

EGNOS ON THE ROAD 2

Centre de Nantes
Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais Cedex

Site Web : www.lcpc.fr

Département Mesure
Auscultation et Calcul
Scientifique

Groupe Géolocalisation

Rapport final V 2.6

Rapport établi le : 15/07/2014

Auteurs : David BETAILLE, François PEYRET - LCPC/MI/IGEOLC
david.betaille@lcpc.fr francois.peyret@lcpc.fr

Etablissement public
à caractère scientifique
et technologique



N° 9915173 pour les sites
de Paris et de Nantes

Paris (siège)
58, Boulevard Lefebvre
75732 Paris Cedex 15

Nomenclature d'activité : Projet EGNOS ON THE ROAD 2
Référence sur Numéro de contrat* : 13K05182 – Rapport final – v 2.6

Confidentialité : confidentiel

* le cas échéant

Marne-la-Vallée

Satory-Versailles

David Bétaille – MACS – GEOLOC
François Peyret – MACS - GEOLOC

SOMMAIRE

Historique des versions.....	5
Documents applicables et références	5
Documents applicables	5
Documents références	5
Liste des Figures.....	6
Liste des Tableaux	7
Glossaire.....	8
1 Introduction.....	9
1.1 Contexte	9
1.2 Rappel des objectifs contractuels	9
1.3 Rappel des données qui ont été traitées	10
1.4 Objet et structure du document	10
2 Etude de méthodes d'hybridation GNSS – inertiel	12
2.1 Les méthodes d'hybridation pour la localisation en général	12
2.1.1 Terminologie	12
2.1.2 Les capteurs.....	12
2.1.3 Le principe d'hybridation	12
2.1.4 Hybridation lâche et hybridation serrée	14
2.2 Les méthodes d'hybridation développées dans l'étude	14
3 Les réglages effectués pour le modèle non-holonome d'évolution du véhicule en couplage lâche et serré	17
4 Les réglages effectués pour les observations GPS et les tests de consistance opérés sur ces observations.....	17
4.1 Bruits de mesures GPS	17
4.2 Tests de consistance	19
5 Les réglages effectués pour le modèle accéléré plan	20
5.1 Bruits du modèle accéléré plan	20
5.2 Seuil de vitesse	24
5.3 Test de consistance complet	27
5.4 Résultats sur toute la session Lyon2 (Portique1 puis Urbain, en partie)	29

6	Résultats compilés sur tout Lyon, scénario par scénario	32
7	Conclusions sur l'hybridation	38
7.1	Hybridation avec capteurs à l'estime alimentant le modèle d'évolution du véhicule	38
7.2	Hybridation serrée avec mesures à l'estime considérées comme des observations, sans modèle de véhicule	39
7.3	Hybridation en général	39
8	La corrélation cartographique	39
9	Conclusions générales sur l'étude et recommandations.....	41
Annexe 1 : Les modèles d'évolution et d'observation des 3 méthodes d'hybridation utilisées		
		42
9.1	Repère local de travail, modèle du véhicule et bras de levier	42
9.2	Algorithme en couplage lâche	43
9.3	Algorithmes en couplage serré	43
9.3.1	Couplage serré reprenant le modèle du couplage lâche	43
9.3.2	Couplage serré passant les mesures odo/gyro en observation	44
9.3.3	Couplage serré utilisant le modèle accéléré plan	45

Historique des versions

Version	Date	Contenu/modification	Nom
1.0	17/09/10	Création et alimentation des parties relatives à l'hybridation	D. Bétaille
2.0	13/10/10	Modification du plan, modifications et compléments sur l'hybridation, ajout des parties conclusives sur l'étude	F. Peyret, D. Bétaille
2.3	20/10/10	Présentation des résultats sur les séquences des scénarios EOTR1	D. Bétaille
2.5	22/10/10	Compléments sur les résultats et les conclusions	D. Bétaille, F. Peyret
2.6	02/11/10	Compléments sur les résultats et les conclusions	W. Vigneau, D. Bétaille

Documents applicables et références

Documents applicables

[DA1] Etude des performances d'EGNOS pour les applications télépéage, Convention MEEDDM/DGITM/SAGS/MT avec le LCPC n° 6835.

[DA2] Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces ICD-GPS-200 rev C.

[DA3] RTCA DO 229C : MOPS Standards for GPS/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment.

Documents références

[DR1] EGNOS ON THE ROAD 2ème phase - Phase 1 – tâche 12 – Dépouillement et analyse des données (mesures expérimentales) – Jérôme Soubielle ([EOTR2_M3S_D1 12_Analyse_v1.0.pdf](#))

[DR2] EGNOS ON THE ROAD 2ème phase - Phase 1 – tâche 1 – Contribution à la tâche 13 – Analyse des effets des pare-brises athermiques – Jérôme Soubielle ([EOTR2_M3S_D1 13_AnalyseParebriseAthermique_v1.0.pdf](#))

[DR3] EGNOS ON THE ROAD 2ème phase - Phase 2 – tâche 23 – Analyse des performances d'hybridation – Jérôme Soubielle ([EGNOS_ON_THE_ROAD_2_M3S_D2.23_AnalysePerfos_v3.0.doc](#))

Liste des Figures

Figure 1 : Rappel des tâches contractuelles	9
Figure 2 : L'odomètre utilisé	10
Figure 3 : Le gyromètre utilisé	10
Figure 4 : L'antenne patch derrière le pare-brise.....	10
Figure 5 : Le modèle d'évolution du véhicule de type « bicyclette »	13
Figure 6 : La méthode n° 1 : hybridation lâche avec modèle d'évolution du véhicule	14
Figure 7 : La méthode n° 2 : hybridation serrée avec modèle non-holonome du véhicule	15
Figure 8 : La méthode n° 3 : hybridation serrée avec modèle accéléré plan du véhicule.....	16
Figure 9 : Résidus de pseudo-distances et enveloppe à 1 UDRE : les 8 enregistrements de 10 minutes sont clairement séparables et on trouve pour les 3 derniers des résidus importants car ils correspondent au scénario urbain	18
Figure 10 : trajectoires planes calculées (Lyon2 – log1).....	20
Figure 11 : zoom trajectoires planes calculées (Lyon2 – log1).....	21
Figure 12 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1)	21
Figure 13 : erreur plane en norme (HPE) et son enveloppe (HPL) (Lyon2 – log1)	22
Figure 14 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1, sans masque)	23
Figure 15 : erreurs erreur plane en norme (HPE) et son enveloppe (HPL) (Lyon2 – log1, sans masque).....	23
Figure 16 : trajectoires planes calculées (Lyon2 – log1, avec masque, avec odo/gyro)	24
Figure 17 : erreur plane en norme (HPE) et son enveloppe (HPL) (Lyon2 – log1, avec masque, avec odo/gyro) ...	25
Figure 18 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1, avec masque, avec odo/gyro).....	25
Figure 19 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1, sans masque, avec mesures à l'estime et seuil de vitesse de 2 m/s).....	26
Figure 20 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1, sans masque, avec mesures à l'estime et seuil de vitesse de 3.6 m/s)	26
Figure 21 : zoom trajectoires planes calculées (Lyon2 – log6, avec test des pseudo-distances)	27
Figure 22 : zoom trajectoires planes calculées (Lyon2 – log6, avec test des mesures Doppler).....	27
Figure 23 : zoom trajectoires planes calculées (Lyon2 – log6, avec tests des pseudo-distances et des mesures Doppler).....	28
Figure 24 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (l'essai utilisé pour régler est au début).....	31
Figure 25 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (l'essai utilisé pour régler est au début).....	31

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1 : Résidus moyens de pseudo-distance et mesures Doppler sur la session Lyon2</i>	18
<i>Tableau 2 : Résultats avec un reset à 10 s sur la session Lyon2</i>	29
<i>Tableau 3 : Résultats avec un reset à 3 s sur la session Lyon2</i>	30
<i>Tableau 4 : Résultats pour le scénario Portique 1</i>	32
<i>Tableau 5 : Résultats pour le scénario Portique 2</i>	33
<i>Tableau 6 : Résultats pour le scénario Urbain</i>	34
<i>Tableau 7 : Résultats pour le scénario Corridor</i>	35
<i>Tableau 8 : Liste des masques pour chaque scénario</i>	36
<i>Tableau 9 : Liste des masques pour chaque scénario</i>	37

Glossaire

DOP	Dilution Of Precision
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HPE	Horizontal Position Error
HPL	Horizontal Protection Level
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
M3S	M3 Systems
MI	Misleading Information
MOPS	Minimum Operational Performance Standards
NMI	Near Misleading Information

1 Introduction

1.1 Contexte

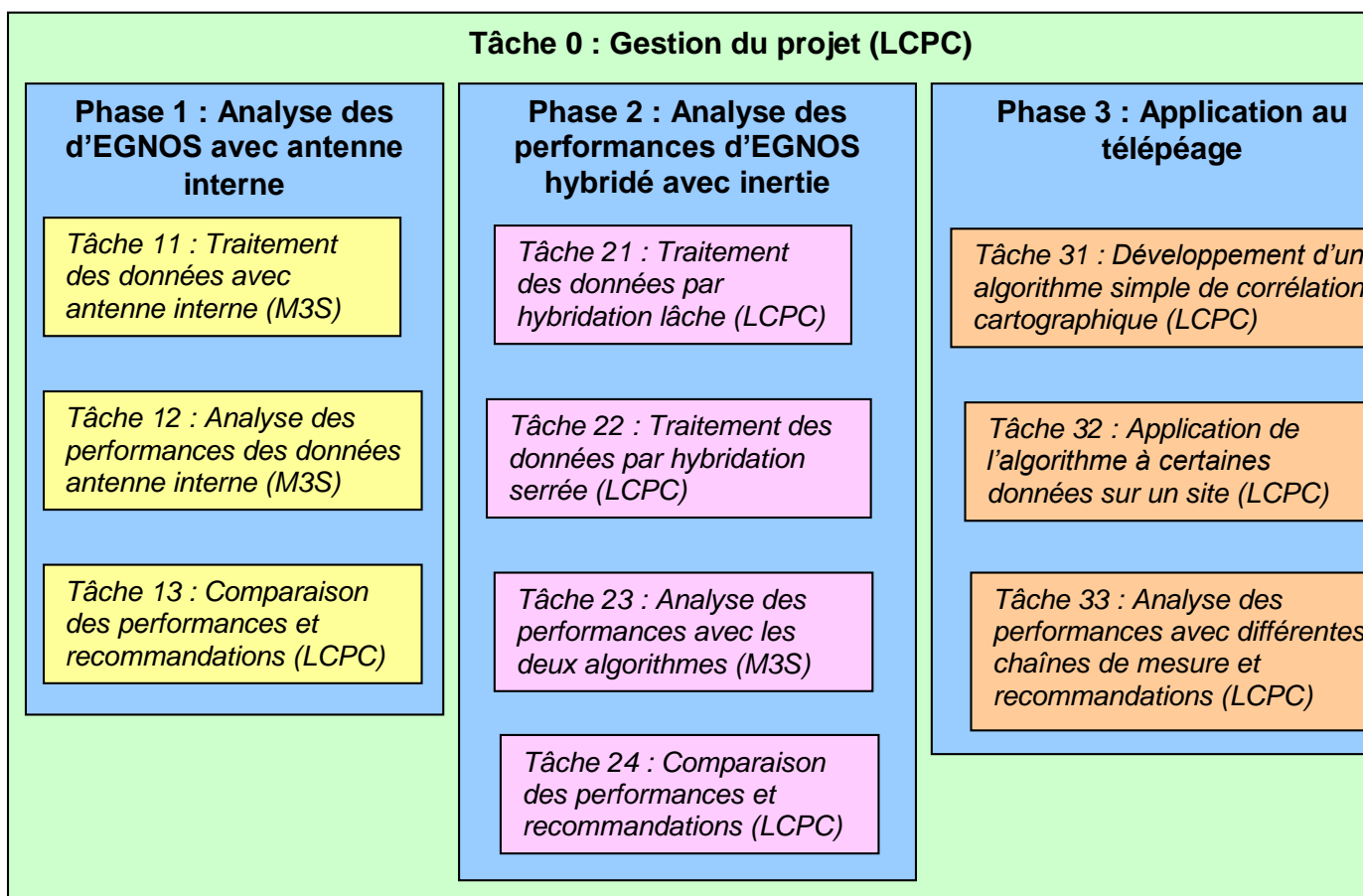
Le contexte d'EOTR 2 est le même que celui d'EOTR 1, à savoir : les applications dans le transport, et en particulier le transport terrestre, des GNSS (systèmes de positionnement par satellites), et plus spécifiquement : GPS et son augmentation européenne EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay System*). Cette étude se positionne néanmoins plus particulièrement sur des aspects particulièrement significatifs pour l'application télépéage de type Eco-taxe PL.

Par rapport à l'étude précédente, trois objectifs sont visés :

- analyse des performances EGNOS pour un récepteur bas-coût dont l'antenne est placée à l'intérieur du véhicule (configuration "spéciale" Eco-taxe PL),
- analyse des performances hybridées EGNOS avec capteurs inertiels,
- étude sur l'influence des algorithmes de corrélation cartographique dans le cadre des applications de télépéage GNSS.

1.2 Rappel des objectifs contractuels

La figure ci-dessous récapitule les tâches contractuelles prévues lors de l'établissement de la convention.



La tâche supplémentaire a été réalisée par M3S et peut être considérée comme étant une contribution de M3S à la tâche 13.

1.3 Rappel des données qui ont été traitées

Dans les tâches 21 et 22 qui ont précédé les tâches d'analyse 23 et 24, il a été choisi de traiter les données acquises pendant les campagnes d'EOTR1 de la configuration suivante, correspondante à la configuration attendue pour l'application Eco-Taxe PL :

- capteur EGNOS bas-coût Ublox,
- avec corrections EGNOS appliquées systématiquement (serveur EMS),
- antenne patch bas-coût (Hirschmann GPS-7M) placée derrière le pare-brise, sur le tableau de bord du véhicule (Clio),
- données capteurs à l'estime provenant :
 - o de l'odomètre intégré dans les roues arrière de notre véhicule d'essai (40 impulsions par tour de roue, c'est-à-dire 1 impulsion tous les 4.27 cm parcourus)
 - o d'un gyromètre de cap à fibre optique moyenne gamme KVH E-Core RD 2100 cadencé à 10 Hz
- données correspondantes aux scénarios de Lyon : Portique 1, Portique 2, Corridor et Zone urbaine.



Figure 2 : L'odomètre utilisé



Figure 3 : Le gyromètre utilisé



Figure 4 : L'antenne patch derrière le pare-brise

Dans le rapport [DR1], il a été montré que le positionnement de l'antenne utilisée sur le tableau de bord de notre véhicule d'essai a été très pénalisant pour les signaux reçus et donc les performances générales du positionnement. Un rapport entre 3 et 4 a été observé sur les HPE calculées par l'algorithme standard MOPS aux moindres carrés. Les HPL en revanche étaient relativement peu augmentés, ce qui entraînait des pertes d'intégrité plus nombreuses. Cette dégradation était due au cumul des effets de 2 phénomènes : le masque créé par la carrosserie de la voiture, l'atténuation des signaux au travers le pare-brise.

La Figure 4 montre la disposition de l'antenne patch derrière le pare-brise de notre véhicule d'essai (Clio 2).

Il est maintenant avéré, suite à notre expérience sur le projet Eco-Taxe PL, que cette configuration sur-pénalisait les performances par rapport à une installation sur le pare-brise d'un PL, malgré sa relative verticalité.

Les données GPS+EGNOS qui ont été traitées par les algorithmes d'hybridation étaient donc spécialement mauvaises. Ce constat sera repris dans la conclusion.

1.4 Objet et structure du document

Ce rapport constitue la synthèse de l'étude et complète également les précédents documents déjà produits au long du projet, listés dans la section Documents références :

- le rapport [DR1] [EOTR2_M3S_D1 12_Analyse_v1.0.pdf](#), qui analyse les dégradations de performances apportées par la position de l'antenne derrière le pare-brise par rapport à l'antenne sur le toit du véhicule, pour tous les scénarios de l'étude EOTR1 sur Bordeaux, Lyon et Nantes, et qui constitue la sortie de la [tâche 12](#),
- le rapport [DR2] [EOTR2_M3S_D1 13_AnalyseParebriseAthermique_v1.0.pdf](#), qui analyse en statique les dégradations de performances apportées par un pare-brise athermique par rapport à un pare-brise standard, et qui constitue une contribution à la [tâche 13](#),

- le rapport [DR3] [EGNOS_ON_THE_ROAD_2_M3S_D2.23_AnalysePerfos_v3.0.doc](#), qui analyse les performances des 2 premiers filtres d'hybridation qui ont été appliqués par le LCPC sur les données de Lyon collectées en juin 2009 dans le cadre des campagnes de mesure du précédent projet EOTR1, et qui constitue un élément de sortie de la [tâche 23](#).

