

Deux exemples d'hybridation appliquée à la topométrie

Jérôme Verdun¹, José Cali¹, Guillaume Chauveau², Alexandre Brouste³

Réunion « GéoPos » - IGN, Saint-Mandé - 16 octobre 2014

1. Laboratoire Cnam « Géomatique et Foncier » - Équipe « Géomatique et Géosciences » - École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans
2. Actis - Conseil, Orléans
3. Laboratoire Manceau de Mathématiques - Équipe « Statistique des Processus » - Université du Maine, Le Mans

Hybridation

Hybridation et

Hybridation et topométrie ?

Hybridation et topométrie ?

⇒ *Systèmes mobiles de levé*

Systèmes mobiles de levé

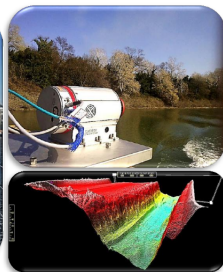
Systèmes mobiles de levé

1 terrestres



Systèmes mobiles de levé

- 1 terrestres
- 2 marins/fluviatiles

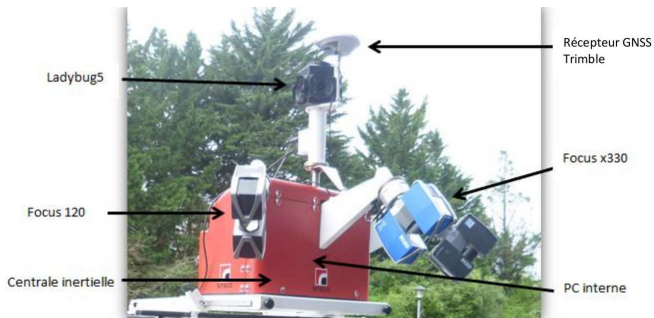


Systemes mobiles de levé

- 1 terrestres
- 2 marins/fluviatiles
- 3 aériens

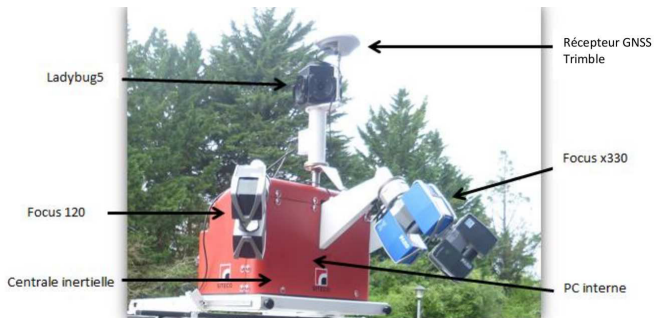


Composants génériques d'un système de levé



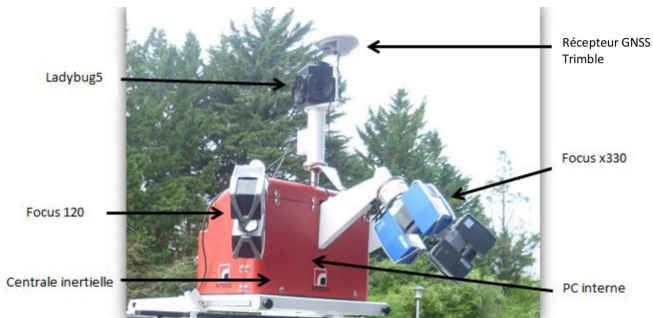
Composants génériques d'un système de levé

1 Capteur(s) de levé



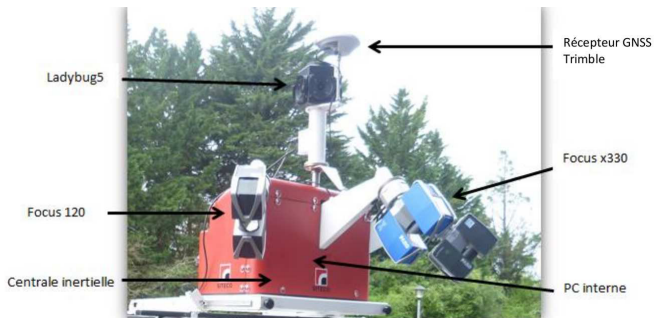
Composants génériques d'un système de levé

- 1 Capteur(s) de levé
- 2 Capteur(s) de position



Composants génériques d'un système de levé

- 1 Capteur(s) de levé
- 2 Capteur(s) de position
- 3 Capteur(s) d'attitude



Hybridation ?

