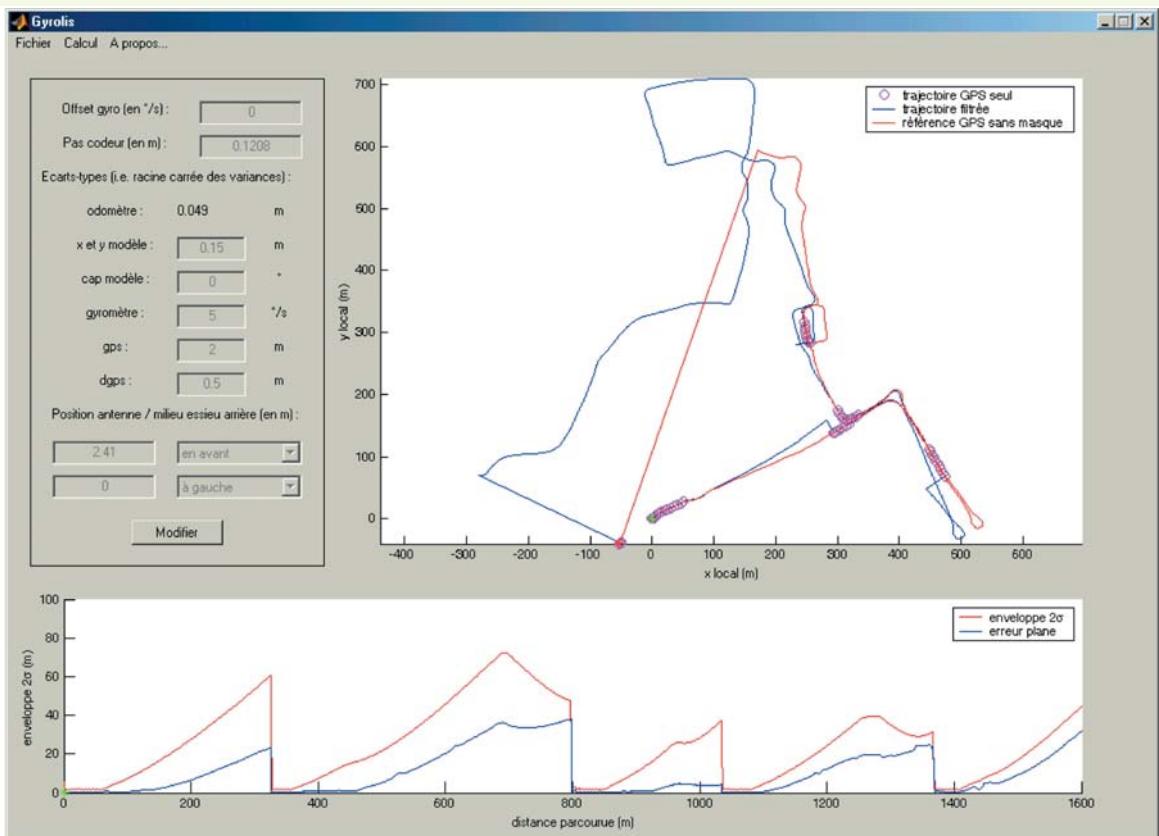


figure 3

Réglage avec simulation de masques d'une minute : seule la première moitié du parcours est exploitable, la deuxième donnant lieu à un masque réel de 5 minutes. On a zoomé sur l'erreur vraie et l'enveloppe d'erreur prédicté à 2 écarts types (qui contient bien l'erreur vraie, validant ainsi le réglage).