Le document sera composé des chapitres suivants :

- le chapitre 1 est constitué par l'introduction et la présentation du document,
- le chapitre 2 présente les 3 méthodes d'hybridation (lâche et serrée) qui ont été utilisées par le LCPC et qui ont été appliquées aux données EOTR1 acquises en juin 2009 sur Lyon : les 2 premières méthodes qui ne permettent pas une comparaison directe « avec et sans capteurs inertiels » et dont les performances sont analysées dans [DR3] et une 3^{ème} méthode (hybridation serrée) qui permet cette comparaison et dont les performances sont analysées dans ce document,
- le chapitre 3 rappelle de façon synthétique les réglages qui ont été choisis pour les 2 premières méthodes et les conclusions du rapport [DR3] sur leurs performances,
- le chapitre 4 présente les réglages utilisés pour les observations GPS et les tests de consistance mis en place,
- le chapitre 5 présente et discute les réglages qui ont été choisis pour la 3^{ème} méthode d'hybridation, utilisant un modèle accéléré plan
- le chapitre 6 présente et analyse les résultats de la 3^{ème} méthode d'hybridation appliquées aux données correspondantes aux scénarios EOTR1 de Lyon, repris dans [DR3],
- le chapitre 7 propose une conclusion et des perspectives sur l'apport des méthodes d'hybridation EGNOS – capteurs inertiels dans le contexte du télépéage, constituant un élément de sortie de la [tâche 23](#) et la sortie de la [tâche 24](#),
- le chapitre 8 traite de l'aspect corrélation cartographique, qui n'a pas pu être réellement abordé dans l'étude : il explique pourquoi et propose des pistes de réflexion sur ce problème, et constitue à ce titre la sortie de la [tâche 33](#),
- le chapitre 9 propose une conclusion générale et des recommandations.

2 Etude de méthodes d'hybridation GNSS – inertiel

Ce chapitre comporte :

- une introduction sur les méthodes d'hybridation en général entre capteurs GNSS et autres capteurs embarqués de type inertiel ou à l'estime ;
- une présentation des 3 méthodes développées et appliquées dans cette étude.

2.1 Les méthodes d'hybridation pour la localisation en général

2.1.1 Terminologie

On appelle *hybridation*, la fonction qui consiste à combiner, de façon la plus optimale possible, des mesures provenant de capteurs unitaires différents mais dont les sorties peuvent toutes concourir à estimer une même grandeur physique. Ces mesures peuvent être complémentaires ou redondantes. L'idée de base est d'apporter le maximum d'information pour obtenir la meilleure estimation possible.

A la place d'*hybridation*, on peut aussi parler de *fusion* ou de *couplage*, ces 3 termes pouvant être considérés comme synonymes.

Le problème de localisation consiste à obtenir une estimation de la *position* d'un mobile. Quand ce mobile est considéré comme un point, la variable *position* peut être un vecteur tridimensionnel (X Y Z) ou bidimensionnel (X Y) quand on se limite à une position sur un plan. Quand le mobile est considéré comme un repère, la variable *position*, qu'on appelle généralement *pose*, peut être un vecteur à 6 dimensions (X Y Z L R T) ou à 3 dimensions (X Y L) quand on se limite à une pose sur un plan. L, R et T sont les angles d'attitude qui définissent l'orientation dans l'espace du repère mobile par rapport à un repère de référence.

2.1.2 Les capteurs

Couramment, en localisation, les principaux capteurs pouvant être utilisés pour calculer une position sont :

- les récepteurs GNSS,
- les centrales inertielles (3 gyromètres, 3 accéléromètres), qui mesurent des accélérations et vitesses de rotation par rapport à un repère Galiléen et peuvent, moyennant des calculs dits « de mécanisation », permettre d'en déduire par intégration la pose à 6 dimensions dans un repère terrestre local,
- les gyromètres de cap, qui mesurent une vitesse de rotation autour d'un axe vertical,
- les odomètres qui mesurent la distance parcourue,
- les capteurs vidéo, radars, lidars, qui peuvent mesurer des distances ou des angles par rapport à des amers dans l'environnement et permettent, à l'aide d'algorithmes de mise en correspondance plus ou moins complexes, de remonter à des poses ou des variations de pose.

En localisation automobile, hormis les capteurs GNSS qui s'imposent, les capteurs qui sont le plus souvent utilisés pour leur très intéressant rapport information/coût, sont les **gyromètres de cap et les odomètres**. Ces capteurs sont souvent appelés : *capteurs de navigation à l'estime*, parce qu'ils permettent, quand on les combine avec un modèle d'évolution du véhicule, de calculer par intégration une pose.

Il est à noter cependant que les capteurs de type odomètre nécessitent une interface mécanique ou électrique avec le véhicule porteur, ce qui peut s'avérer problématique, en particulier pour des raisons de coût.

2.1.3 Le principe d'hybridation

Pour combiner des mesures de façon optimale, la théorie de fusion dite bayésienne¹ est à l'origine d'une famille de méthodes, dont la plus célèbre est le filtrage de Kalman, qui reposent sur le principe suivant, illustré par la Figure 6, qui représente la méthode n° 1 d'hybridation lâche qui a été appliquée dans cette étude :

¹ Du mathématicien Bayes, qui est à l'origine du théorème de Bayes sur les probabilités conditionnelles, qui sous-tend cette théorie

- on dispose d'un capteur GNSS, capable de fournir une position, et de capteurs à l'estime,
- on définit un *état*, qui est ici la pose 2D (Nord, Est, cap Ψ) du véhicule, que l'on cherche à estimer,
- on dispose d'un *modèle d'évolution* du véhicule, ici un modèle de type bicyclette représenté sur la Figure 5, respectant la contrainte de *non-holonomie* du véhicule (relation entre la rotation et l'avancement) qui permet, quand il est « alimenté » par des sorties des capteurs à l'estime (ds et $d\Psi$), aussi appelées « commandes », de prédire la pose à l'instant courant à partir de l'état précédent (ce modèle suppose deux hypothèses : roulement sans glissement et non variation de braquage entre deux instants d'estimation consécutifs, le mouvement est alors localement circulaire),
- on dispose d'un *modèle d'observation*, qui permet de relier les mesures GNSS (ici la position) à l'état,
- la fusion se déroule alors selon le processus suivant :
 - estimation *a priori* (prédiction) de la pose à l'instant courant à partir de l'instant précédent et des sorties des capteurs à l'estime,
 - calcul des mesures prédites (ici la position) via la fonction H, et de l'erreur ε , obtenue par différence entre les mesures prédites et les mesures réelles,
 - calcul de l'*innovation* obtenu dans le filtrage de Kalman par multiplication de l'erreur ε par le *gain de Kalman* K, qui dépend de la confiance estimée dans l'état prédit et de la confiance dans les mesures. K pondère l'apport de la prédiction et l'apport de la mesure pour estimer une pose estimée *a posteriori* qui soit optimale
 - calcul du HPL à partir des covariances (P_{EE} , P_{NN} et P_{EN}) estimées en même temps que l'état par le filtre de Kalman : $HPL = 6.18 * \sqrt{\{ (P_{EE}+P_{NN})/2 + \sqrt{[(P_{EE}-P_{NN})^2/4 + P_{EN}^2]} \}}$.

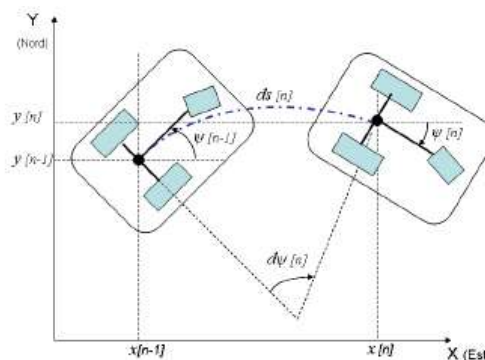


Figure 5 : Le modèle d'évolution du véhicule de type « bicyclette »

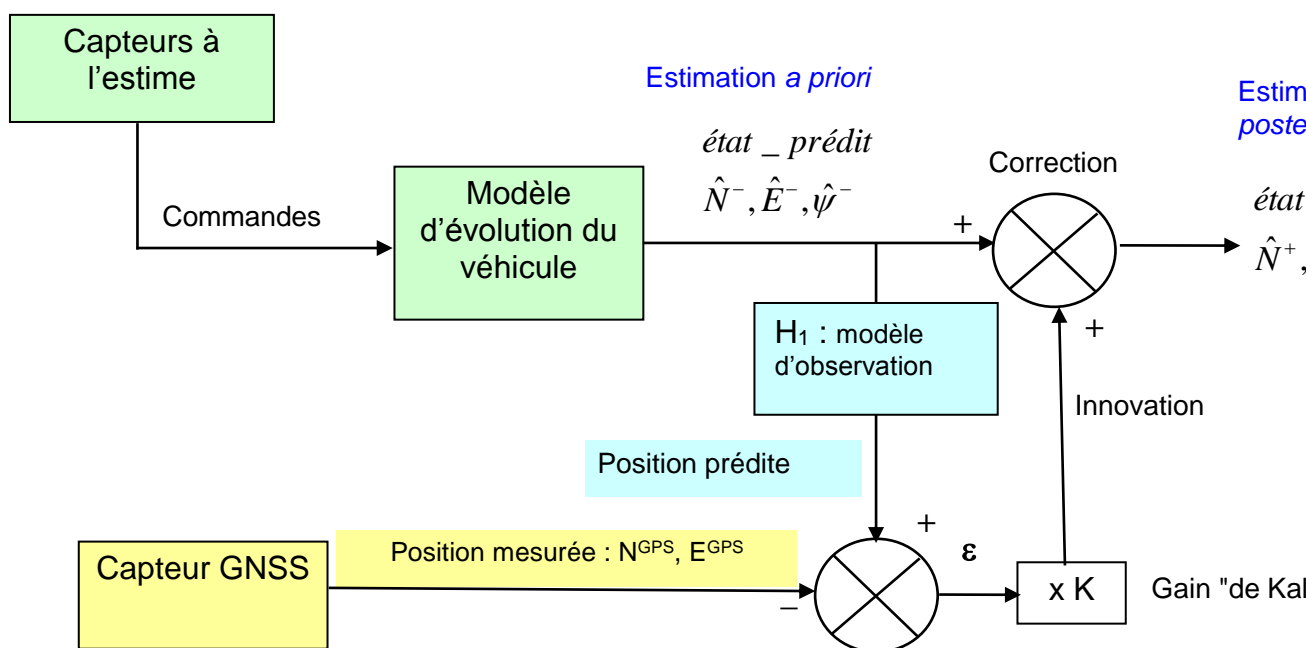


Figure 6 : La méthode n° 1 : hybridation lâche avec modèle d'évolution du véhicule

2.1.4 Hybridation lâche et hybridation serrée

Sur ce principe d'hybridation, une multitude de variantes peuvent exister, suivant les variables d'état choisies et les sorties capteurs utilisées.

Dans la communauté du positionnement GNSS, on parle d'*hybridation lâche* quand le calcul de l'erreur ε se fait au niveau des coordonnées (ou de la solution dite de *navigation*) du véhicule. On parle d'*hybridation serrée* quand l'erreur se calcule au niveau des mesures brutes : pseudo-distances L1 et éventuellement Doppler (composante de la vitesse relative récepteur-satellite sur le rayon vecteur concerné) dans notre cas.

Pour pouvoir calculer des pseudo-distances prédites, il faut calculer la position prédite 3D du récepteur, donc tenir compte de l'altitude du récepteur, et introduire la quatrième inconnue dans le calcul : le terme d'horloge d : produit de la vitesse de la lumière par le décalage temporel entre horloge récepteur et temps GPS.

Pour pouvoir calculer des mesures Doppler prédites, il faut calculer la vitesse du récepteur en 3D, et considérer la vitesse du terme d'horloge (aussi appelée *dérivée*) en m/s quand d est en m.

2.2 Les méthodes d'hybridation développées dans l'étude

Trois méthodes ont été développées :

- 1 méthode d'hybridation lâche, avec modèle d'évolution non-holonome du véhicule, présentée plus haut,
- 2 méthodes d'hybridation serrée, une avec modèle non-holonome et une avec modèle accéléré plan, qui sont présentées ci-dessous.

La dernière méthode présente l'avantage de pouvoir être appliquée dans le cas où l'on utilise des capteurs à l'estime, comme dans le cas où l'on n'en utilise pas, ce qui permet de mettre en évidence l'apport de ces capteurs.

Méthode n° 2

Les différences par rapport à la méthode n° 1 sont :

- le vecteur d'état est augmenté des composantes : altitude (Z), terme d'horloge (d) et sa dérivée (d'),
- les mesures, réelles ou prédites, sont les pseudo-distances (PR_i) observées par le récepteur,

- le modèle d'observation (H_2) plus complexe, prenant en compte la position 3D du mobile et la quatrième inconnue du problème canonique qui est le terme d'horloge.

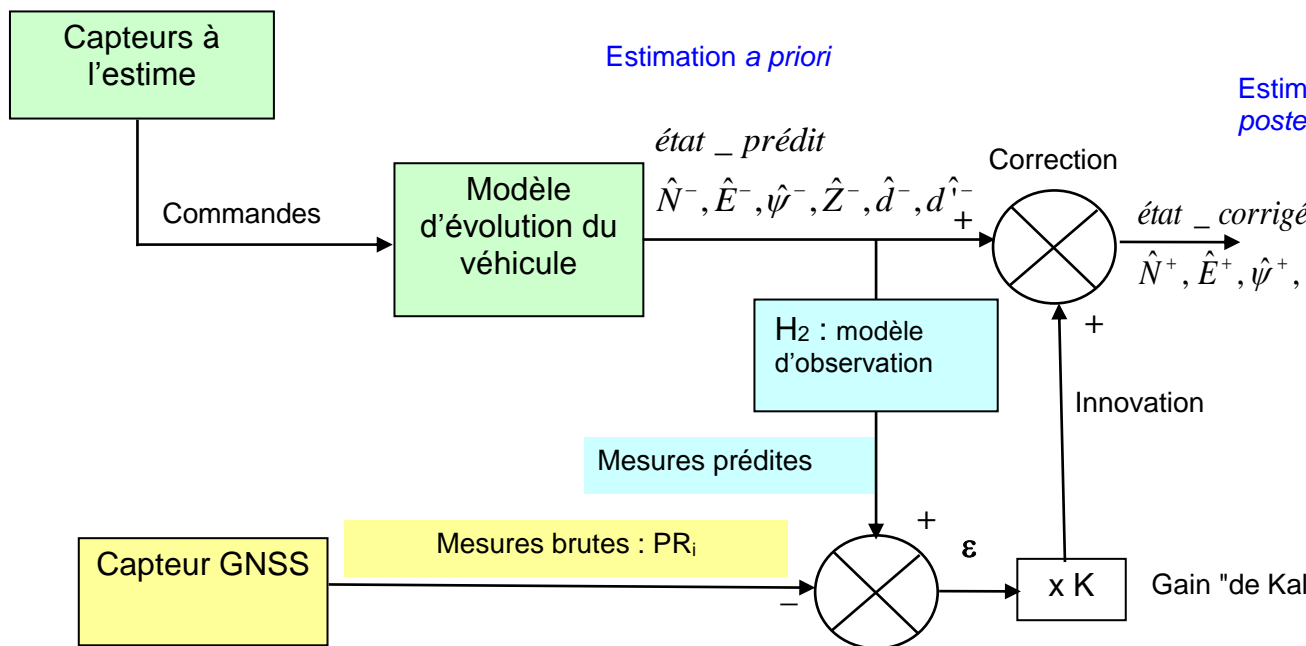


Figure 7 : La méthode n° 2 : hybridation serrée avec modèle non-holonyme du véhicule

Méthode n° 3

Les différences par rapport à la méthode n° 2 sont :

- la disparition du modèle d'évolution du véhicule, qui est remplacé par un modèle plus général, appelé *accélééré plan*, qui ne rend plus compte de la contrainte de non-holonomie du véhicule, traduisant uniquement le fait que la position plane résulte de la double intégration de l'accélération plane et que l'altitude reste constante à un bruit près entre 2 instants d'intégration,
- le vecteur d'état est sensiblement différent de celui des précédentes méthodes et comprend : coordonnées planes (N, E), altitude (Z), vitesses et accélérations planes suivant le Nord et l'Est ($V_N, V_E, \Gamma_N, \Gamma_E$), terme de décalage d'horloge récepteur (d) et dérivée du terme d'horloge (d'),
- les mesures des capteurs à l'estime ne sont plus prises en compte via le modèle d'évolution, mais au même niveau que les mesures GNSS, c'est-à-dire comme des observations qui vont venir corriger l'estimation *a priori*, à une cadence cependant différentes de celle du capteur GNSS,
- on utilise en fait 2 modèles d'observation (H_3), qui diffèrent suivant que la mesure traitée provient des capteurs à l'estime (cadencés tous les deux à 10 Hz) ou du capteur GNSS (à 4 Hz) :
 - o le modèle pour l'estime rend compte du fait que l'odomètre permet d'observer la vitesse plane du véhicule et que le gyromètre permet d'observer la vitesse de rotation du véhicule qui s'exprime en fonction des composantes de la vitesse et de l'accélération planes.
 - o le modèle pour le GNSS utilise à la fois les mesures de pseudo-distances et de Doppler qui permettent d'observer respectivement la position et la vitesse du mobile.