Hybridation ?

⇐ *Positionnement dynamique*

Hybridation ?

⇐ *Positionnement dynamique*

Réalisée classiquement par *filtrage de Kalman* (FDK)

FDK et positionnement

FDK et positionnement

Combinaison optimale

FDK et positionnement

Combinaison optimale

- ① modèle d'évolution dynamique des grandeurs à estimer \Rightarrow
valeurs prédites

FDK et positionnement

Combinaison optimale

- ① modèle d'évolution dynamique des grandeurs à estimer \Rightarrow
valeurs prédites
- ② **valeurs mesurées** des grandeurs observables

Modèles d'évolution en positionnement dynamique

Modèles d'évolution en positionnement dynamique

⇒ *Modèles cinématiques*

Modèles d'évolution en positionnement dynamique

⇒ *Modèles cinématiques*

Utilisation du FDK en auscultation ?



Modèles d'évolution en positionnement dynamique

⇒ *Modèles cinématiques*

Utilisation du FDK en auscultation ?

= **Topométrie**



Plan de la présentation

- 1 FDK et auscultation
- 2 Positionnement GNSS/INS
- 3 Positionnement dynamique à l'ESGT

FDK et auscultation

Point de départ

BOGATIN, Sonja, et al., 2008 : *Evaluation of linear Kalman filter processing geodetic kinematic*, Measurements, Vol. 41, 561–578, p. 18.

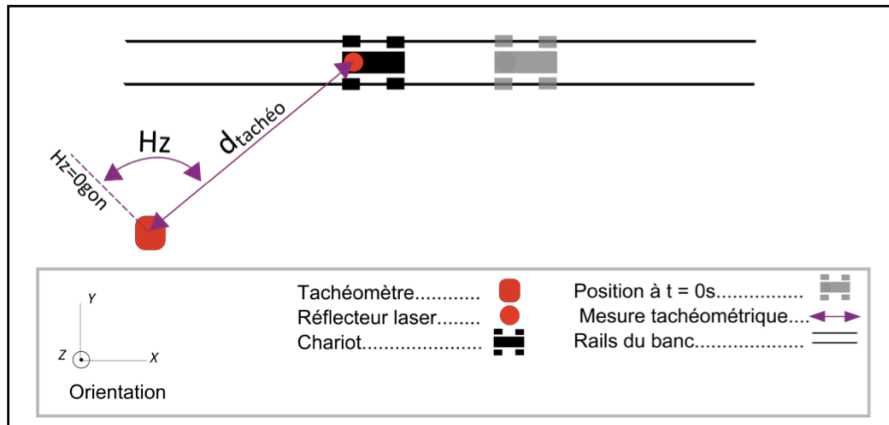
BOGATIN, Sonja, et al., 2008 : *Evaluation of linear Kalman filter processing geodetic kinematic*, Measurements, Vol. 41, 561–578, p. 18.

Gain de l'utilisation du FDK en auscultation ?

Dispositif expérimental



Protocole expérimental



Modèle d'évolution :

$$d \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ z \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & 1 & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & . & . & . & . \\ . & . & . & 0 & 1 & 0 & . \\ . & . & . & 0 & 0 & 1 & . \\ . & . & . & 0 & 0 & 0 & . \\ . & . & . & . & . & . & 0 & 1 & 0 \\ 0 & . & . & . & . & . & 0 & 0 & 1 \\ 0 & . & . & . & . & . & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ z \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_t \cdot dt + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \sigma_x \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_y \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_z \end{pmatrix} \cdot dW_t$$

Modèle d'évolution :

$$d \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ z \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & 1 & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & . & . & . & . \\ . & . & . & 0 & 1 & 0 & . \\ . & . & . & 0 & 0 & 1 & . \\ . & . & . & 0 & 0 & 0 & . \\ . & . & . & . & . & . & 0 & 1 & 0 \\ 0 & . & . & . & . & . & 0 & 0 & 1 \\ 0 & . & . & . & . & . & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ z \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_t \cdot dt + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \sigma_x \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_y \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_z \end{pmatrix} \cdot dW_t$$

Grandeurs observables : $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$.