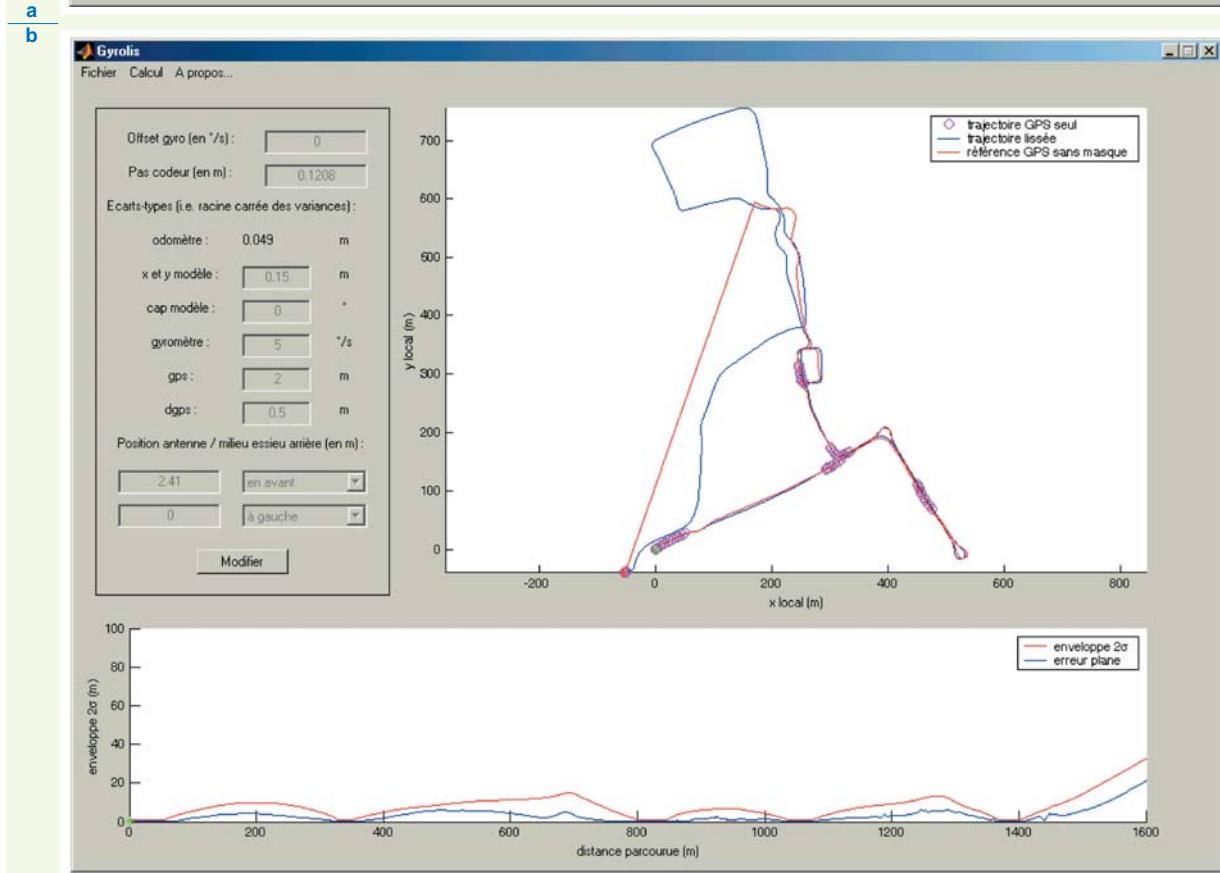