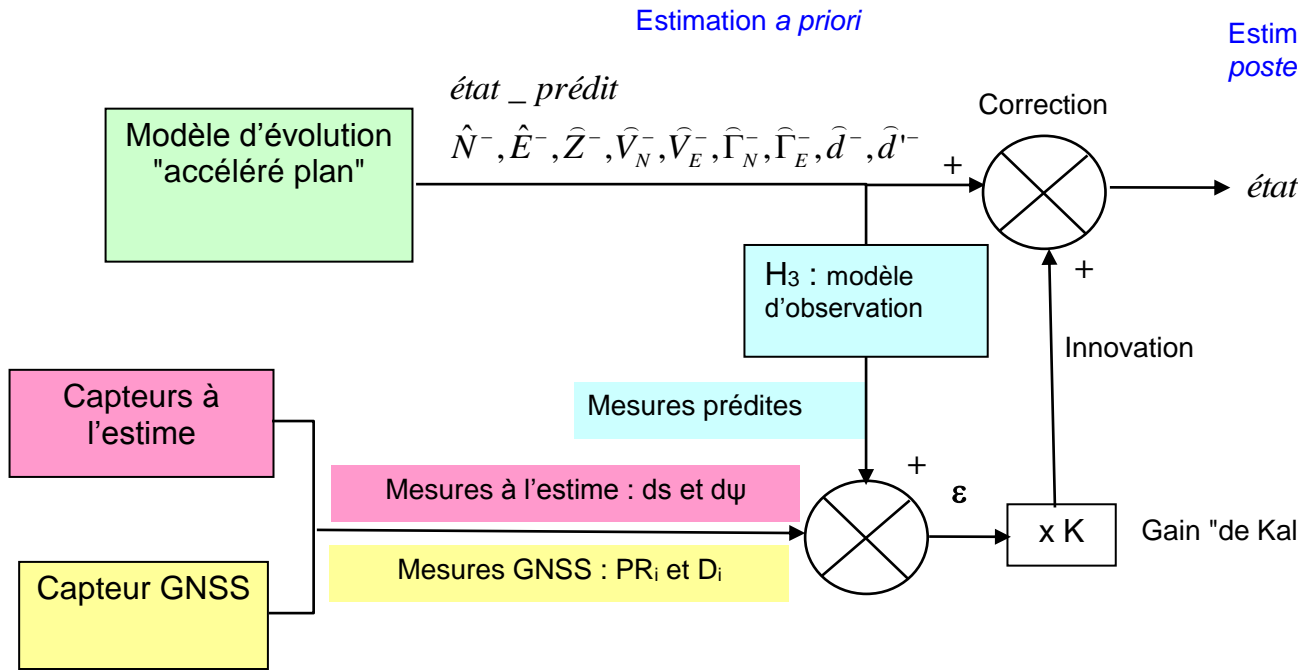


Figure 8 : La méthode n° 3 : hybridation serré avec modèle accéléré plan du véhicule

Les équations représentant les différents modèles d'évolution et d'observation sont détaillées dans l'Annexe 1.

3 Les réglages effectués pour le modèle non-holonome d'évolution du véhicule en couplage lâche et serré

Les principaux réglages des filtres de Kalman utilisant le modèle non-holonome (en couplage lâche comme en couplage serré) s'appuient sur l'expérience du LCPC d'une part et les pratiques des constructeurs de capteurs d'autre part. Ces réglages sont les suivants (pour une période d'échantillonnage $\Delta t=0.1s$) ;

- bruit du modèle d'évolution : 0.32 m (1 écart-type) à $\Delta t=0.1s$ (soit 1 m en une seconde selon une marche aléatoire) en position et 0.5° (1 écart-type) à $\Delta t=0.1s$ en cap (ces erreurs traduisent que les hypothèses de roulement sans glissement et de non variation du braquage pendant Δt ne sont pas nécessairement vérifiées) ;

- bruit de commande en distance parcourue : pas / $\sqrt{6}$, où pas désigne l'incrément élémentaire de distance mesurable en m (1 écart-type) ;

- bruit de commande en vitesse angulaire : $(ARW * \sqrt{\Delta t} / \Delta t)$ en rad/s (1 écart-type), où ARW est la marche aléatoire angulaire (*Angular Random Walk*) en radian par racine de seconde ; pour le gyromètre KVH utilisé, ARW = 0.083 degré par racine d'heure ; donc à $\Delta t=0.1s$, le bruit en vitesse angulaire égale 0.0044 rad/s (1 écart-type).

En couplage serré, il convient de compléter le modèle de la dimension verticale (3D) et du terme d'horloge récepteur et sa dérivée, avec les réglages suivants :

- bruit du modèle d'évolution en altitude : 0.32 m à $\Delta t=0.1s$;

- bruit du modèle d'évolution en terme d'horloge : 0.1 m à $\Delta t=0.1s$;

- bruit du modèle d'évolution en dérive : 0.1 m/s à $\Delta t=0.1s$.

4 Les réglages effectués pour les observations GPS et les tests de consistance opérés sur ces observations

4.1 Bruits de mesures GPS

Nous disposons d'un jeu d'essais sur 3 jours à Lyon, découpé en 9 sessions (Lyon1 à Lyon9), elles-mêmes découpées en enregistrements (ou *log*) de notre système d'acquisition embarqué Dirco.

Chaque log dure 10 minutes maximum.

Ces essais permettent d'alimenter une base de données correspondant à plusieurs scénarios : deux portiques routiers, une zone urbaine et un corridor.

Une partie du premier jour à Lyon (session Lyon2) est utilisée pour le réglage du filtre.

Considérons un ensemble d'essais représentatif des conditions d'observation GPS à Lyon, par exemple la session Lyon2 qui comporte 8 enregistrements Dirco (cf. Tableau 1 et Figure 9 ci-dessous). La résolution du problème de positionnement aux moindres carrés (sans pondération) donne (avec des pseudo-distances corrigées EGNOS) :

- des erreurs moyennes de position (par rapport à la référence) de l'ordre de la dizaine de mètres ;

- des résidus moyens de pseudo-distances égaux à 3.37 m ;

- des résidus moyens de mesures Doppler égaux à 0.29 m/s : les mesures Doppler sont converties du Hz au m/s par application du facteur célérité de la lumière / fréquence L1, soit $299792458/(1575.42*10^6)$.

Sur cette même session, l'UDRE moyen (qui est sensé caractériser les erreurs de pseudo-distances corrigées EGNOS) est de 1.64 m.

En conséquence, les réglages des bruits des observations GPS seront :

pour la mise en œuvre en couplage lâche :

- bruit des mesures de position GPS : 20 m (1 écart-type) ;

pour la mise en œuvre en couplage serré :

- bruit des pseudo-distances : 2 UDRE (1 écart-type) : il convient en effet de l'augmenter sensiblement, en l'occurrence d'un facteur 2, pour caractériser les erreurs vraies de pseudo-distances ;

- bruit des mesures Doppler : 0.3 m/s (1 écart-type).

Ainsi caractérisées, on espère par la suite pouvoir par filtrage détecter et éliminer des mesures aberrantes. On voit qu'il convient de ne pas augmenter trop les écarts-types caractéristiques des mesures dans le filtre, au risque de tout accepter, ni trop le diminuer, car on se priverait alors de beaucoup de mesures (voire toutes).

Tableau 1 : Résidus moyens de pseudo-distance et mesures Doppler sur la session Lyon2

Log n°	Résidu moyen de pseudo-distance	UDRE moyen a priori	Ratio	Résidu Doppler moyen	Erreur Doppler a priori	Ratio
1	2.94	1.67	1.76	0.23	0.30	0.78
2	2.43	1.68	1.44	0.21	0.30	0.70
3	2.33	1.61	1.45	0.18	0.30	0.59
4	2.55	1.55	1.64	0.14	0.30	0.47
5	3.80	1.50	2.54	0.23	0.30	0.78
6	3.45	1.58	2.18	0.35	0.30	1.17
7	4.79	1.70	2.82	0.45	0.30	1.52
8	3.05	1.76	1.73	0.28	0.30	0.93
Tous	3.37	1.64	2.05	0.29	0.30	0.97

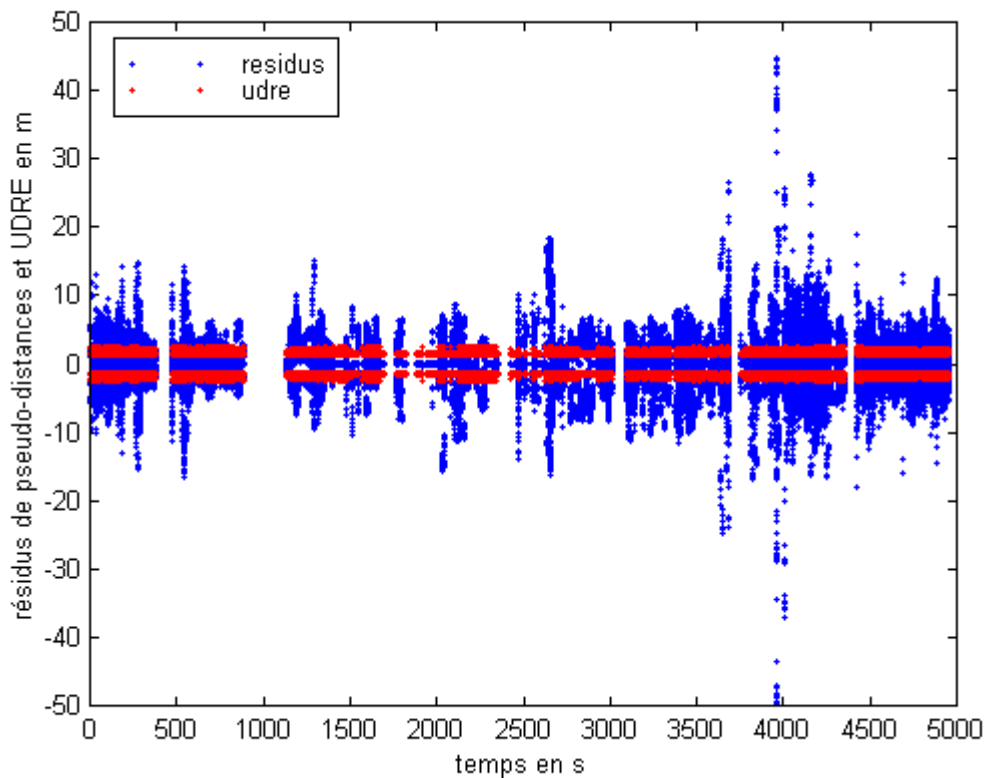


Figure 9 : Résidus de pseudo-distances et enveloppe à 1 UDRE : les 8 enregistrements de 10 minutes sont clairement séparables et on trouve pour les 3 derniers des résidus importants car ils correspondent au scénario urbain

4.2 Tests de consistance

La navigation à l'estime pour un véhicule terrestre utilise généralement des mesures de distance parcourue et de vitesse angulaire pour prédire une nouvelle position et un nouveau cap, à partir d'une position initiale et d'un cap initial. Le problème est généralement posé dans le plan (en 2D donc) avec des hypothèses de roulement sans glissement et de non variation de braquage entre deux instants d'estimation consécutifs (i.e. pendant Δt , période d'échantillonnage). Le mouvement est alors localement circulaire (cf. Figure 5).

Eu égard ces hypothèses et le fait que les mesures de distance parcourue et de vitesse angulaire sont imparfaites, on considère en filtrage de Kalman des bruits de modèle et de commandes que l'on introduit dans le calcul de navigation à l'estime. La position et le cap sont donc en même temps prédits et caractérisés du point de vue de leur erreur probable.

En couplage lâche, c'est une position GPS qui corrige la position prédite : cette position GPS est caractérisée elle-aussi par une erreur probable. Il est d'usage de pratiquer un test consistant à comparer la distance entre ces positions à la somme des erreurs les caractérisant. Ce test est appelé test de Mahalanobis ou test de l'innovation quadratique normalisée : c'est un test statistique du χ^2 . Il peut conduire, le cas échéant, à éliminer la position GPS et ne pas corriger la navigation à l'estime.

Ce test est paramétré par le risque que l'on prend d'éliminer des observations à tort. En couplage lâche, on tolérera 10% des solutions GPS rejetées à tort : on se passe donc délibérément de beaucoup de positions, car on a plutôt un bon navigateur à l'estime. Ces chiffres sont justifiés vu les conditions d'observation GPS difficiles du centre-ville de Lyon.

En couplage serré, nous avons vu que la même navigation à l'estime peut s'opérer, augmentée d'une prédiction de l'altitude (supposée constante à un bruit près) et d'une prédiction du terme d'horloge du récepteur GPS et de sa dérivée dans le temps. Ayant prédit une position en 3D et un décalage d'horloge du récepteur, on sait prédire des pseudo-distances et comparer ces dernières aux pseudo-distances mesurées, les positions satellites étant connues. Là aussi, un test de Mahalanobis peut conduire à éliminer une ou plusieurs (voire toutes les) observations satellites. Position, cap, altitude, terme d'horloge et dérive sont alors corrigés par le filtre.

On tolérera 1% des pseudo-distances rejetées à tort : on préfère (en choisissant 1 et pas 10%) ne pas se priver de trop de mesures.

Pour cette première version du filtre en couplage serré, deux stratégies de test des pseudo-distances ont été étudiées :

- la première stratégie, qui néglige la corrélation des variables d'état, consiste à tester les pseudo-distances les unes après les autres et ne garder que celles qui passent le test de Mahalanobis ;
- la seconde stratégie, qui considère cette corrélation, consiste à tester les pseudo-distances ensemble. Cette stratégie est a priori plus rigoureuse que la précédente. Si le test passe, on garde toutes les pseudo-distances. Si le test ne passe pas, on élimine la pseudo-distance de plus grand résidu normalisé, et on réitère le test des pseudo-distances restantes... et ainsi de suite tant que le test ne passe pas. Il est possible que toutes les pseudo-distances soient éliminées. Dans la littérature, cet algorithme est appelé FDE pour *Fault Detection and Exclusion*.

NB1 : l'autre version du filtre en couplage serré (celle avec modèle accéléré plan) et ses variantes présentées ensuite utilisent les mesures de Doppler en plus des pseudo-distances. Un algorithme FDE sera mis en œuvre pour tester toutes ces mesures et ne conserver que celles consistantes avec l'état prédit. Il fait l'objet d'un paragraphe spécifique.

NB2 : ces tests s'ajoutent au tri déjà fait par NavProc en sortie du récepteur GPS : éliminations des satellites dont l'élévation est inférieure à 10° ou dont le rapport signal/bruit est inférieur à 33 dB.Hz.

5 Les réglages effectués pour le modèle accéléré plan

5.1 Bruits du modèle accéléré plan

Dans ce modèle, nous nous proposons d'intégrer l'accélération pour prédire la vitesse, et d'intégrer la vitesse pour prédire la position. Nous n'utilisons (pour l'instant) ni l'odomètre, ni le gyromètre.

L'accélération est elle-même issue d'un processus de Markov ($\Gamma_{k+1} = \Gamma_k + \text{bruit blanc}$) qui est un intégrateur de bruit blanc. La littérature en traitement du signal donne des éléments théoriques à appliquer ici.

Les variances et la covariance résultant pour l'accélération et la vitesse s'écrivent :

$Sp Te$, pour la variance du bruit blanc intégré, ici l'accélération ;

$Sp Te^3/3$, pour la variance de l'accélération intégrée, ici la vitesse ;

$Sp Te^2/2$, pour la covariance signal / signal intégré, ici la covariance accélération / vitesse ;

où Sp caractérise le bruit blanc générateur du processus [Brown and Hwang, Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, Wiley, 1992]. En appliquant cette règle, il ne reste qu'à paramétrer Sp .

Ceci se fait en simulation, par application de masques GPS. On analyse l'erreur en plan et on vérifie qu'elle est bornée (ni trop, ni trop peu) par l'écart-type prédit par le filtre, lui-même directement dépendant, lors des masques, du paramètre Sp . Des masques de 10 secondes sont appliqués toutes les minutes, sur le premier des 8 enregistrements de 10 minutes de la session Lyon2.