« Calibration » des modèles

- Modèle d'évolution : σ_x , σ_y , σ_z ?

- Modèle d'évolution : $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$?
- Observation : $\sigma_{Hz}, \sigma_V, \sigma_D \Leftarrow$ données « constructeur ».

- Modèle d'évolution : $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$?
- Observation : $\sigma_{Hz}, \sigma_V, \sigma_D \Leftarrow$ données « constructeur ».

Outil de la calibration = estimation par **Maximum de Vraisemblance** (EMV)

Vraisemblance

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta) = f_{X_1, X_2, \dots, X_n, \theta}(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta)$$

Vraisemblance

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta) = f_{X_1, X_2, \dots, X_n, \theta}(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta)$$

- x_1, x_2, \dots, x_n : valeurs expérimentales des VA de l'échantillon.

Vraisemblance

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta) = f_{X_1, X_2, \dots, X_n, \theta}(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta)$$

- x_1, x_2, \dots, x_n : valeurs expérimentales des VA de l'échantillon.
- θ : paramètre(s) à déterminer.

Vraisemblance dans le cas de VA indépendantes

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta) = f_{X_1, \theta}(x_1, \theta) f_{X_2, \theta}(x_2, \theta) \dots f_{X_n, \theta}(x_n, \theta)$$

où $f_{X_i, \theta}(x_i, \theta)$ est la densité de probabilité de la VA X_i .

Vraisemblance dans le cas de VA indépendantes identiquement distribuées

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \theta) = \prod_{i=1}^n f_{X,\theta}(x_i, \theta)$$

où $f_{X,\theta}(x_i, \theta)$ est la densité de probabilité de la VA mère X calculée en x_i

Utilisation d'échantillon de mesures (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) .

Utilisation d'échantillon de mesures (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) .

2 cas possibles :

Utilisation d'échantillon de mesures (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) .

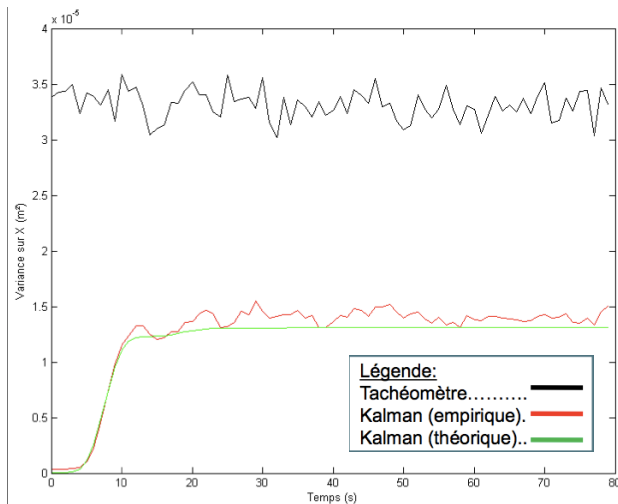
2 cas possibles :

- 1 les mesures sont toutes observables \Rightarrow fonction-coût = vraisemblance

Utilisation d'échantillon de mesures (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) .

2 cas possibles :