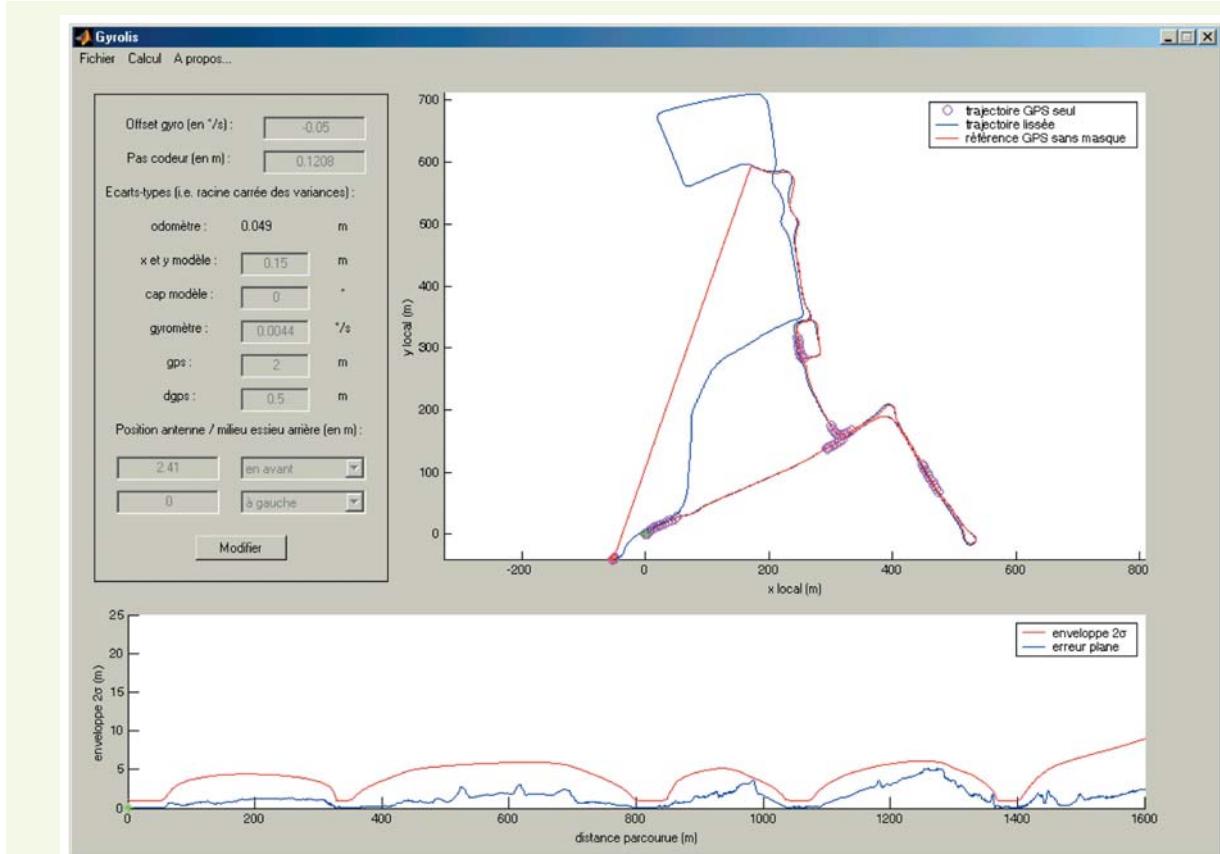