Il vient, cf. Figure 10, que $Sp = 1 \text{ m}^2/\text{s}^4/\text{s}$ convient, soit, en variance à 10 Hz :

$0.1 \text{ m}^2/\text{s}^4$ pour l'accélération ;

$3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ pour la vitesse ;

10^{-6} m^2 pour la position.

Ces valeurs sont applicables à la cadence Te du filtre, ici 0.1 s (10 Hz).

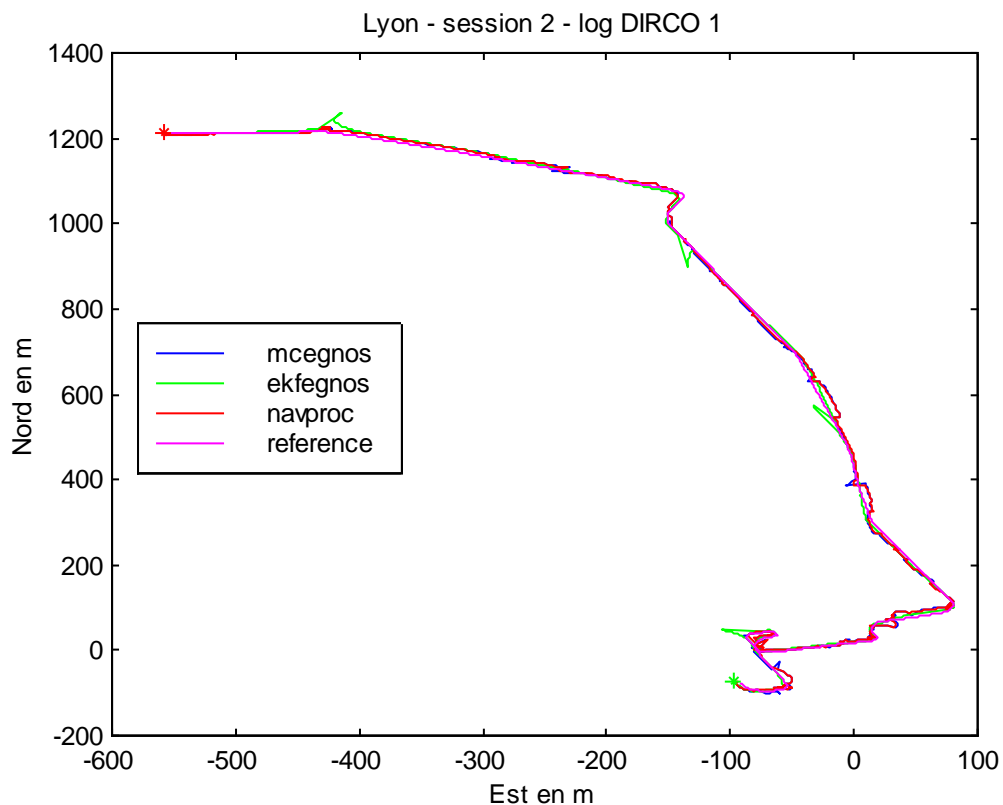


Figure 10 : trajectoires planes calculées (Lyon2 – log1)

NB : sur les graphes, la légende désigne :

- mcegnos : solutions aux moindres carrés non pondérés utilisant les pseudo-distances corrigées EGNOS
- ekfegnos : solutions filtrées en serré utilisant les pseudo-distances corrigées EGNOS et les mesures Doppler
- navproc : solutions MOPS M3S NavProc (moindres carrés pondérés UDRE, plus test vitesse entre solutions consécutives)
- reference : vérité terrain donnée par MRT.

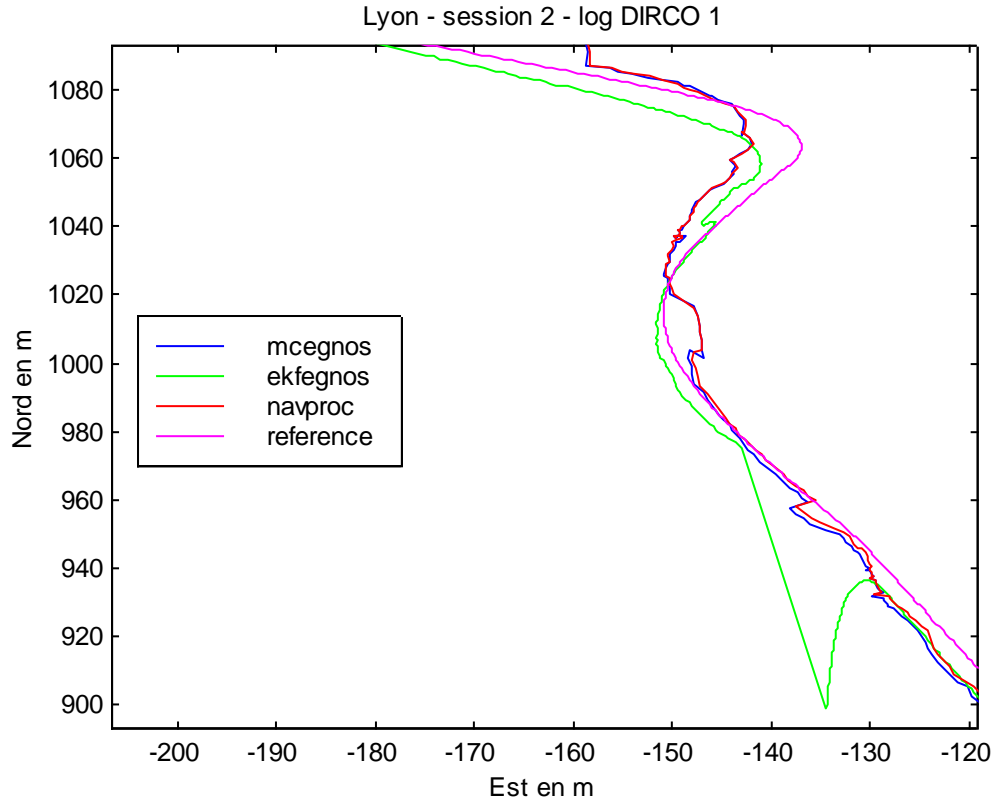


Figure 11 : zoom trajectoires planes calculées (Lyon2 – log1)

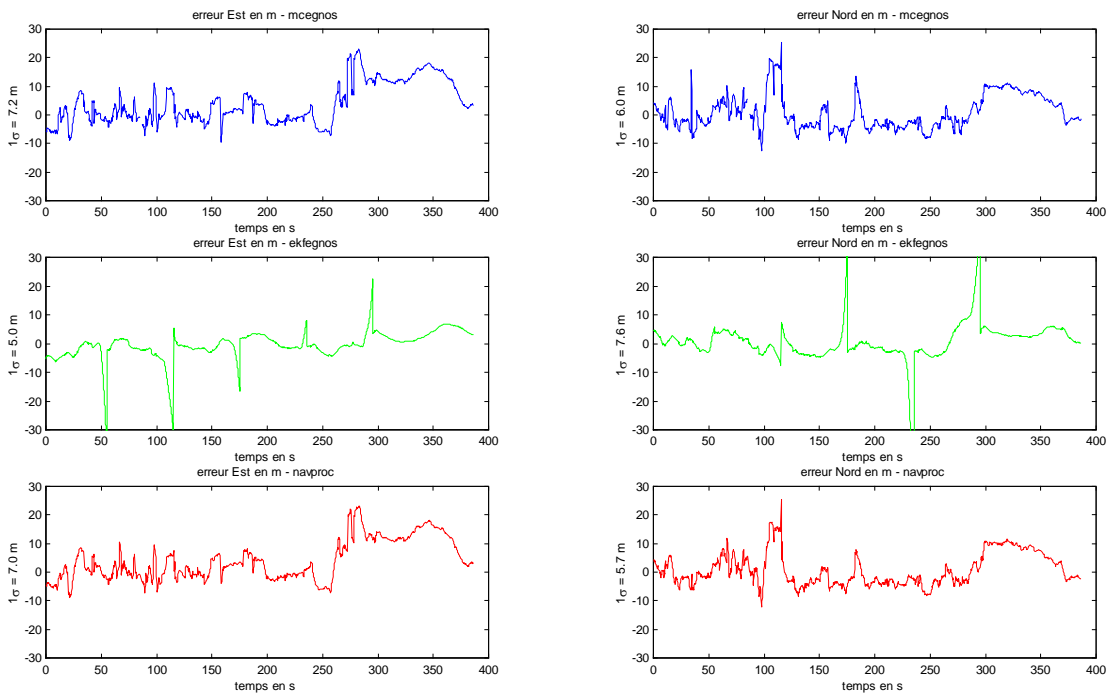


Figure 12 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1)

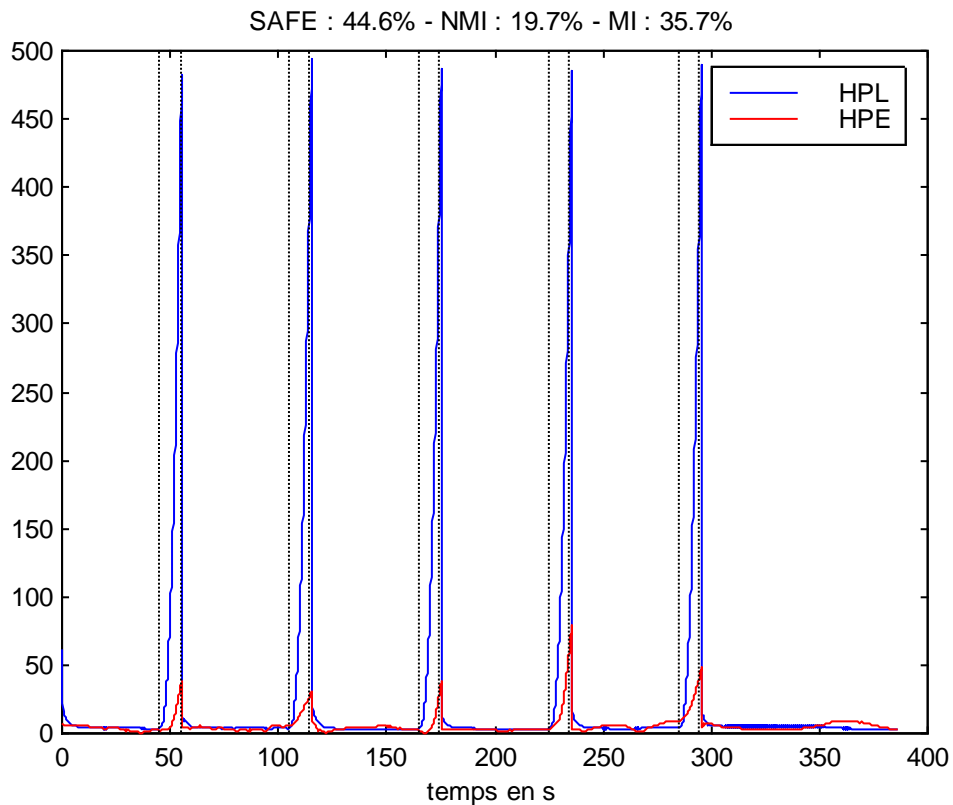


Figure 13 : erreur plane en norme (HPE) et son enveloppe (HPL) (Lyon2 – log1)

La trajectoire est très lisse du fait de la forte confiance dans le modèle. Mais l'erreur plane atteint quasi 100 mètres en 10 secondes de masque. Le HPL, qui vaut approximativement 6 écarts-types, enveloppe bien l'erreur pendant les masques ; l'accroissement de l'erreur dans les phases de masque et l'accroissement de l'enveloppe sont consistants. Mais le HPL sous-estime l'erreur partout ailleurs (i.e. hors masques).

Supprimons les masques. On voit très clairement que le modèle lisse beaucoup. L'erreur est réduite d'un facteur 2 (courbes d'erreur en vert, au centre) par rapport au calcul aux moindres carrés (courbes en bleu, en haut) ou au calcul NavProc MOPS (courbes en rouge, en bas). Ce dernier est un calcul aux moindres carrés pondérés UDRE suivi d'un test sur la vitesse entre deux solutions consécutives.

Par contre, le HPL est clairement trop petit (d'où un taux de MI grand).

Pour information, le tableau suivant donne les taux de rejet des pseudo-distances et des mesures Doppler, pour les deux essais avec et sans masques. Le filtre est mis en œuvre deux fois :

- une première fois avec un test FDE sur les pseudo-distances (avec élimination des mesures Doppler correspondantes) ;
- une deuxième fois avec un test FDE sur les mesures Doppler (avec élimination des pseudo-distances correspondantes).

NB : les figures sont des résultats du filtre avec FDE sur les pseudo-distances.

	Avec masques	Sans masques
Pseudo-distances	4.7%	5.1%
Mesures Doppler	2.9%	2.7%

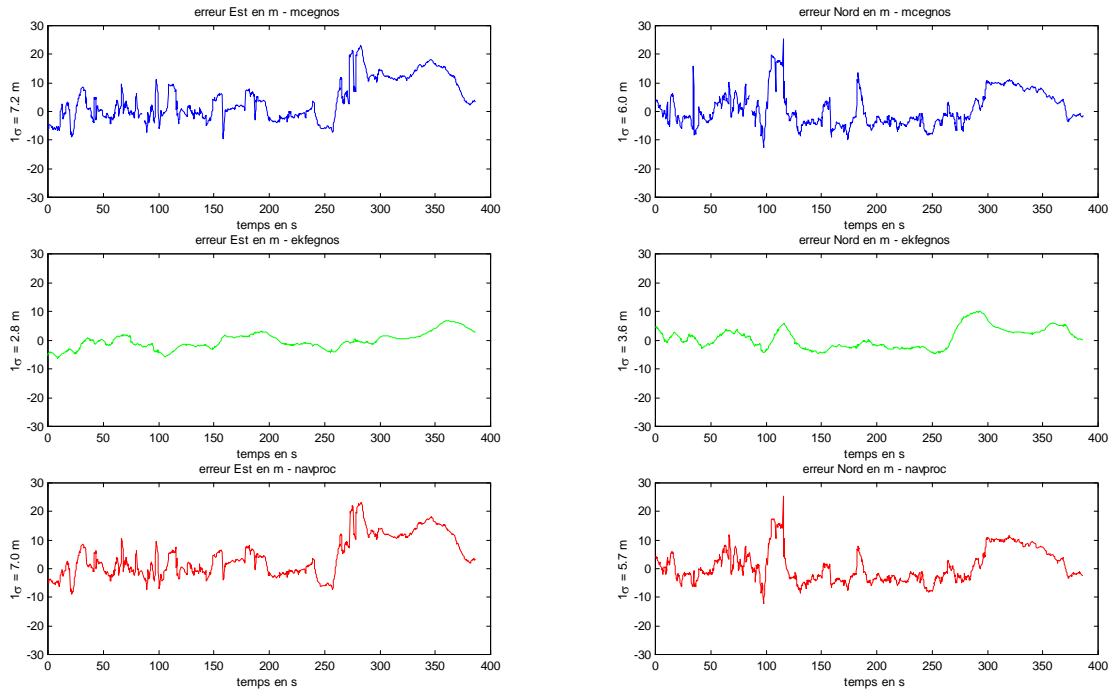


Figure 14 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1, sans masque)

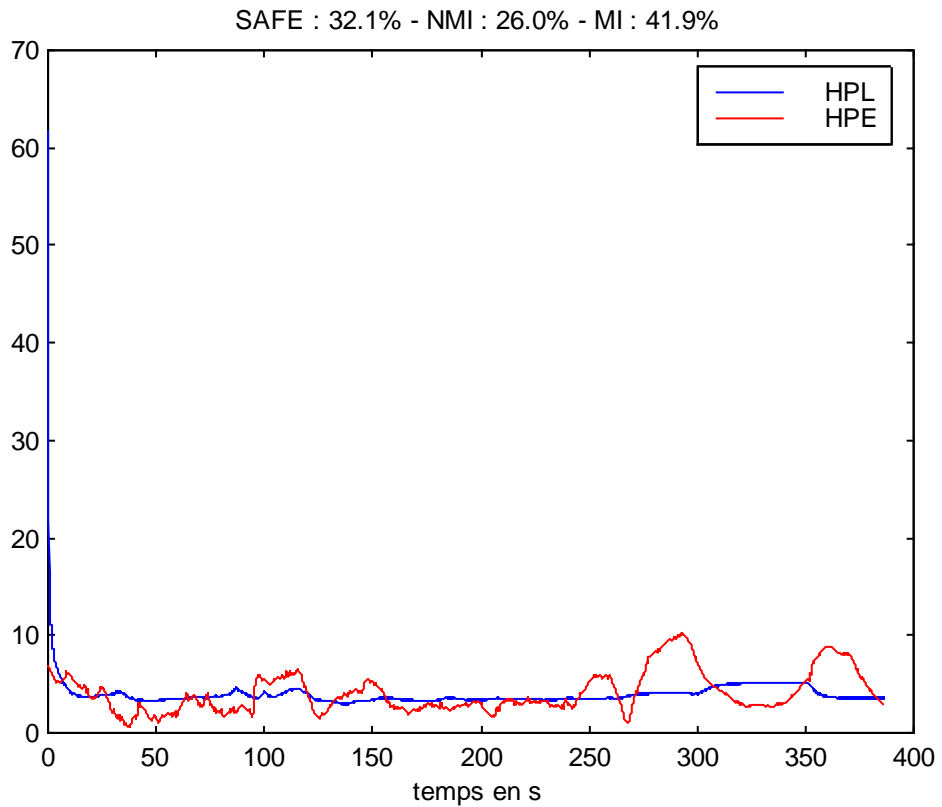


Figure 15 : erreurs erreur plane en norme (HPE) et son enveloppe (HPL) (Lyon2 – log1, sans masque)

5.2 Seuil de vitesse

Ajoutons maintenant l'estime, i.e. l'odomètre et le gyromètre, avec leur réglage standard. Ce réglage est le suivant (à la cadence des mesures odo/gyro, soit $T_e = 0.1$ s) :

- bruit de mesure odo : $\text{pas} / \sqrt{6} / T_e$ en m/s (1 écart-type) ;
- bruit de mesure gyro : $(RW * \sqrt{T_e}) / T_e$ en rad/s (1 écart-type), où RW est la marche aléatoire (random walk) en radian par racine de seconde.