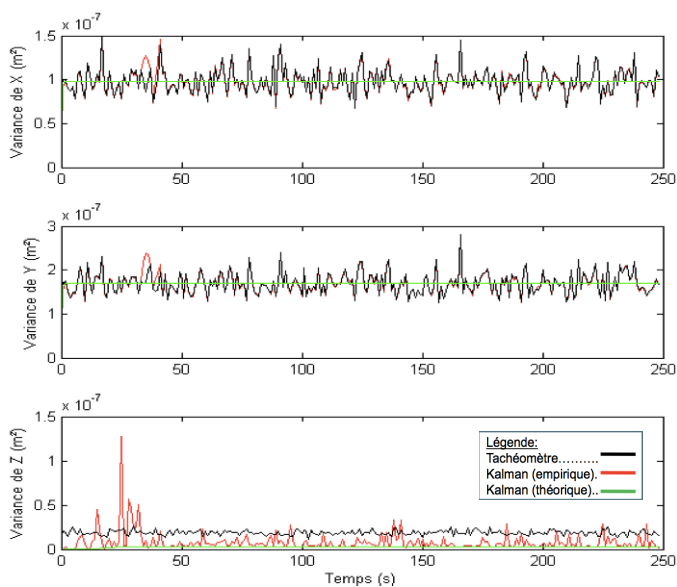
- 1 les mesures sont toutes observables \Rightarrow fonction-coût = vraisemblance
- 2 au moins une mesure n'est pas observable \Rightarrow fonction-coût = composition vraisemblance et FDK



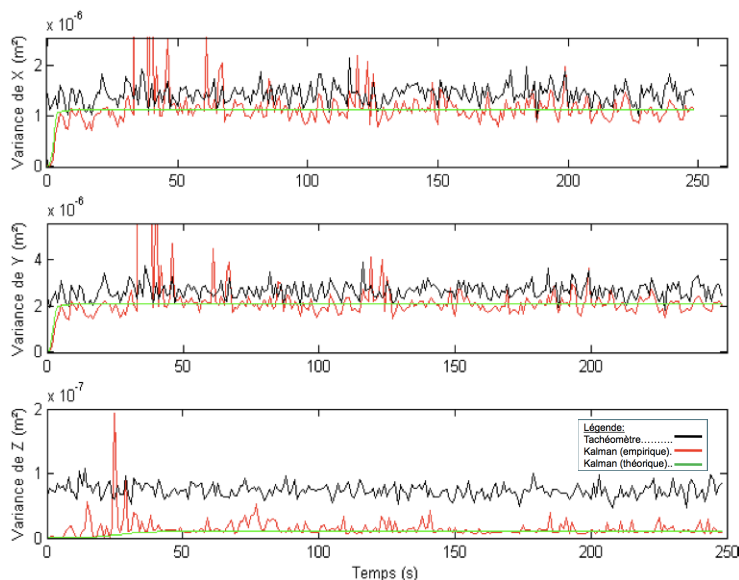
Paramètres de l'expérience

	Test 1	Test 2	Test 3
σ_{Hz}	3 dmgon	6 dmgon	3 & 6 dmgon
σ_d	0.5 mm	2 mm	0.5 & 2 mm
σ_v	3 dmgon	6 dmgon	3 & 6 dmgon
Instrument	Leica TCRP (Haut de gamme)	Leica ICON robot 50 (Milieu de gamme)	Leica TCRP dégradé localement

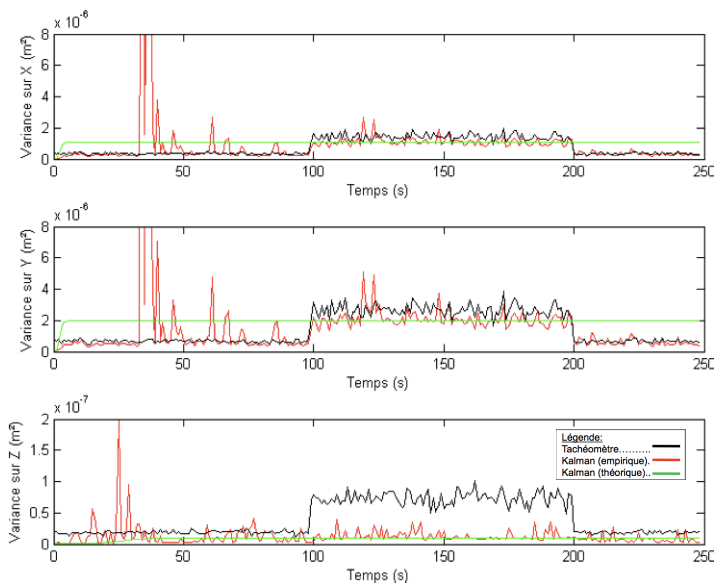
Résultats expérimentaux



Résultats expérimentaux



Résultats expérimentaux



Conclusions sur l'auscultation

- ① Réduction de la variance effective quoique modeste ($\simeq 2$ mm).