figure 4

Démonstration de l'intérêt du lissage sur la même série de masques que précédemment (cf. figure 3). L'erreur de position croît en $t^{1/2}$ pour le KVH contre $t^{1/2}$ pour le 3DMG en filtrage. Cependant, en lissage, l'erreur de position atteinte est voisine de celle à mi-masque en filtrage, d'où une diminution d'un facteur 1,5 et 3 respectivement.

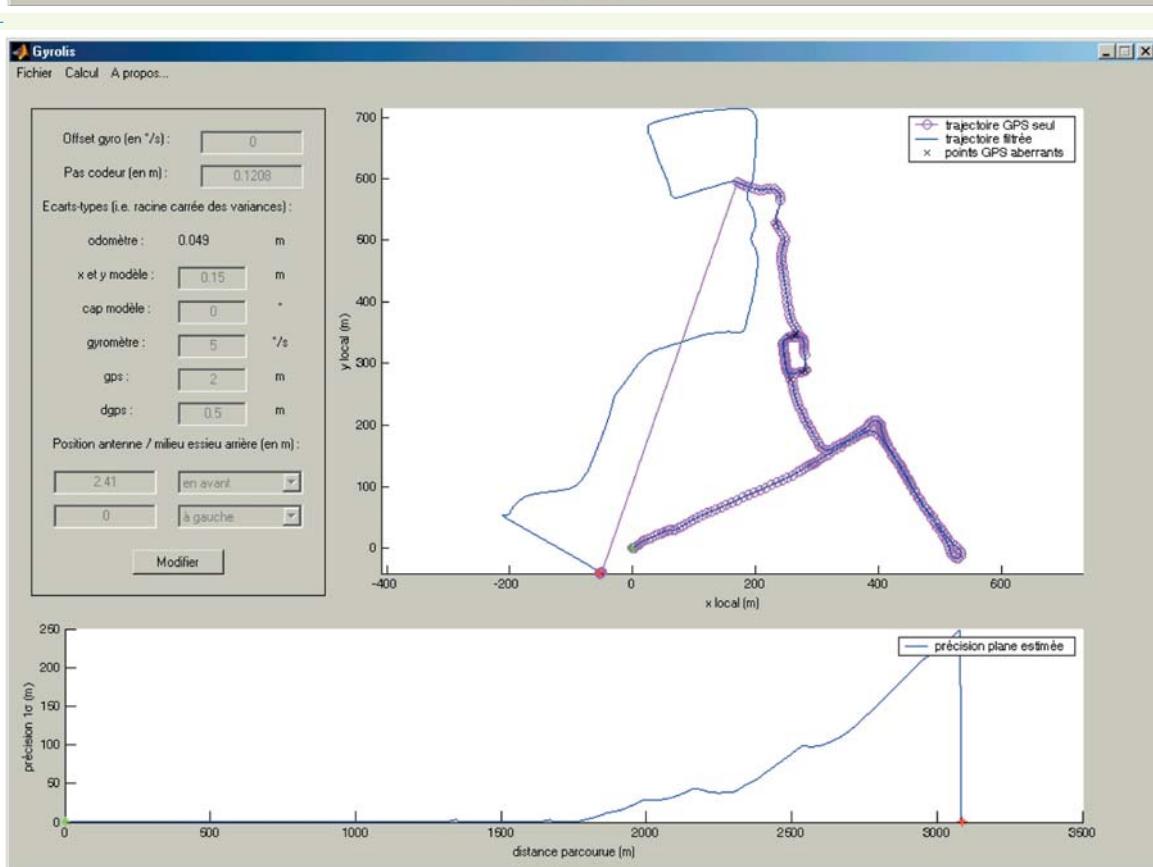
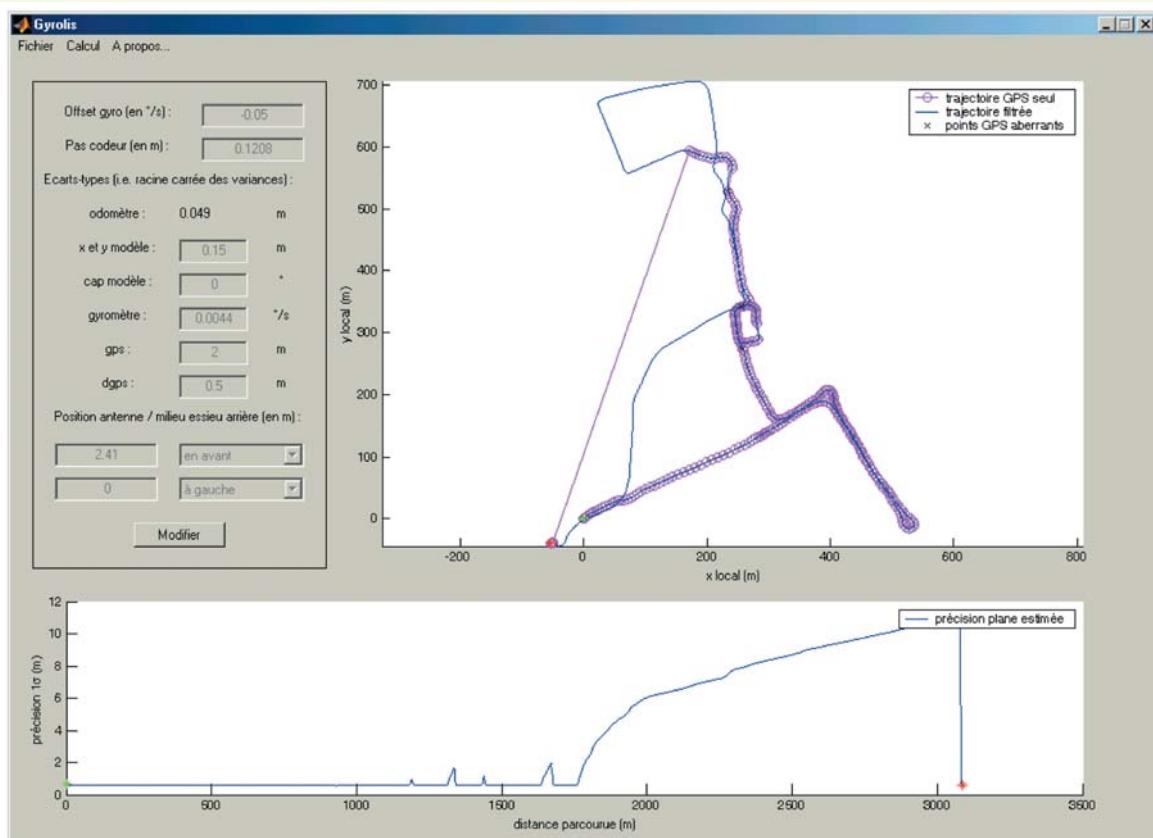