Il reste à régler un seuil, lié au fait que l'observation comporte une division par la vitesse, qui peut s'annuler et faire tendre vers l'infini certains termes voire faire diverger le filtre. En pratique, les composantes de vitesse V_E et V_N calculées par le filtre ne valent jamais exactement zéro, mais peuvent s'en approcher.

Ce réglage semble obéir à un compromis. Trop petit, ce seuil conduit à la divergence du filtre. Trop grand, il prive le filtre de mesures pourtant utiles.

Nous avons (toujours sur le même enregistrement, avec masques de 10 secondes chaque minute) essayé d'abord : seuil nul (il n'y a pas divergence, mais près des $\frac{3}{4}$ des pseudo-distances GPS sont rejetées et 13.3% des mesures Doppler).

Le tableau suivant donne les taux de rejet des pseudo-distances et des mesures Doppler, pour les deux réglages envisagés du seuil de vitesse, avec masques.

Seuil vitesse	2 m/s	3.6 m/s
Pseudo-distances	2.4%	4.7%
Mesures Doppler	10.3%	6.6%

Le seuil de 3.6 m/s est choisi, car il conduit à des taux de rejet raisonnables à la fois de pseudo-distances et de mesures Doppler.

On note que l'erreur pendant les masques est beaucoup réduite grâce à l'estime.

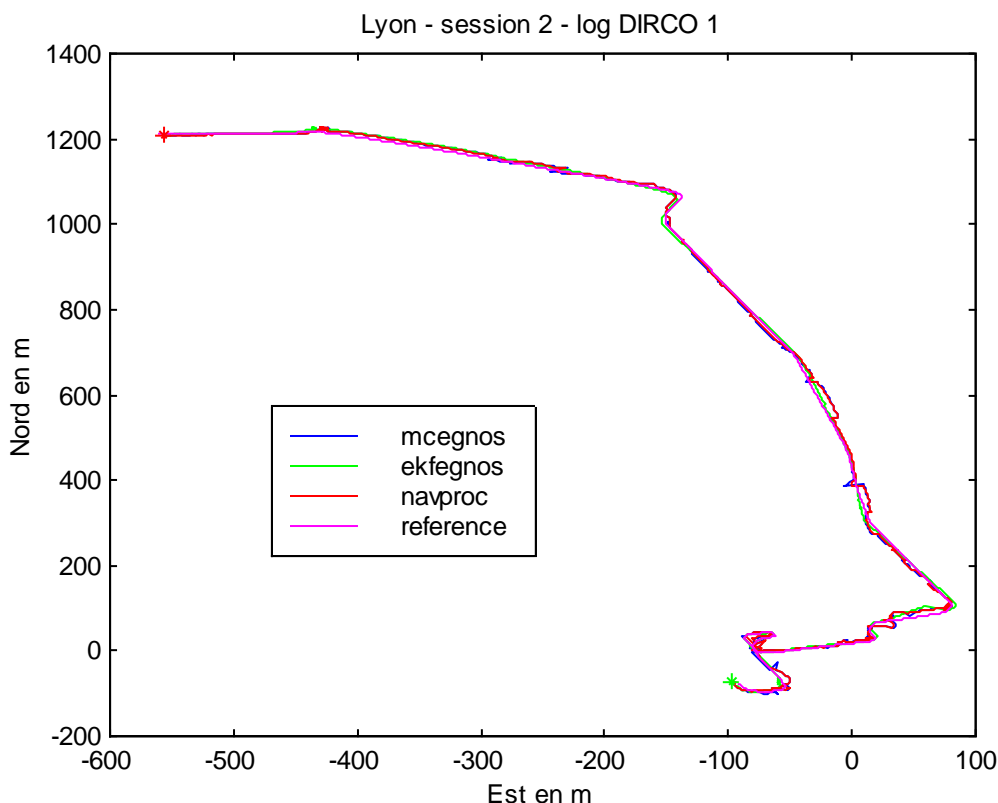


Figure 16 : trajectoires planes calculées (Lyon2 – log1, avec masque, avec odo/gyro)

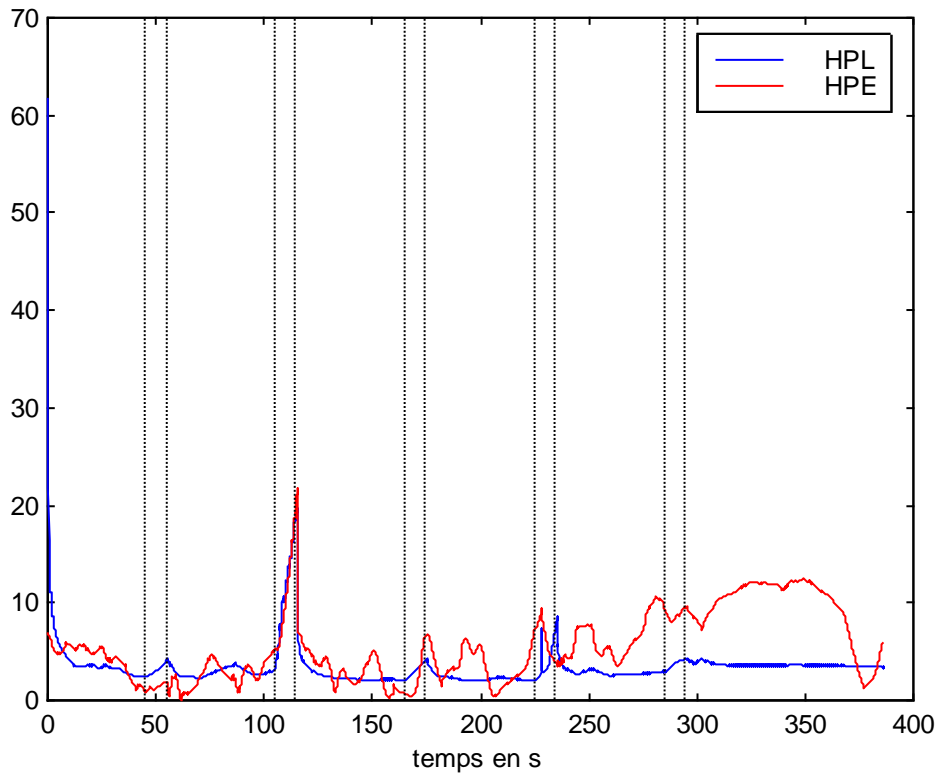


Figure 17 : erreur plane en norme (HPE) et son enveloppe (HPL) (Lyon2 – log1, avec masque, avec odo/gyro)

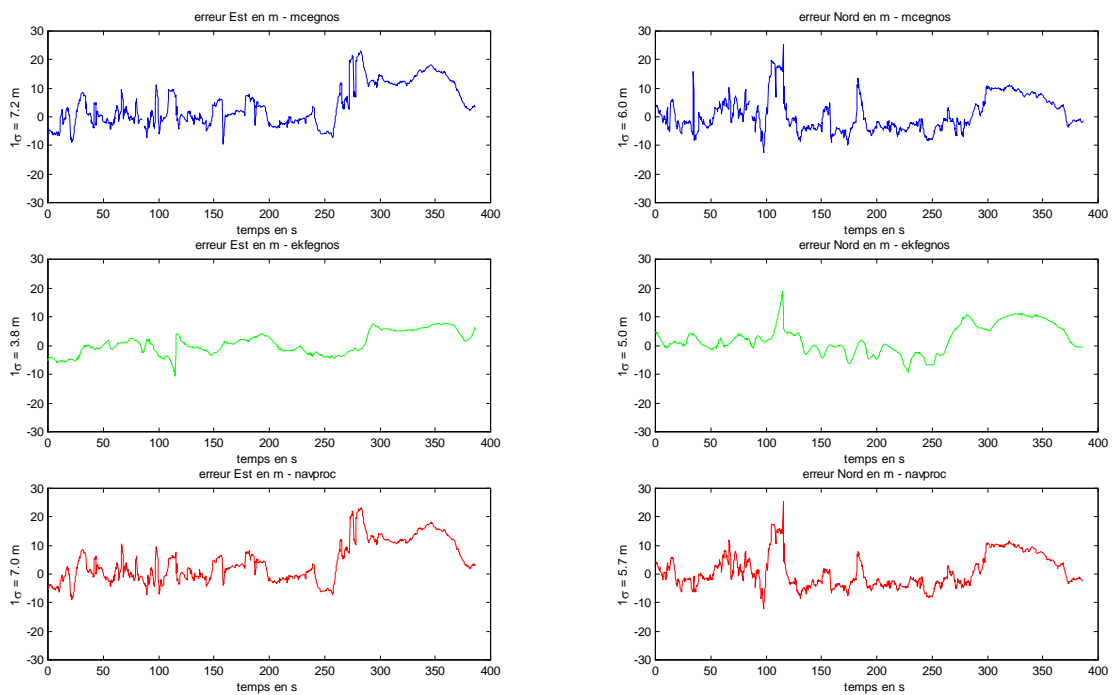


Figure 18 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1, avec masque, avec odo/gyro)

Au final, il reste à valider nos choix avec l'estime, et quand les observations GPS sont non masquées.

Le tableau suivant donne les taux de rejet des pseudo-distances et des mesures Doppler, pour les deux réglages envisagés du seuil de vitesse, et sans masque.

Seuil vitesse	2 m/s	3.6 m/s
Pseudo-distances	2.9%	5.0%
Mesures Doppler	13.9%	6.9%

Les graphes suivant montrent l'importance de ne pas se priver de trop de mesures Doppler, et donc d'avoir préféré le seuil de vitesse de 3.6 m/s au seuil de 2 m/s (pourtant plus favorable du point de vue des pseudo-distances). Avec ce réglage, les erreurs planes sont proches avec et sans les capteurs odo et gyro de navigation à l'estime (comparaison des figures 20 et 14). On peut donc dire que ceux-ci n'apportent quasiment rien sans masque (par rapport au modèle intégrateur), mais permettent une bonne tenue du filtre en cas de masque (le seul modèle intégrateur tendant à diverger en position).

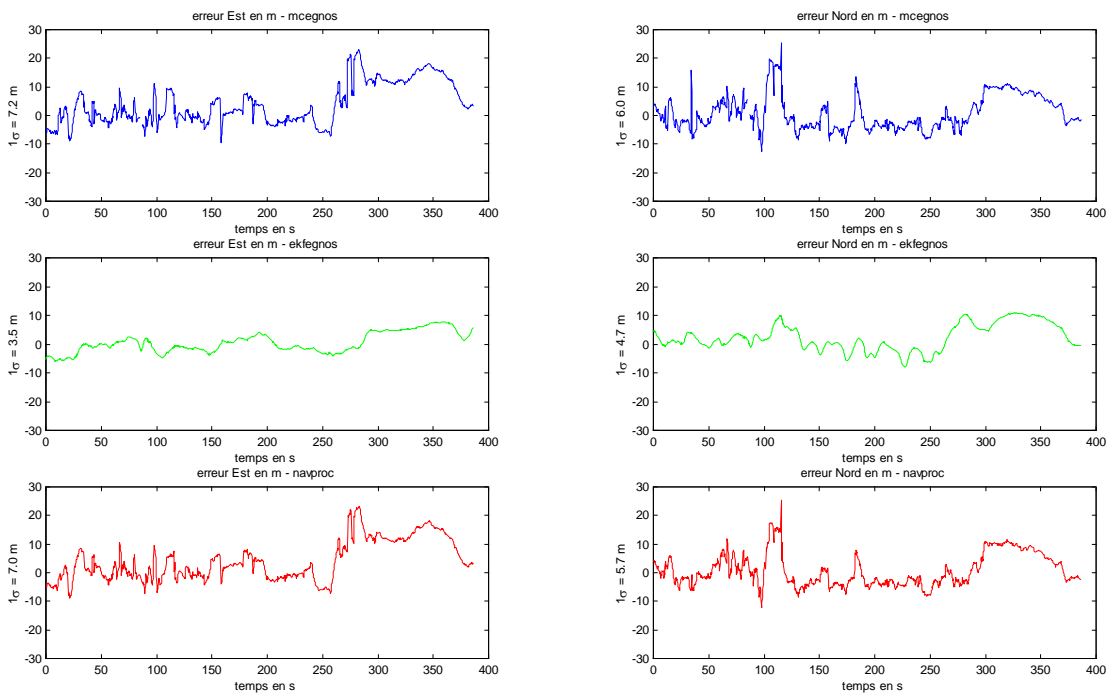


Figure 19 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1, sans masque, avec mesures à l'estime et seuil de vitesse de 2 m/s)

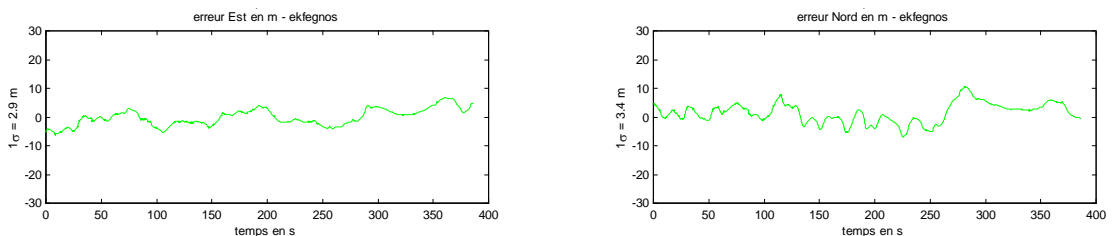


Figure 20 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (Lyon2 – log1, sans masque, avec mesures à l'estime et seuil de vitesse de 3.6 m/s)

Nous allons donc appliquer le réglage mis au point sur l'essai Lyon2 log Dirco1 à toute la base de données de mesures sur Lyon.

5.3 Test de consistance complet

Il apparait une certaine complémentarité des tests de consistance des pseudo-distances et des mesures Doppler.

Dans un premier temps, nous avons choisi de n'effectuer que le test de consistance des pseudo-distances : un des essais à Lyon (Lyon2 log Dirco6) présente une difficulté incontournable si ce seul test est appliqué. Par contre, le test de consistance des mesures Doppler donne satisfaction.