Conclusions sur l'auscultation

- ① Réduction de la variance effective quoique modeste ($\simeq 2$ mm).
- ② Effet de stabilisation

Conclusions sur l'auscultation

- ① Réduction de la variance effective quoique modeste ($\simeq 2$ mm).
- ② Effet de stabilisation
- ③ Calibration par EMV opérationnelle

Conclusions sur l'auscultation

- ① Réduction de la variance effective quoique modeste ($\simeq 2$ mm).
- ② Effet de stabilisation
- ③ Calibration par EMV opérationnelle
- ④ Travaux en cours de nouveaux modèles d'évolution

Positionnement GNSS/INS

Motivations

- Développement des systèmes hybrides GNSS/INS miniatures

- Développement des systèmes hybrides GNSS/INS miniatures
- Apparition de FDK modifiés pour les bruits corrélés

- Développement des systèmes hybrides GNSS/INS miniatures
- Apparition de FDK modifiés pour les bruits corrélés
- Banc d'étalonnage \Rightarrow trajectoire de référence

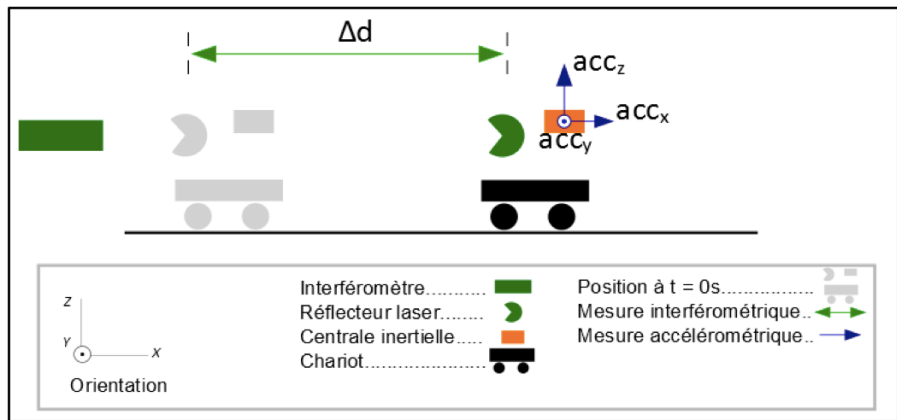
- Développement des systèmes hybrides GNSS/INS miniatures
- Apparition de FDK modifiés pour les bruits corrélés
- Banc d'étalonnage \Rightarrow trajectoire de référence

\rightarrow projet ESGT/LMM sur le FDK à bruits corrélés appliqué à la trajectographie

Dispositif expérimental



Protocole expérimental



$$\begin{pmatrix} dp_t \\ d\dot{p}_t \\ db_t \end{pmatrix} = \left(\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_t \\ \dot{p}_t \\ b_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_t \\ 0 \end{pmatrix} \right) \cdot dt + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} dW_t^1 \\ dW_t^2 \end{pmatrix} \quad t > 0, \begin{pmatrix} p_0 \\ \dot{p}_0 \\ b_0 \end{pmatrix}$$

Vecteur d'état :

$$X_t = p_t - p_t^{INS}$$

$$Y_t = p_t^{GNSS} - p_t^{INS}$$

Modèle d'évolution

Modèle d'évolution

- 1 $\sigma_1 =$ bruit des mesures d'accélération

Modèle d'évolution

- 1 $\sigma_1 =$ bruit des mesures d'accélération
- 2 $\sigma_2 =$ dérive du biais

Modèle d'évolution

- 1 $\sigma_1 =$ bruit des mesures d'accélération
- 2 $\sigma_2 =$ dérive du biais