figure 5

Filtrage simple : pendant la deuxième partie du parcours, les capteurs proprioceptifs assurent la continuité du positionnement. La dérive sur 5 minutes du processus de navigation < à l'estime > montre qu'à l'évidence les gyromètres sont de classe différente. Des points GPS aberrants sont éliminés (cf. figure 7).

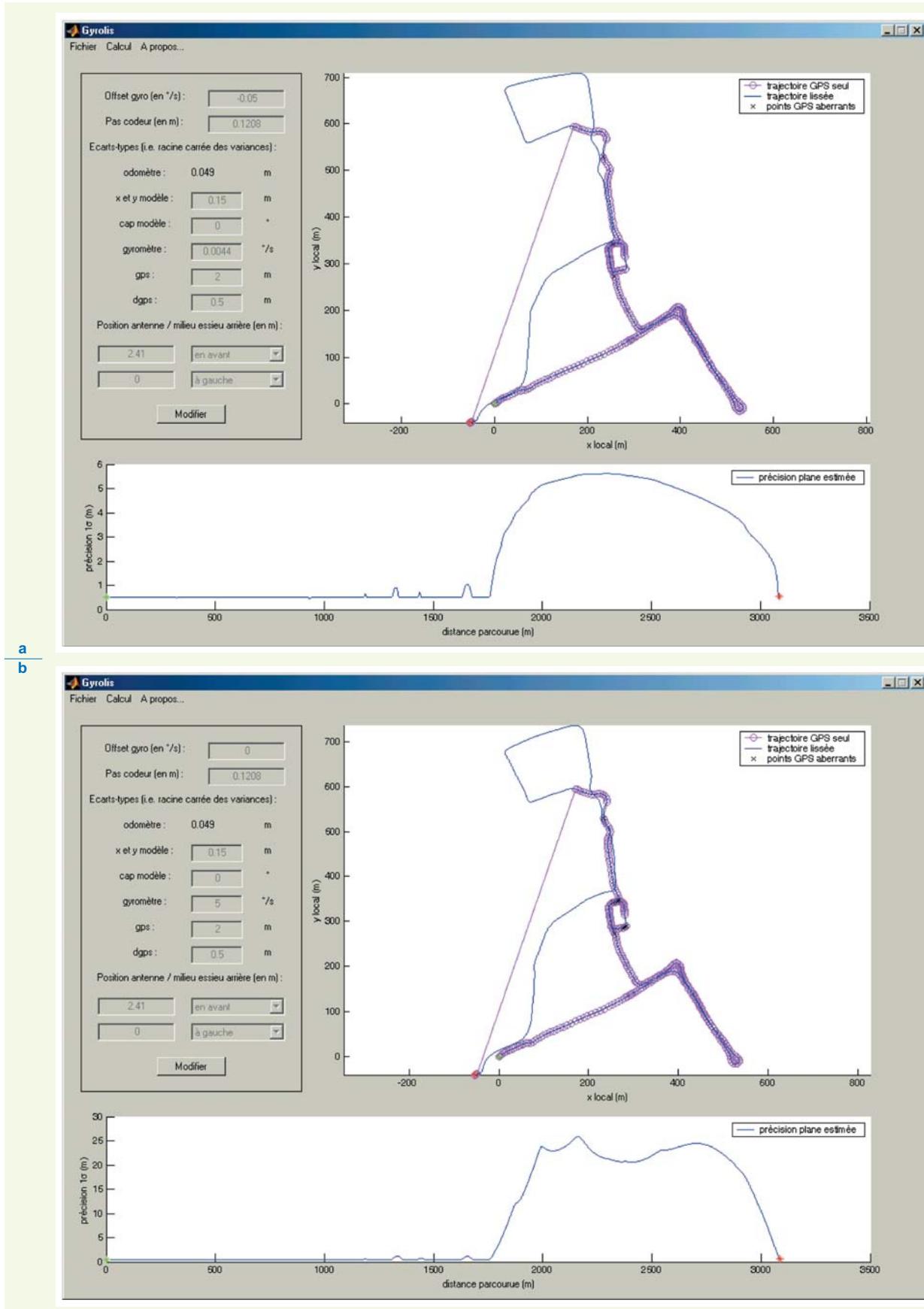
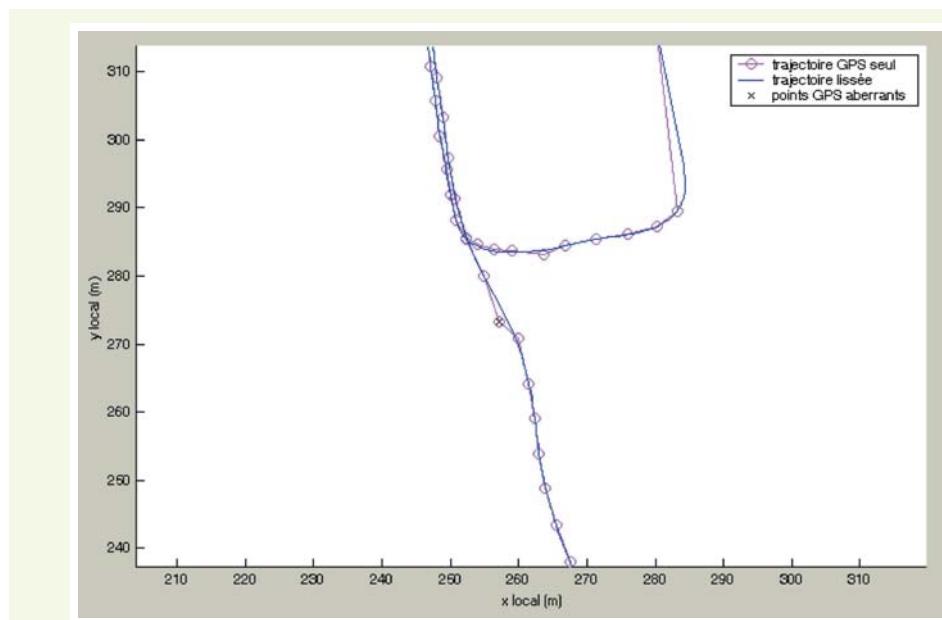


figure 6

Lissage final, mettant en œuvre l'algorithme complet de GYROLIS : la trajectoire calculée à partir du gyromètre KVH reste précise à 5 m près pendant le masque de 5 minutes, contre 25 m pour celle calculée à partir de la centrale 3DMG (à 2 écarts types).

Une fois les réglages faits, des points aberrants peuvent être détectés lors du filtrage et du lissage. Ils sont représentés graphiquement par des croix noires. La **figure 7**, qui est un zoom de la figure 5a, fait ressortir un point GPS aberrant (qui n'a donc été utilisé ni pour filtrer ni pour lisser) : on note qu'un point aberrant peut présenter un décalage latéral mais aussi axial.

figure 7
Zoom sur la figure 5a
au voisinage d'un point
GPS aberrant.