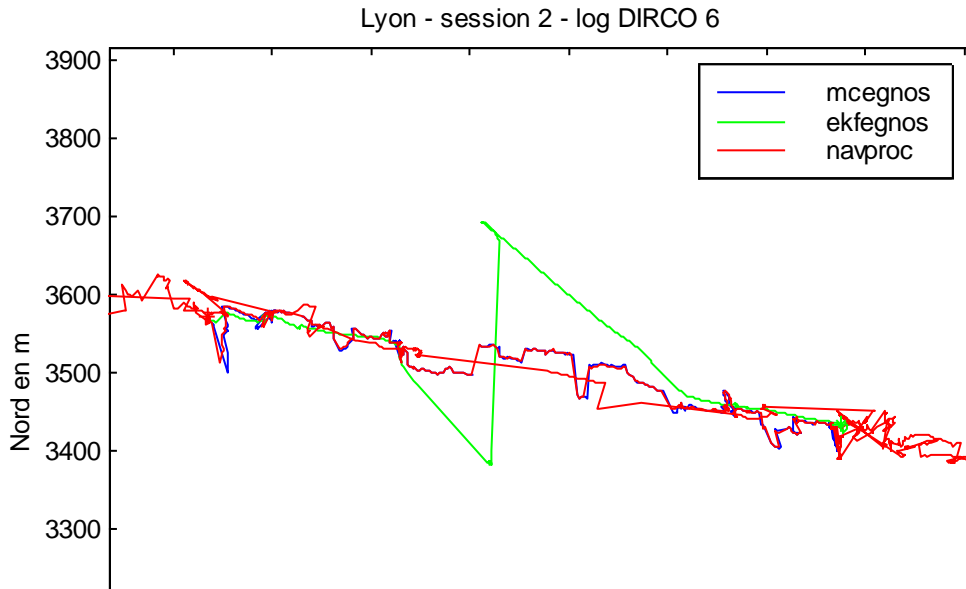


Figure 21 : zoom trajectoires planes calculées (Lyon2 – log6, avec test des pseudo-distances)

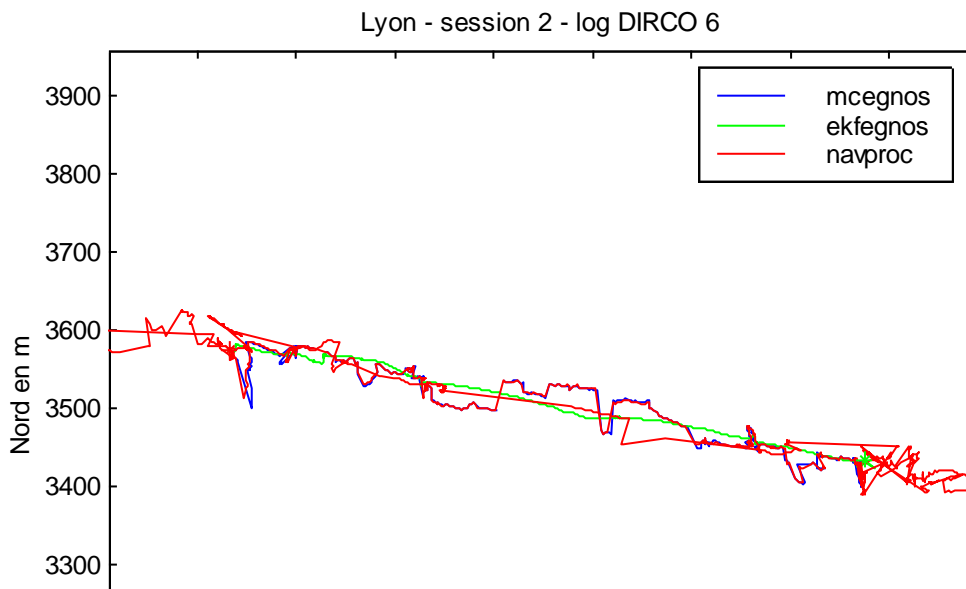


Figure 22 : zoom trajectoires planes calculées (Lyon2 – log6, avec test des mesures Doppler)

L'algorithme FDE qui a été mis en œuvre effectue à chaque itération un test du χ^2 appliqué à la distance de Mahalanobis, avec un risque de rejet à tort de 1%. La distance de Mahalanobis peut porter : soit sur les pseudo-distances, soit sur les mesures Doppler, soit sur l'ensemble.

Puis se pose la question de savoir si l'on s'autorise de garder, pour un satellite donné, sa pseudo-distance et pas son Doppler (ou inversement) ou si l'élimination de l'une des deux mesures entraîne l'élimination de l'autre.

Sur l'exemple précédent, le test des pseudo-distances conduit progressivement à éliminer quasiment tous les satellites (il en reste toutefois toujours 1 dont la mesure est considérée comme consistante). Mais comme les mesures Doppler subissent de fortes perturbations, la solution filtrée est mal corrigée, car l'élimination progressive des satellites n'est pas pertinente : ceux qui auraient dû être éliminés d'abord par un test des mesures Doppler sont restés, et ont conduit à une dérive du filtre.

Nous n'avons pas cherché à calculer la distance de Mahalanobis sur l'ensemble.

Par contre, différents scénarios de tests des pseudo-distances et des mesures Doppler ont été envisagés :

- si l'élimination de l'une des deux mesures entraîne l'élimination de l'autre, on se prive de beaucoup de mesures qui peuvent être acceptables du point de vue des tests pris séparément ; la dérive vue en figure 21 est bien corrigée, mais c'est un cas particulier... car par ailleurs d'autres difficultés apparaissent : en particulier il peut se produire des éliminations massives de mesures (voire de toutes les mesures) assez vite après l'initialisation du filtre, entraînant aussi sa dérive ;

- si l'acceptation de l'une des deux mesures entraîne l'acceptation de l'autre, on introduit beaucoup de mesures qui auraient été éliminées du point de vue des tests pris séparément ; on retrouve la dérive vue en figure 21 ;

- il convient, d'après notre étude, de ne conditionner ni l'élimination ni l'acceptation de l'une des deux mesures par l'autre, et de corriger le filtre avec les seules mesures passant les tests séparément. Ainsi, à une époque où par exemple 7 satellites fournissent des mesures de pseudo-distances et de Doppler, il est possible de n'utiliser effectivement en correction du filtre que 4 pseudo-distances et 6 mesures Doppler.

La figure suivante montre le résultat en plan sur l'essai Lyon2 log Dirco6 en suivant ce scénario.

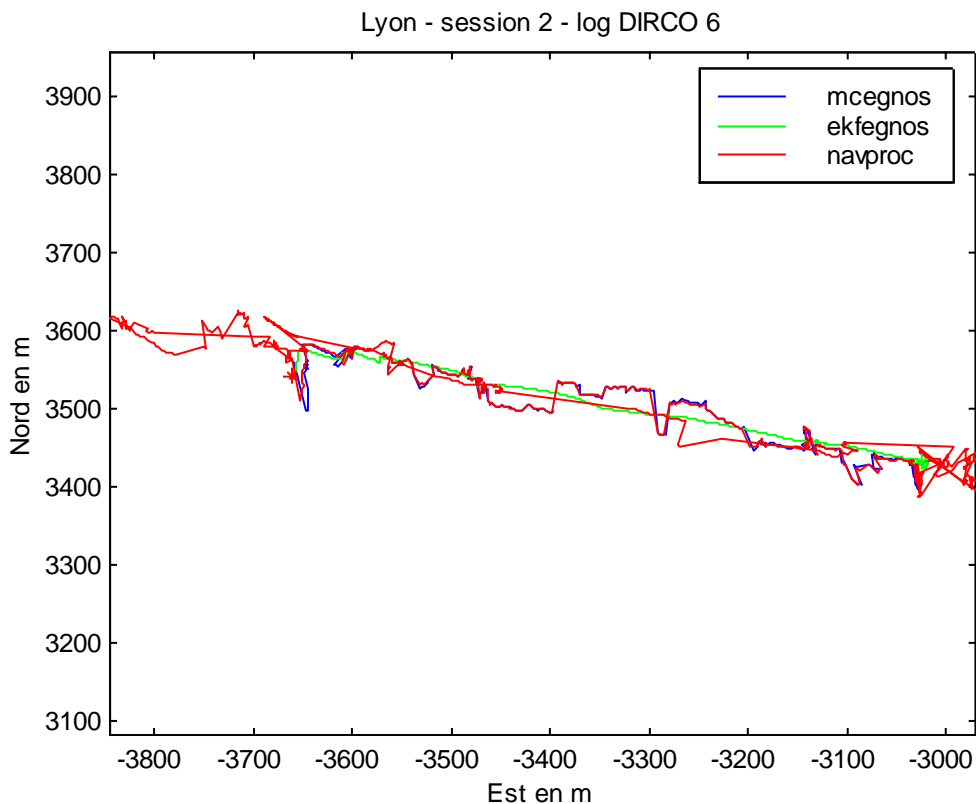


Figure 23 : zoom trajectoires planes calculées (Lyon2 – log6, avec tests des pseudo-distances et des mesures Doppler)

5.4 Résultats sur toute la session Lyon2 (Portique1 puis Urbain, en partie)

Les résultats sont donnés pour toute la session Lyon2 soit environ 1 heure ½ d'essai.

Le filtre est réinitialisé quand, consécutivement pendant une certaine durée :

- plus de la moitié des mesures de pseudo-distances sont rejetées, ou
- plus de 3 mesures de pseudo-distances sont rejetées, ou
- plus de la moitié des mesures Doppler sont rejetées, ou
- plus de 3 mesures Doppler sont rejetées.

Cette durée est fixée à 10 secondes pour le premier tableau, 3 secondes pour le second.

Nous installons aussi un seuil du HPL à atteindre avant d'effectuer les tests de rejet des observables. Ce seuil vaut 5 m ou 6.25 m selon que le niveau de bruit des mesures de pseudo-distances vaut 2 ou 2.5 fois l'UDRE. Ces tests portent soit sur les pseudo-distances seules, soit sur l'ensemble des observables.

Tableau 2 : Résultats avec un reset à 10 s sur la session Lyon2

Seuil HPL d'initialisation (0 : pas de seuil)	Facteur UDRE	Test (0 : pseudo-distances) (2 : pseudo-distances et mesures Doppler)	Ecart-type de l'erreur Est	Ecart-type de l'erreur Nord
0	2	0	13.6	16.9
0	2	2	10.9	15.5
0	2.5	0	13.3	18.3
0	2.5	2	9.9	14.6
5	2	0	12.8	16.2
5	2	2	8.9	15.3
6.25	2.5	0	13.0	18.3
6.25	2.5	2	10.1	13.9
Moindres carrés sans pondération			13.2	17.9
NavProc MOPS pondération UDRE			10.0	13.3

Les principaux enseignements de ces résultats sont :

- l'effet de lissage apporté par le filtre est masqué sur ces statistiques car cet effet n'empêche pas des erreurs grandes de se produire, notamment quand on commence à rejeter beaucoup d'observables (en particulier jusqu'à atteindre les 10 secondes de réinitialisation).
- l'ajout du test des mesures Doppler est salutaire.
- le facteur multiplicateur de l'UDRE joue dans un sens et dans l'autre...
- le seuil sur le HPL avant d'effectuer les tests est sans effet significatif.

En conclusion, la trajectoire est plus lisse qu'aux moindres carrés ou que fournie par NavProc MOPS, mais en contrepartie elle peut présenter de fortes déviations.

Dans ce second tableau, on réinitialise plus souvent, i.e. si beaucoup d'observables sont rejetées consécutivement pendant 3 secondes (et non pas 10).

Les grandes erreurs observées pendant ces périodes de rejet, qui peuvent aller jusqu'à un fonctionnement du filtre à l'estime pure, impactent moins les statistiques globales. Celles-ci sont meilleures.

Tableau 3 : Résultats avec un reset à 3 s sur la session Lyon2

Seuil HPL d'initialisation (0 : pas de seuil)	Facteur UDRE	Test (0 : pseudo-distances) (2 : pseudo-distances et mesures Doppler)	Ecart-type de l'erreur Est	Ecart-type de l'erreur Nord
0	2	0	8.4	14.7
0	2	2	8.3	13.7
0	2.5	0	8.8	14.6
0	2.5	2	8.7	11.6
5	2	0	8.3	14.6
5	2	2	8.0	12.5
6.25	2.5	0	8.8	14.9
6.25	2.5	2	8.1	12.7

Moindres carrés sans pondération	13.2	17.9
NavProc MOPS pondération UDRE	10.0	13.3

Le meilleur résultat est en quatrième ligne : il correspond à un niveau de bruit plus important que celui calculé sur la base des résultats aux moindres carrés (2.5 UDRE et non 2, et 0.4 m/s et non 0.3 m/s pour les mesures Doppler), les tests portant sur toutes les observables.

L'application d'un seuil avant d'effectuer ces tests ne semble pas influencer systématiquement.

Ces résultats masquent des disparités fortes entre les différents essais de la session complète Lyon2. A titre d'illustration, voyons (figures 24 et 25) les séries temporelles d'erreurs en Est et en Nord, pour les moindres carrés, le filtre que nous proposons et NavProc MOPS.

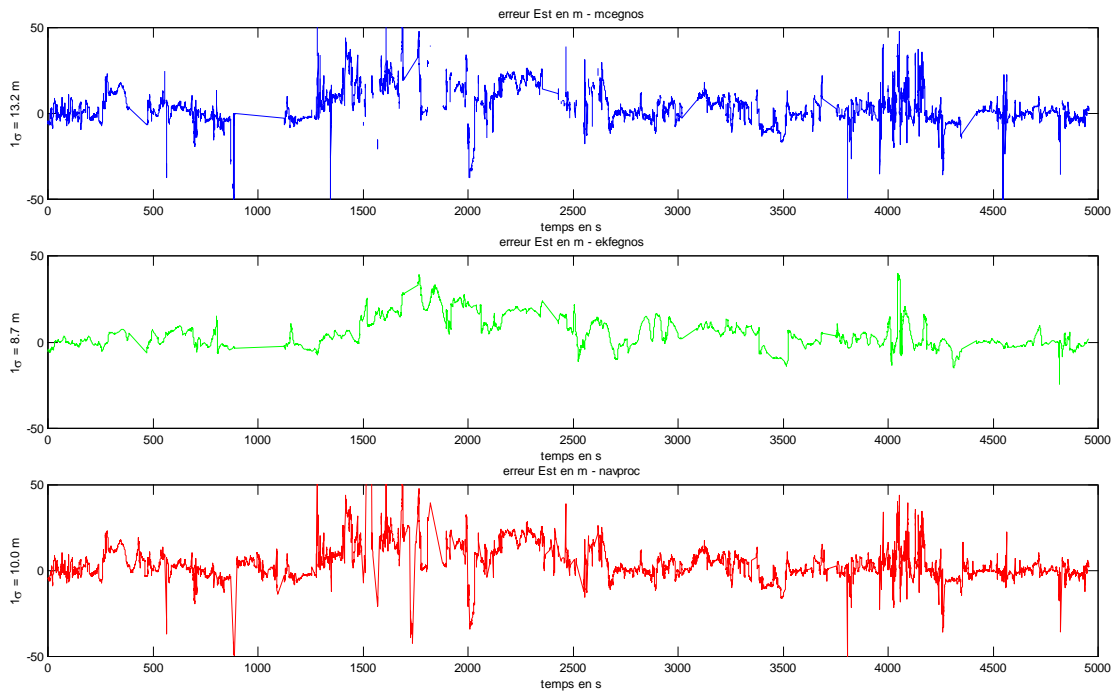


Figure 24 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (l'essai utilisé pour régler est au début)

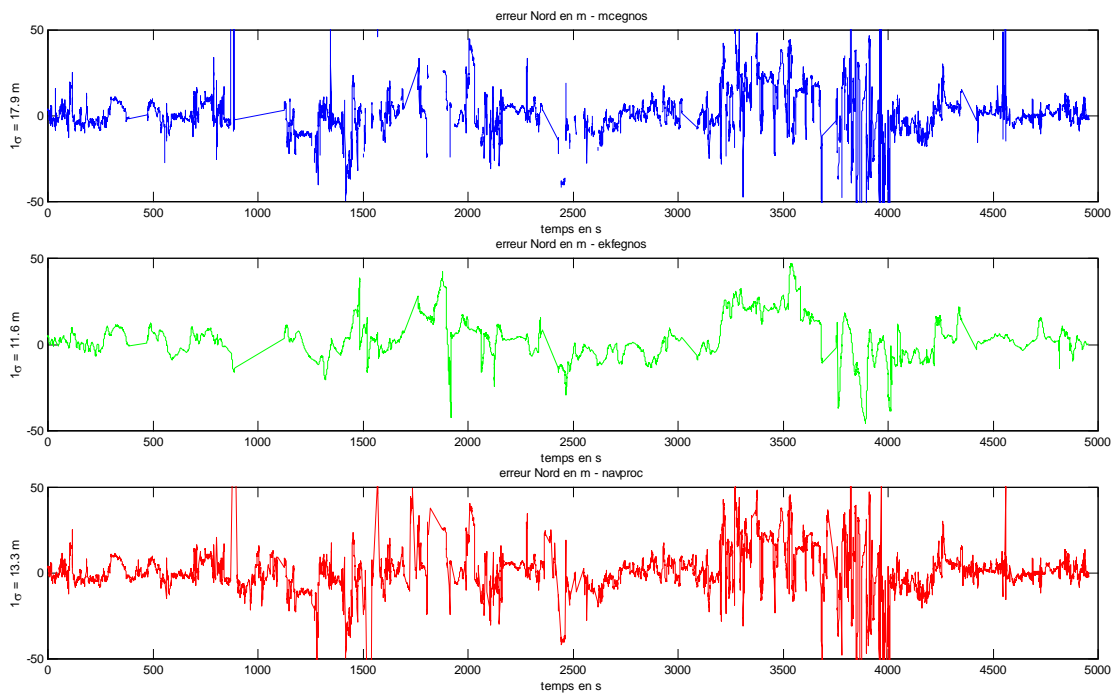


Figure 25 : erreurs (est et nord) des trajectoires calculées par rapport à la référence (l'essai utilisé pour régler est au début)