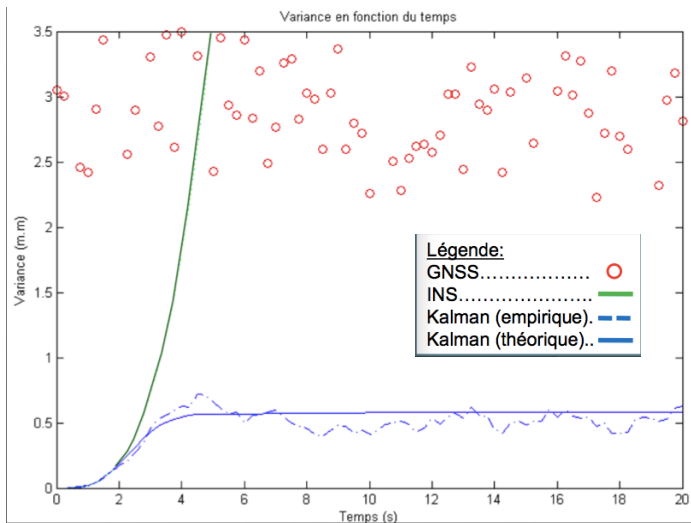
obtenus par EMV.

Modèle d'évolution

- 1 $\sigma_1 =$ bruit des mesures d'accélération
- 2 $\sigma_2 =$ dérive du biais

obtenus par EMV.

Observations \Leftarrow Données « constructeur »



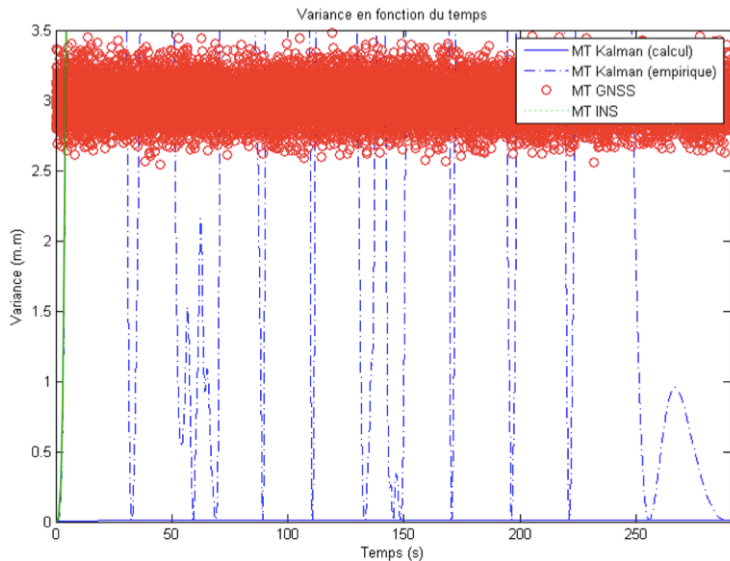
Accélérations fournies par le centrale ; chariot à l'arrêt.

Accélérations fournies par le centrale ; chariot à l'arrêt.

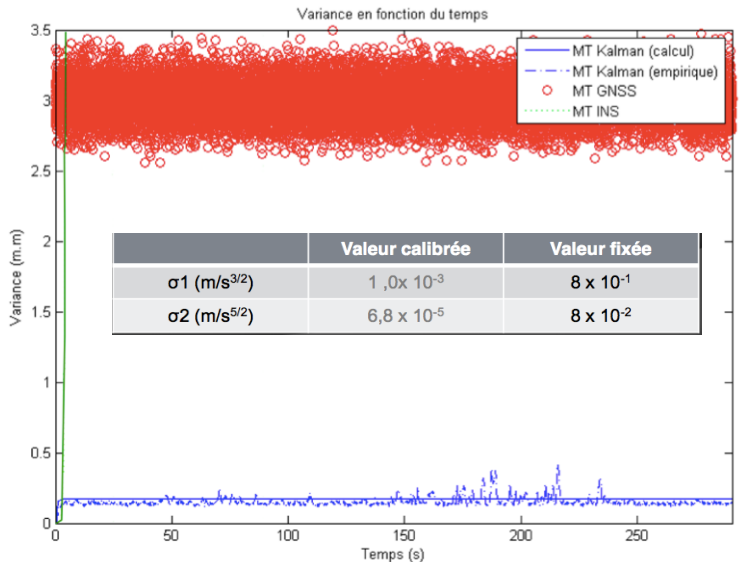
$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} b(t) \\ \dot{b}(t) \\ \vdots \\ b^{(ar-1)}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \cdot & a_{ar-2} & -a_{ar-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b(t) \\ \dot{b}(t) \\ \vdots \\ b^{(ar-1)}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \sigma_2 \varepsilon(t) \end{pmatrix}$$