CONCLUSIONS

Cet article présente les résultats du couplage entre navigation par GPS et navigation à l'estime, cette dernière étant simplement basée sur un odomètre et un gyromètre, sous hypothèse de déplacement localement plan. Un filtrage de Kalman, puis un lissage de Rough, sont successivement appliqués aux données. L'article montre, pour deux gyromètres de classe différente (un gyromètre à fibre optique KVH RD 2100 et un gyromètre micro-électro-mécanique MicroStrain 3DMG), la dérive atteinte pendant des périodes de masquage GPS d'une minute et 5 minutes. Celle-ci est d'un ordre de grandeur plus grande s'agissant du MicroStrain 3DMG (MEMS) par rapport au KVH RD 2100 (FOG). On retiendra pour le KVH une erreur planimétrique qui croît en $t^{1/2}$ (car l'erreur du modèle d'évolution est grande devant l'erreur d'intégration angulaire) à raison de 5 m en une minute environ, et 10 m en 5 minutes, alors qu'elle croît plutôt en $t^{3/2}$ pour le 3DMG. L'enveloppe d'erreur de ce dernier correspond à un bruit blanc (modélisant l'erreur du gyromètre) après une double intégration.

Le lissage, qui est une extension de l'algorithme de Rough-Tung-Striebel dans le domaine non-linéaire, permet une division par 1,5 de la dérive atteinte en filtrage pour le KVH (resp. 3 pour le 3DMG). Ces chiffres résultent d'une part de la croissance de l'erreur de position en $t^{1/2}$ (resp. $t^{3/2}$) en filtrage, et du processus de lissage lui-même, dont l'effet revient en première approximation à diviser par deux l'intervalle de temps entre deux estimations GPS, donc notamment diviser par deux la durée des masques. Le lissage, bien sûr, n'est pas causal, et ne s'applique donc pas en temps réel.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 BENNETT S.M., ALLEN D.E., ACKER W., KIDWELL R., *Blended GPS/DR Position Determination System*, KVH Industries Inc., white paper, **1996**.
- 2 ABBOTT E., POWELL D., Land Vehicle Navigation Using GPS, *Proceedings of the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.)*, January **1999**, volume **87**, 1.
- 3 LABARRÈRE M., KRIEF J.-P., GIMONET B., *Le filtrage et ses applications*, 3^e édition, Cépaduès Toulouse, **1993**.
- 4 BROWN R.G., HWANG P.Y.C., *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley and Sons Inc., **1992**.
- 5 NASSAR S., Different Algorithms for Bridging Kinematic DGPS Outages Using SINS/DGPS Integration, *ION GPS*, Oregon, September **2002**.
- 6 WAEGLI A., SKALOUD J., *Assessment of GPS/MEMS-IMU Integration Performance in Ski Racing*, ENC, May **2007**.
- 7 SIMANDI M., DUNIK J., Design of Derivative-Free Smoothers and Predictors, *SYSID*, mars **2006**.
- 8 DUQUENNE F., BOTTON S., PEYRET F., BÉTAILLE D., WILLIS P., *GPS – localisation et navigation par satellites*, 2^e édition, Hermès Lavoisier, **2005**.
- 9 BONNIFAIT P., *Localisation précise en position et attitude des robots mobiles d'extérieur à évolutions lentes*, thèse de Doctorat, université de Nantes, **1997**.

ANNEXE

Le logiciel GYROLIS, qui a été développé au LCPC par David Bétaille (avec une contribution de Philippe Bonnifait de l'IRCCYN), est un produit de la recherche en robotique et localisation qui est arrivé à maturité avec sa mise en ligne en *freeware* sur le site internet du LCPC en 2007 dans le contexte général aujourd’hui très porteur de la géomatique et particulièrement ses applications en milieu urbain. Il est diffusé avec un logiciel d’acquisition multi-capteurs sous Windows XP (conçu par un élève ingénieur UTC, Vincent Harlé, en 2005) qui délivre directement des données conformes aux spécifications GYROLIS, notamment en termes de garantie de bonne datation des données (c'est-à-dire à quelques millisecondes près). En configuration standard, ce logiciel dispose d'un jeu spécifique de capteurs pris en charge, comportant entre autres les gyromètres cités dans cet article, et ce jeu est extensible.