6 Résultats compilés sur tout Lyon, scénario par scénario

Tableau 4 : Résultats pour le scénario Portique 1

Récepteur + Antenne	Algo	HPE (m)			HPL (m)			Dispo. Mode EGNOS	Very Safe	Safe & Near MI	MI
		moy	50 %	95 %	moy	50 %	95 %				
Safedrive Ublox + Patch (Toit du Véhicule)	Moindres Carrés (MOPS)	2.14	1.99	4.17	10.73	10.82	15.45	100%	99.97%	0.03%	0%
Safedrive Ublox + Patch (Intérieur du Véhicule)	Moindres Carrés (MOPS)	6.98	6.31	14.53	12.97	11.53	18.76	100%	69.59%	17.07%	13.34%
	Lâche mod. véh. PFA=0.1	6.7	6.1	13.0	38.7	38.0	42.1	100%	100%	0%	0%
	Serré mod. véh. PFA = 1%	5.8	4.4	15.3	10.1	10.0	11.3	100%	77.6%	6.2%	16.2%
FDE itérative	Serré mod. véh. PFA = 1%	6.6	4.9	14.5	10.3	10.0	13.6	100%	66.94%	14.22%	18.84%
	Serré mod. acc. PFA = 1%	6.7	6.4	11.4	3.4	3.1	4.5	100%	9.9%	9.4%	80.7%
	Serré mod. acc. ode/gyro PFA = 1%	5.6	5.3	11.6	4.6	4.6	5.7	100%	28.1%	10.9%	60.9%

Tableau 5 : Résultats pour le scénario Portique 2

Récepteur + Antenne	Algo	HPE (m)			HPL (m)			Dispo. Mode EGNO S	Very Safe	Safe & Near MI	MI
		moy	50 %	95 %	moy	50 %	95 %				
Safedrive Ublox + Patch (Toit du Véhicule)	Moindres Carrés (MOPS)	2.02	1.79	4.13	10.65	9.58	15.13	100%	100%	0%	0%
Safedrive Ublox + Patch (Intérieur du Véhicule)	Moindres Carrés (MOPS)	7.65	7.60	13.68	13.28	12.24	19.24	100%	75.55%	14.05%	10.40%
	Lâche mod. véh. PFA=0.1	8.0	8.0	13.1	32.8	32.1	40.4	100%	100%	0%	0%
	Serré mod. véh. PFA = 1%	8.4	7.8	15.8	10.9	10.4	14.8	100%	48.6%	35.0%	16.4%
FDE itérative	Serré mod. véh. PFA = 1%	8.07	7.61	15.53	10.46	10.37	12.70	100%	49.00%	33.32%	17.68%
	Serré mod. acc. PFA = 1%	8.1	8.2	12.7	3.8	3.6	5.0	100%	3.8%	4.8%	91.4%
	Serré mod. acc. PFA = 1%	7.3	7.0	12.0	5.0	4.8	6.4	100%	9.0%	10.5%	80.5%

Tableau 6 : Résultats pour le scénario Urbain

Récepteur + Antenne	Algo	HPE (m)			HPL (m)			Dispo. Mode EGNO S	Very Safe	Safe & Near MI	MI
		moy	50 %	95 %	moy	50 %	95 %				
Safedrive Ublox + Patch (Toit du Véhicule)	Moindres Carrés (MOPS)	7.14	4.59	22.08	13.38	10.65	24.47	100%	76.35%	7.95%	15.70%
Safedrive Ublox + Patch (Intérieur du Véhicule)	Moindres Carrés (MOPS)	18.59	12.89	47.89	23.79	14.95	69.96	99.87%	49.30%	14.99%	35.58%
	Lâche mod. véh. PFA=0.1	19.2	15.5	42.0	39.4	32.8	96.3	100%	74.0%	12.8%	13.2%
	Serré mod. véh. PFA = 1%	20.6	16.9	53.0	19.8	14.5	44.8	100%	33.8%	16.2%	50.0%
FDE itérative	Serré mod. véh. PFA = 1%	21.72	17.23	57.30	17.25	14.18	35.23	100%	30.83%	12.96%	56.22%
	Serré mod. acc. PFA = 1%	17.7	15.8	32.7	9.7	5.4	19.1	100%	9.7%	4.3%	86.1%
	Serré mod. acc. odo/gyro PFA = 1%	16.1	14.8	36.3	10.8	6.1	20.2	100%	12.7%	8.0%	79.3%

Tableau 7 : Résultats pour le scénario Corridor

Récepteur r + Antenne	Algo	HPE (m)			HPL (m)			Dispo. Mode EGNO S	Very Safe	Safe & Near MI	MI
		moy	50 %	95 %	moy	50 %	95 %				
Safedrive Ublox + Patch (Toit du Véhicule)	Moindres Carrés (MOPS)	2.49	2.30	4.68	10.39	9.61	15.08	100%	99.80%	0.14%	0.06%
Safedrive Ublox + Patch (Intérieur du Véhicule)	Moindres Carrés (MOPS)	8.62	7.08	19.52	13.27	11.05	25.81	99.04%	63.25%	17.95%	17.84%
	Lâche mod. véh. PFA=0.1	14.0	8.5	54.0	123.8	39.0	1000 (sat.)	100%	99.5%	0.4%	0.1%
	Serré mod. véh. PFA = 1%	14.5	8.7	45.5	86.7	10.9	956.8	100%	54.4%	17.3%	28.3%
FDE itérative	Serré mod. véh. PFA = 1%	37.93	8.20	58.00	103.6	10.64	1000 (sat.)	100%	56.64%	19.20%	24.16%
	Serré mod. acc. PFA = 1%	15.8	9.1	34.1	12.3	3.7	61.5	100%	12.5%	5.4%	82.1%
	Serré mod. acc. odo/gyro PFA = 1%	361	8.7	1000 (sat.)	1000 (sat.)	4.9	1000 (sat.)	100%	22.7%	7.4%	69.9%

Dans ce scénario, il y a plusieurs masques (tunnel de Fournière) de plusieurs minutes. Le filtre sans odo/gyro ne peut contenir l'erreur de navigation à l'estime et il dérive sans borne (au-delà de 1000 m). L'erreur reste inférieure à 100 m pour les autres filtres, tous utilisant l'odo et le gyro. Ceux où le cap est inclus dans le vecteur d'état dérivent d'environ 50 m, contre environ 30 m dans le filtre utilisant le modèle accéléré plan. La propriété de non-holonomie ne s'avère pas vraiment intéressante à exploiter dans le cas de ces essais.

Le tableau suivant donne, pour chaque scénario :

- le pourcentage de pseudo-distances rejetées ;
- le pourcentage de mesures Doppler rejetées, pour les filtres qui les utilisent.

Le scénario Urbain, et dans une moindre mesure le scénario Corridor, présentent plus de mesures a priori aberrantes et rejetées par les filtres, que les scénarios Portique1 et 2.

Tableau 9 : Liste des masques pour chaque scénario

scénarios	mod. véh.	mod. véh.	mod. acc.	mod. acc.
		FDE	FDE	FDE
Portique1 pseudo	3.39	3.02	2.18	0.78
Doppler			1.91	1.31
Portique2 pseudo	6.15	2.49	1.13	1.41
Doppler			1.81	0.84
Urbain pseudo	17.34	15.01	9.89	9.54
Doppler			7.23	3.17
Corridor pseudo	11.14	8.83	7.25	6.39
Doppler			2.11	0.83

7 Conclusions sur l'hybridation

7.1 Hybridation avec capteurs à l'estime alimentant le modèle d'évolution du véhicule

(En complément des conclusions du livrable [DR3] de M3S...)

Les deux filtres d'hybridation n° 1 et n° 2 ont été appliqués sur les données de Lyon provenant du capteur ublox avec antenne patch intérieure.

Les conclusions du livrable [DR3] sont globalement décevantes :

- les performances moyennes en précision (HPE) sont à peine améliorées par rapport à la solution standard aux moindres carrés du MOPS, et l'application d'un algorithme FDE itératif n'est pas concluante en zone urbaine ou fortement masquée,
- les performances en intégrité ne sont pas satisfaisantes, l'hybridation lâche (réglée à 20 m d'erreur GPS) ayant tendance à systématiquement sur-protéger (sauf en ville) et l'hybridation serrée (réglée à 2 UDRE) à sous-protéger, ces réglages étant délicats pour le matériel choisi et l'environnement,
- en zone urbaine, on observe plusieurs cas de divergence du filtre d'hybridation, tellement les mesures brutes sont mauvaises,
- le scénario Corridor n'est pas à considérer étant donné la présence d'un tunnel qui a donné lieu à des dérives très importantes, qui sont absolument "normales", mais viennent fausser les statistiques,
- sur les données traitées (on rappelle ici l'exceptionnelle mauvaise qualité de celles-ci) on ne peut pas dire que l'ajout de capteurs à l'estime au récepteur EGNOS de base améliore la situation par rapport à une solution de navigation standard de type moindres carrés du MOPS.

Remarque : il n'a pas été possible de comparer les résultats du filtre de Kalman avec et sans capteurs, car ce type de filtre ne peut pas fonctionner sans capteur alimentant le modèle d'évolution.

Les explications de ce mauvais fonctionnement doivent être cherchées au niveau de l'extrême mauvaise qualité des données d'entrée, qui présentent des HPE à 50% et 95%, respectivement de 7 à 8 m et de 13 à 18 m pour les scénarios périurbains et de 18 m et 48 m pour le scénario urbain, ce qui entraîne un fonctionnement fortement dégradé des méthodes d'hybridation :

- la théorie du filtrage bayésien, et en particulier du filtrage de Kalman, suppose certaines hypothèses sur les lois de probabilités des erreurs de mesure (erreurs gaussiennes, blanches et centrées), qui ne sont absolument pas respectées ici, à cause des effets locaux qui apportent des biais considérables, amplifiés par la position de l'antenne derrière le pare-brise,
- ces "entorses" par rapport aux hypothèses standard sont couramment contournées par des "artifices" consistant à augmenter artificiellement les erreurs attendues en tentant de recouvrir le spectre réel très biaisé par une courbe de Gauss centrée artificiellement dilatée, mais ces artifices ont leurs limites et ont des effets pervers qui peuvent être catastrophiques sur les autres mécanismes du filtre, en particulier les mécanismes de rejet de mesures aberrantes qui ne fonctionnent plus comme ils devraient le faire, en particulier les mesures GPS acceptées malgré de grandes erreurs entraînent une prédiction mauvaise du filtre,
- en outre, les réglages des méthodes d'hybridation, qui sont très importants quant à l'effet sur leurs performances, deviennent extrêmement délicats et il devient quasi impossible de trouver un réglage qui optimise à la fois la précision et l'intégrité.

7.2 Hybridation serrée avec mesures à l'estime considérées comme des observations, sans modèle de véhicule

Ce type de filtre a été implémenté et appliqué sur les données pour 2 raisons :

- pour essayer de trouver une méthode d'hybridation plus performante que les 2 premières testées,
- pour être en mesure de comparer les résultats avec ou sans capteurs à l'estime.

Globalement, ce nouveau filtre a donné des résultats plus intéressants que les deux précédents, et ceci est encore plus vrai localement (voir l'étude § 5 du réglage du filtre sur une partie du scénario Portique).

Il est impossible de dire sans complément d'étude si l'intérêt de ce filtre est dû au modèle accéléré plan (plutôt qu'au modèle non-holonome) ou au fait de prendre en considération les mesures Doppler. Le modèle fourni en annexe (cf. Tableau A3 : modèle non-holonome de véhicule avec odo/gyro en observation) doit être réglé et appliqué sur la totalité de la base de données de Lyon pour pouvoir se prononcer. Cela n'a pas été fait dans le cadre de cette étude, car on a montré rapidement qu'il ne pouvait donner satisfaction sans odo/gyro.

De plus, grâce à la comparaison avec et sans capteurs, on a pu mettre en évidence, que les capteurs n'apportent pas de gain significatif quand le GPS est disponible, compte tenu de la mauvaise qualité des mesures d'entrée. Ils permettent toutefois de mieux contenir l'erreur du modèle accéléré plan utilisé seul en cas de masquage GPS.

7.3 Hybridation en général

Notre étude a montré qu'il était vain d'espérer une amélioration significative des performances en localisation absolue d'un équipement embarqué GPS fonctionnant dans de très mauvaises conditions de réception à l'aide d'une hybridation avec des capteurs inertiels de moyenne gamme, tout au moins en utilisant des techniques standard de fusion de données bayésiennes de type filtre de Kalman. La qualité de base des observations GNSS reste le déterminant principal du résultat de l'hybridation, à moins d'utiliser des composants inertiels très performants et très coûteux, ce qui était hors sujet pour notre étude.

Peut-être que des méthodes mieux adaptées à des données aussi perturbées de type Kalman adaptatif, logique floue ou théorie de la croyance auraient donné de meilleurs résultats, mais leur étude aurait largement dépassé le cadre du projet. Il serait intéressant également d'étudier l'apport potentiel de la carte numérique au calcul de position.

A noter enfin, que ces analyses se basent sur les performances "pures" de positionnement. La relation entre performances de positionnement et performances de détection de passages de points de tarification n'est pas linéaire et la performance de l'algorithme de corrélation cartographique peut fortement influencer sur les performances de "bout en bout".

8 La corrélation cartographique

Il avait été prévu dans le programme d'origine du projet de mener un travail (limité) sur l'interaction entre corrélation cartographique et qualité du positionnement absolu.

Deux axes d'étude avaient été envisagés :

1. la sensibilité du système global "positionnement + corrélation cartographique" à la qualité du positionnement (en termes de précision), en particulier l'apport éventuel d'une amélioration de précision apportée par l'hybridation sur les performances de la chaîne de "bout en bout",
2. l'exploitation des informations d'intégrité (HPL) dans le processus de corrélation cartographique.

Il avait été émis l'idée de développer et d'utiliser pour cette étude un algorithme "standard" de corrélation cartographique qu'on aurait appliqué sur un ou plusieurs portiques virtuels sur des trajectoires calculées avec GPS/EGNOS d'une part et avec GPS/EGNOS + hybridation.

Ce travail n'a pas été fait pour les 2 raisons suivantes :

- les données de base GPS+EGNOS étant tellement mauvaises que les deux trajectoires (avec et sans hybridation) auraient été trop proches en termes de précision pour obtenir un quelconque résultat sur l'axe 1,
- les niveaux de protection qui ont été obtenus dans cette étude ne sont pas exploitables, car pas suffisamment fiables (soit trop bas, soit trop élevés).

En fait, l'interaction entre corrélation cartographique et qualité du positionnement absolu est un problème compliqué qui ne peut pas être abordé de façon sérieuse dans une étude aussi courte et limitée.

Les paramètres qui régissent cette interaction sont nombreux et de nature diverse :

- qualité du positionnement, en termes de précision, cadence de calcul, intégrité, cette qualité elle-même dépendant d'un grand nombre de paramètres :
 - o environnement local,
 - o heure,
 - o climat,
 - o récepteur,
 - o corrections éventuelles, etc.
- efficacité de la méthode de corrélation cartographique,
- qualité de l'information cartographique au niveau du portique virtuel,
- géométrie et topologie locales du réseau routier.

D'après l'expérience du LCPC en la matière, deux cas de figure, se recouvrant partiellement, doivent être considérés :

- le segment taxable est dans un environnement plutôt dégagé (typiquement la majorité des segments taxables du réseau national) et dans ce cas, il semble qu'il soit toujours possible de trouver une position du point de tarification et d'utiliser un algorithme de corrélation cartographique suffisamment performant pour que les performances de "bout en bout" du système soit conforme aux attentes, dans ce cas, l'hybridation pourrait être un plus pour augmenter la confiance dans la position calculée et la détection de l'événement, elle pourrait également être utile pour détecter des positions aberrantes ou des fraudes (redondance d'information)
- le segment taxable est dans un environnement très contraint, typiquement un environnement urbain et on observe le cumul de plusieurs conditions défavorables :
 - o le calcul de la position est difficile, entraînant une mauvaise précision et une intégrité mal maîtrisée, avec des HPL qui ne sont pas fiables,
 - o le réseau routier est dense et complexe,
- le cumul de ces mauvaises conditions entraîne fatalement de mauvaises performances de "bout en bout" du système de télépéage, sans qu'il soit possible de chiffrer a priori la dégradation des performances, celles-ci dépendant éminemment de l'environnement. Seule une étude statistique de grande ampleur, combinant des essais réels et de la simulation pourrait permettre de quantifier ces performances.