	Valeur calibrée	Valeur fixée
σ_1 (m/s ^{3/2})	1,0x 10 ⁻³	
σ_2 (m/s ^{5/2})	6,8 x 10 ⁻⁵	

Résultats du FDK



Résultats du FDK



Conclusions sur le FDK

- ① EMV : permet seulement d'approximer les valeurs des paramètres de bruit.

Conclusions sur le FDK

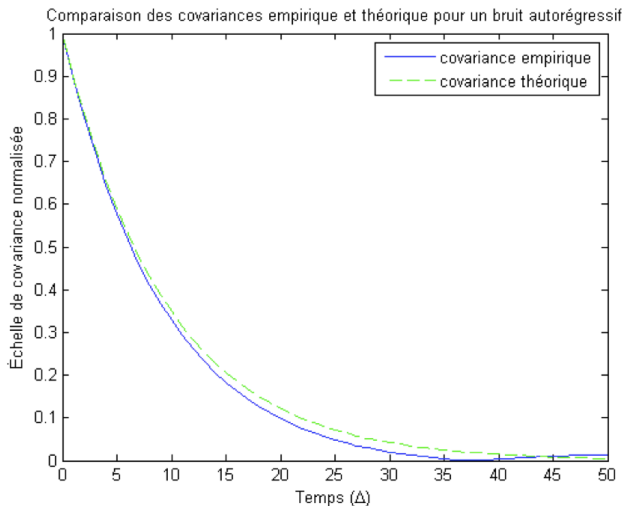
- 1 EMV : permet seulement d'approximer les valeurs des paramètres de bruit.
- 2 Fonctionne correctement \implies réduction de variance de 1.7 m à 0.7 m.

- 1 EMV : permet seulement d'approximer les valeurs des paramètres de bruit.
- 2 Fonctionne correctement \implies réduction de variance de 1.7 m à 0.7 m.
- 3 Structure de covariance à remettre en cause ?

Structures de covariance possibles :

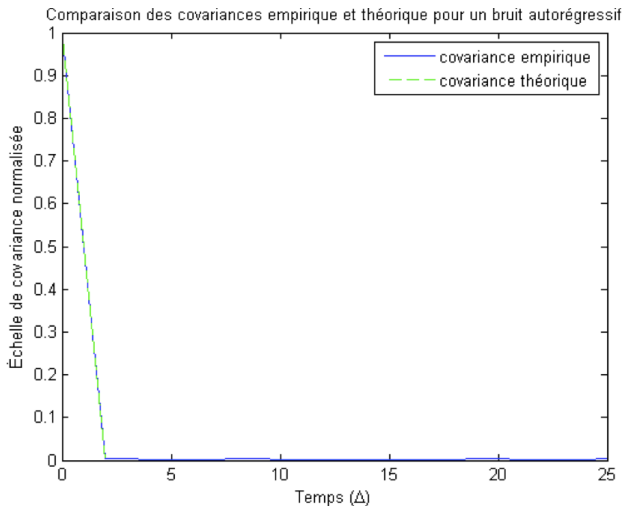
Structures de covariance possibles :

- 1 **AR(1)**,
 $\alpha = 90\%$



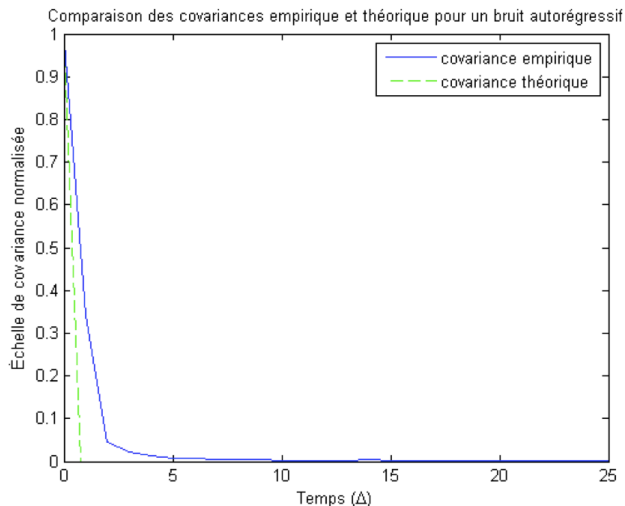
Structures de covariance possibles :