9 Conclusions générales sur l'étude et recommandations

Les trois objets de l'étude étaient les suivants :

1. analyse des performances EGNOS pour un récepteur bas-coût dont l'antenne est placée à l'intérieur du véhicule (configuration "spéciale" Eco-taxe PL),
2. analyse des performances hybridées EGNOS avec capteurs inertiels,
3. étude sur l'influence des algorithmes de corrélation cartographique dans le cadre des applications de télépéage GNSS.

Concernant l'objet 1, l'étude a montré que les performances obtenues avec une configuration bas-coût (récepteur u-blox associé à une antenne patch) étaient notablement dégradées quand l'antenne était placée derrière le pare-brise du véhicule. Un rapport entre 3 et 4 a été observé sur les HPE calculées par l'algorithme standard MOPS aux moindres carrés et les pertes d'intégrité étaient également augmentées du fait que les HPL calculées n'augmentaient pas de façon proportionnelle aux HPE. Cette dégradation était due au cumul des effets de 2 phénomènes : le masque créé par la carrosserie de la voiture, l'atténuation des signaux au travers le pare-brise.

De plus, le rapport [DR3] a démontré que cette dégradation était d'autant plus forte dans le cas où ce pare-brise était de type athermique.

Recommandation 1 : il est primordial de veiller à la localisation de l'EE dans la cabine du véhicule et, si possible, d'installer l'antenne sur le toit si on désire exploiter au mieux les performances de l'ensemble récepteur - antenne.

Concernant l'objet 2, l'étude a montré qu'il n'était pas possible d'améliorer de façon nette le résultat du calcul de position d'un EE installé dans de mauvaises conditions, c'est-à-dire délivrant des mesures brutes trop dégradées, en hybridant ses données avec des capteurs inertiels, même de qualité moyenne.

Les méthodes usuelles donnant des résultats intéressants avec des données GNSS de qualité "normales" se sont avérées inefficaces pour améliorer les choses.

Recommandation 2 : étudier l'intérêt d'autres méthodes d'hybridation que les méthodes bayésiennes, qui ne nécessitent pas pour donner leur pleine efficacité des hypothèses statistiques sur les bruits qui ne sont pas satisfaites dans la réalité.

Recommandation 3 : étudier l'apport potentiel de la carte numérique, par exemple en choisissant un état constitué des coordonnées du mobile projetées sur la carte plutôt que les coordonnées absolues, ce qui permettrait d'utiliser la carte pour contraindre le problème d'estimation.

L'objet 3 de l'étude n'a pas été étudié compte tenu des résultats des phases 1 et 2. Ce travail est un travail complexe qui doit faire l'objet d'une étude plus lourde.

Recommandation 4 : programmer une étude approfondir, par exemple sous la forme d'une thèse, sur les performances combinées d'un positionnement GNSS et d'un algorithme de corrélation cartographique pour les applications de Geofencing, en environnement interurbain mais aussi en environnement urbain.

Annexe 1 : Les modèles d'évolution et d'observation des 3 méthodes d'hybridation utilisées

9.1 Repère local de travail, modèle du véhicule et bras de levier

Le schéma suivant montre le repère local (plan tangent au WGS 84) et le modèle de véhicule utilisés. La roue arrière gauche porte l'odomètre. L'antenne GPS est proche de l'axe du véhicule, $TX=2.22$ m et $TY=-0.7$ m désignant les composantes du bras de levier de celle-ci par rapport à la roue odométrique.

Le gyromètre est placé à plat dans le véhicule. Son défaut d'assiette est négligé.

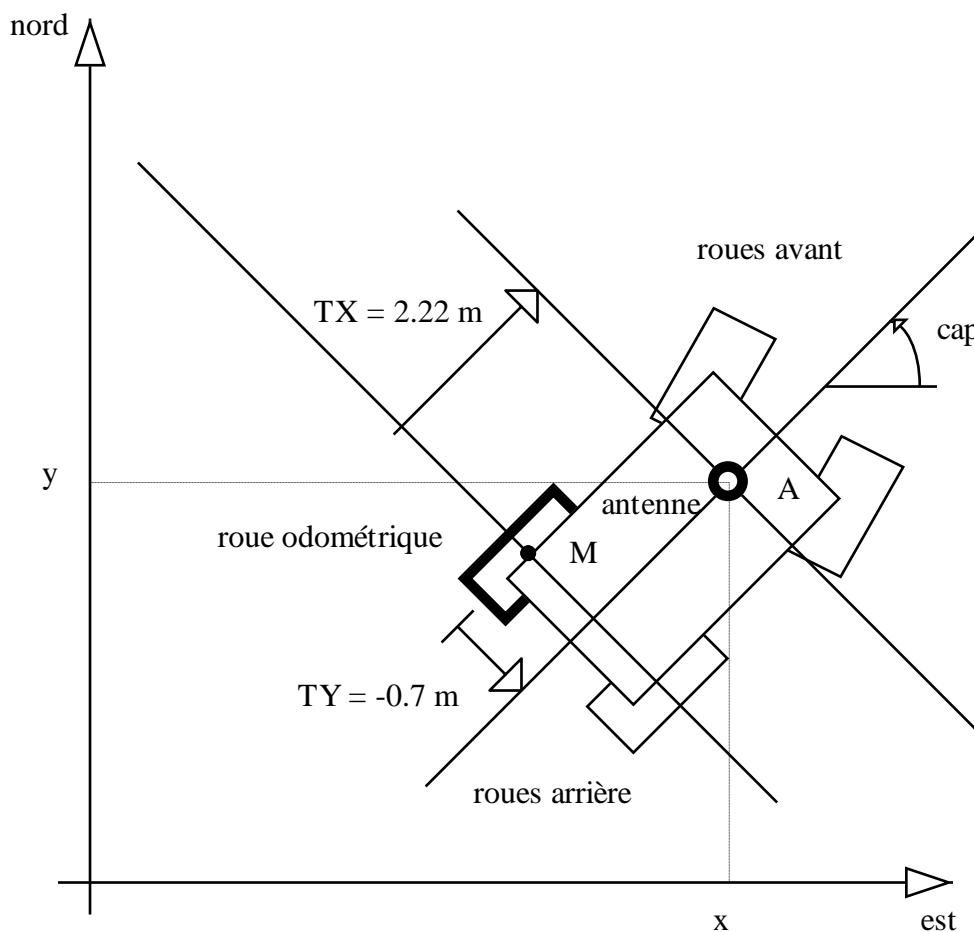


Figure A1 : Modèle de véhicule utilisé

9.2 Algorithme en couplage lâche

Le tableau suivant synthétise le couplage lâche.

Tableau A1 : Algorithme de couplage lâche

Application	Intégrité application
Repère de travail	Local plan ENU (east, north, up).
Vecteur d'état	Coordonnées planes de l'antenne GPS (A), east, north, et cap du véhicule (3 composantes).
Evolution	<p>Modèle plan du véhicule, dont les coordonnées planes (en M, centre de la roue odométrique) évoluent en :</p> <p>=> $\Delta s \cos(\text{cap})$ => $\Delta s \sin(\text{cap})$ => et dont le cap évolue en $\omega \Delta t$,</p> <p>Δs (distance parcourue pendant l'intervalle de temps Δt) étant mesurée par un odomètre, et ω (vitesse de rotation) étant mesurée par un gyromètre tous les Δt.</p> <p>Ce modèle est transporté au droit de l'antenne GPS (A) :</p> <p>$E_{k+1} = E_k + \Delta s \cos(\text{cap}) - \omega \Delta t * (TX * \sin(\text{cap}) + TY * \cos(\text{cap}))$ $N_{k+1} = N_k + \Delta s \sin(\text{cap}) + \omega \Delta t * (TX * \sin(\text{cap}) - TY * \cos(\text{cap}))$ $\text{cap}_{k+1} = \text{cap}_k + \omega \Delta t$.</p> <p>Le modèle d'évolution est bruité, de même que les mesures Δs et ω.</p>
Observation	<p>Directement les coordonnées planes, par projection des solutions GPS EGNOS, à un bruit près supposé constant.</p> <p>NB : le cap n'est pas observé directement, mais par corrélation au travers du modèle d'évolution.</p>

Référence : [Bétaille, Gyrolis 2008].

9.3 Algorithmes en couplage serré

Plusieurs variantes ont été testées en couplage serré, synthétisées dans les tableaux suivants.

9.3.1 Couplage serré reprenant le modèle du couplage lâche

Ici, on reprend le modèle non-holonome et les mesures odo et gyro en commande. C'est donc un algorithme très proche de celui mis en œuvre en couplage lâche (cf. tableau 1).

Tableau A2 : Algorithme de couplage serré avec modèle non-holonome de véhicule et odo/gyro en commande

Application	Intégrité application
Repère de travail	Local plan ENU (east, north, up).

Vecteur d'état	Coordonnées planes de l'antenne GPS (A), east, north, et cap du véhicule, altitude, terme d'horloge récepteur et sa dérivée, d et d' (total : 6 composantes).
Evolution	<p>Modèle plan du véhicule comme précédemment (pour les composantes planes et cap). Plus :</p> <p>=> altitude constante (à un bruit près),</p> <p>=> simple intégration de la dérivée pour l'évolution du terme d'horloge,</p> <p>=> et dérivée constante (à un bruit près).</p> <p>Ainsi, les équations d'évolution s'écrivent :</p> $E_{k+1} = E_k + \Delta s \cos(\text{cap}) - \omega \Delta t (T_X \sin(\text{cap}) + T_Y \cos(\text{cap}))$ $N_{k+1} = N_k + \Delta s \sin(\text{cap}) + \omega \Delta t (T_X \sin(\text{cap}) - T_Y \cos(\text{cap}))$ $\text{cap}_{k+1} = \text{cap}_k + \omega \Delta t$ $z_{k+1} = z_k$ $d_{k+1} = d_k + d'_k \Delta t$ $d'_{k+1} = d'_k$
Observation	<p>Les pseudo-distances GPS corrigées EGNOS, à un bruit près, caractérisé par l'UDRE (<i>User Differential Range Error</i>) fourni par EGNOS.</p> <p>Celles-ci dépendent du terme d'horloge et des coordonnées east, north et altitude de l'antenne au travers d'une équation de distance (norme des vecteurs satellites-récepteur).</p>

Références : [Bétaille et al., Space Appli 2010], [Fouque, thèse UTC 2010].

Pour pouvoir mettre en évidence la contribution de l'inertiel (i.e. des mesures de l'odomètre et du gyromètre), le modèle précédent (où odo/gyro sont en commande) n'est pas pratique, car on ne peut pas utiliser ce modèle sans ces mesures. On voit que l'évolution du véhicule y est intimement liée aux capteurs.

Les deux modèles suivants peuvent switcher avec/sans l'inertiel.

9.3.2 Couplage serré passant les mesures odo/gyro en observation

Dans ce modèle (donné pour mémoire) on se propose de passer les mesures odo/gyro de la commande à l'observation, de sorte de rendre possible le fonctionnement du filtre avec et sans ces mesures. Toutefois, il s'avère en pratique que ce modèle est instable en vitesse de rotation (et donc du cap) en l'absence de gyro.

Tableau A3 : Algorithme de couplage serré avec modèle non-holonyme de véhicule et odo/gyro en observation

Application	Intégrité application
Repère de travail	Local plan ENU (east, north, up).
Vecteur d'état	Coordonnées planes de l'antenne GPS (A), east, north, et cap du véhicule, altitude, terme d'horloge récepteur et sa dérive, vitesse V (au centre M de la roue odométrique) et vitesse de rotation Ω du véhicule (total : 8 composantes).
Evolution	<p>Modèle plan du véhicule, dont les coordonnées planes évoluent en :</p> <p>=> $V \Delta t \cos(\text{cap})$</p> <p>=> $V \Delta t \sin(\text{cap})$</p> <p>=> et dont le cap évolue en $\Omega \Delta t$,</p> <p>l'odomètre et le gyromètre n'étant pas utilisés là, mais en observation.</p>

	<p>Pour les autres composantes :</p> <p>=> altitude constante,</p> <p>=> simple intégration de la dérive pour l'évolution du terme d'horloge,</p> <p>=> dérive constante,</p> <p>=> vitesse V constante,</p> <p>=> vitesse de rotation Ω constante.</p> <p>Le modèle d'évolution est bruité.</p>
Observation	<p>L'observation est de deux natures différentes : GPS EGNOS et inertiel</p> <p>=> GPS EGNOS :</p> <p>Les pseudo-distances GPS corrigées EGNOS, à un bruit près, caractérisé par l'UDRE (<i>User Differential Range Error</i>) fourni par EGNOS.</p> <p>Celles-ci dépendent du terme d'horloge et des coordonnées east, north et altitude de l'antenne au travers d'une équation de distance (norme des vecteurs satellites-récepteur).</p> <p>Les mesures GPS Doppler, à un bruit près supposé constant.</p> <p>Ces mesures Doppler dépendent des coordonnées east, north et altitude de l'antenne, de la dérive d'horloge, et de la vitesse V_A de l'antenne, elle-même déduite de la vitesse V du véhicule et de sa vitesse de rotation Ω :</p> $V_A = V + \Omega \times MA$ <p>et la vitesse V du véhicule (au centre M de la roue odométrique) a pour composantes :</p> $V_{east} = V \cos(\text{cap})$ $V_{north} = V \sin(\text{cap})$ $V_{up} = 0$ <p>NB : on note que le vecteur MA s'exprime en fonction de TX, TY, et cap.</p> <p>=> inertiel :</p> <p>La vitesse V est observée directement ($\Delta s / \Delta t$) par l'odomètre.</p> <p>La vitesse de rotation Ω est observée directement aussi (ω) par le gyromètre.</p> <p>NB : avec cette formulation, il est pratique de mettre en évidence la contribution de l'inertiel, puisque le modèle d'observation peut inclure ou pas l'inertiel, toutes choses égales par ailleurs.</p>

Référence : [Le Marchand, thèse UTC 2010].

9.3.3 Couplage serré utilisant le modèle accéléré plan

Le deuxième et dernier modèle (cf. Tableau A4) n'utilise plus la non-holonomie mais il fait l'hypothèse d'un mouvement localement accéléré plan. Il permet de travailler avec et sans odo/gyro sans problème de stabilité.

Tableau A4 : Algorithme de couplage serré avec modèle accéléré plan

Application	Intégrité application
Repère de travail	Local plan ENU (east, north, up).
Vecteur d'état	Coordonnées planes de l'antenne GPS, east, north, les composantes planes de vitesse V et d'accélération Γ de l'antenne, altitude, terme d'horloge récepteur et sa dérive. Il n'y a plus le cap.

Evolution	<p>Pas de modèle de véhicule.</p> <p>Simple intégration de l'accélération pour l'évolution de la vitesse (en composantes planes).</p> <p>Simple intégration de la vitesse pour l'évolution de la position (en composantes planes).</p> <p>Altitude constante (à un bruit près).</p> <p>Simple intégration de la dérive pour l'évolution du terme d'horloge.</p> <p>Dérive constante (à un bruit près).</p> <p>Ainsi, les équations d'évolution s'écrivent :</p> $E_{k+1} = E_k + V_{ek} \Delta t$ $N_{k+1} = N_k + V_{nk} \Delta t$ $V_{ek+1} = V_{ek} + \Gamma_{ek} \Delta t$ $V_{nk+1} = V_{nk} + \Gamma_{nk} \Delta t$ $\Gamma_{ek+1} = \Gamma_{ek}$ $\Gamma_{nk+1} = \Gamma_{nk}$ $z_{k+1} = z_k$ $d_{k+1} = d_k + d'_k \Delta t$ $d'_{k+1} = d'_k$
Observation	<p>L'observation est de deux natures différentes : GPS EGNOS et inertiel</p> <p>=> GPS EGNOS :</p> <p>Les pseudo-distances GPS corrigées EGNOS, à un bruit près (UDRE), comme précédemment.</p> <p>Les mesures GPS Doppler, à un bruit près supposé constant.</p> <p>Elles dépendent des coordonnées east, north et altitude de l'antenne, de la dérive d'horloge, et de la vitesse de l'antenne, dont on ne considère que les composantes planes (celles incluses dans le vecteur d'état).</p> <p>=> inertiel :</p> <p>La vitesse de l'antenne, en norme : $\sqrt{V_e^2 + V_n^2}$, est observée directement ($\Delta s / \Delta t$) par l'odomètre. Bras de levier négligé.</p> <p>La vitesse de rotation peut s'exprimer en fonction des composantes planes de vitesse et d'accélération de l'antenne : $(\Gamma_n \cdot V_e - \Gamma_e \cdot V_n) / (V_e^2 + V_n^2)$, et est observée directement (ω) par le gyromètre.</p> <p>NB : cette formulation, comme la précédente, est pratique pour mettre en évidence la contribution de l'inertiel, puisque le modèle d'observation peut inclure ou pas l'inertiel, toutes choses égales par ailleurs.</p>