- 2 MA,
 $\alpha = 90\%$



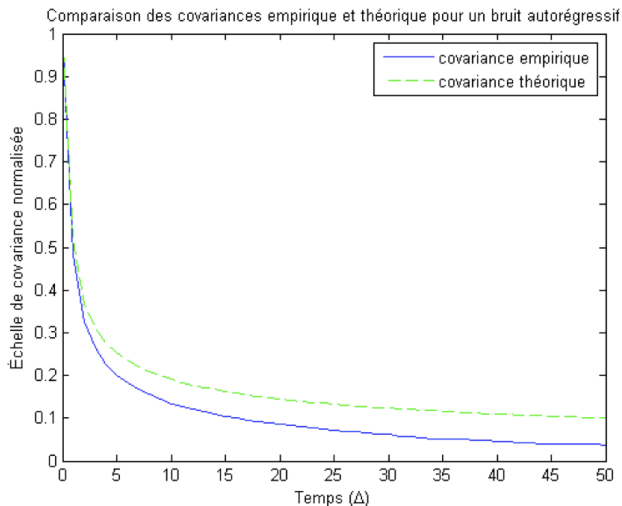
Structures de covariance possibles :

③ fGn, $H = 0.2$



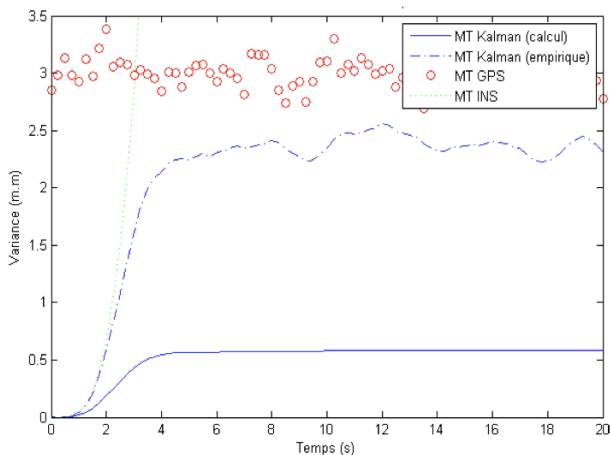
Structures de covariance possibles :

④ fGn, $H = 0.8$



FDK versus FDK à longue mémoire

FDK versus FDK à longue mémoire



Positionnement dynamique à l'ESGT

- *Bonnaz J. -M., 2007, EPFL : Analyse du comportement des capteurs inertiels en trajectographie*
- *Rabot Y., 2010, Hélimap : Le levé scan et l'imagerie hélicoptérés au service des chantiers linéaires de terrassement*
- *Candusso K., 2012, Opsia Aviation : Intégration d'une centrale inertielle dans une chaîne d'acquisition de photos aériennes non conventionnelle*
- *Vieque A., 2012, InGeo : Laser scanner mobile embarqué sur une vedette bathymétrique*
- *Demeule V., 2013, IFSTTAR : Estimation des déplacements des piétons à partir des mesures inertielle et GPS d'un smartphone*
- *Dupré C., 2013, Getude Mise en place du processus d'acquisition par lasergrammétrie dynamique : utilisation du système Pegasus - Application à la production de plans de masse pour ERDF*
- *Grob M., 2014, GeoMat : Protocole d'acquisition d'un système de levé par drone pour les géomètres - Application au drone AiBot X6*
- *Nunes M., 2014, GeoSat : Étude d'un système de type « Mobile Mapping Scanning » et mise en œuvre d'une procédure de calibration*