

# Deux exemples d'hybridation appliquée à la topométrie

Jérôme Verdun<sup>1</sup>, José Cali<sup>1</sup>, Guillaume Chauveau<sup>2</sup>, Alexandre Brouste<sup>3</sup>

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

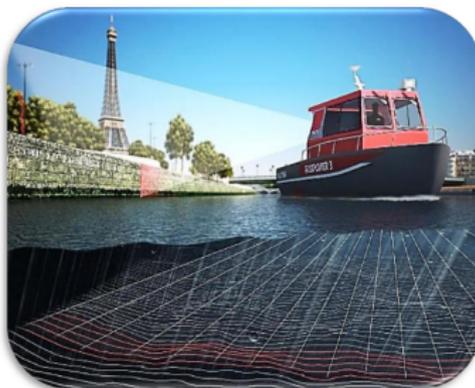
# Systèmes mobiles de levé

## 1 terrestres



# Systèmes mobiles de levé

- 1 terrestres
- 2 marins/fluviatiles



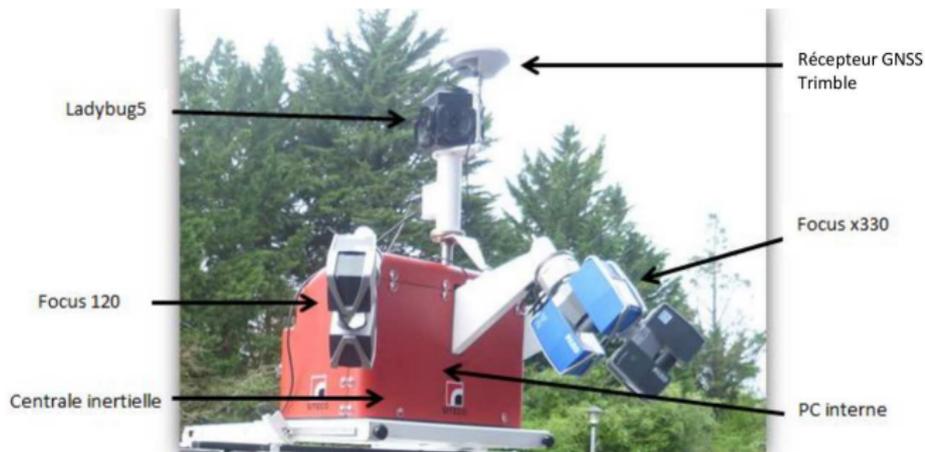
# Systemes mobiles de levé

- 1 terrestres
- 2 marins/fluviales
- 3 aériens



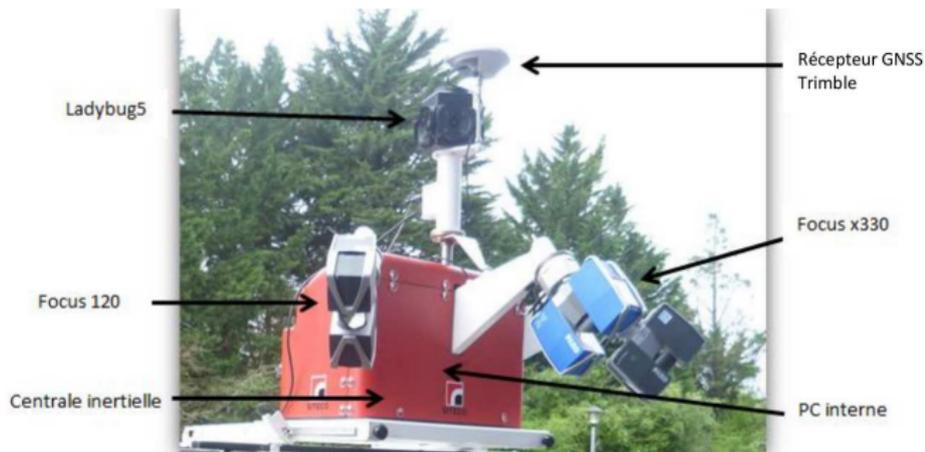


# Composants génériques d'un système de levé



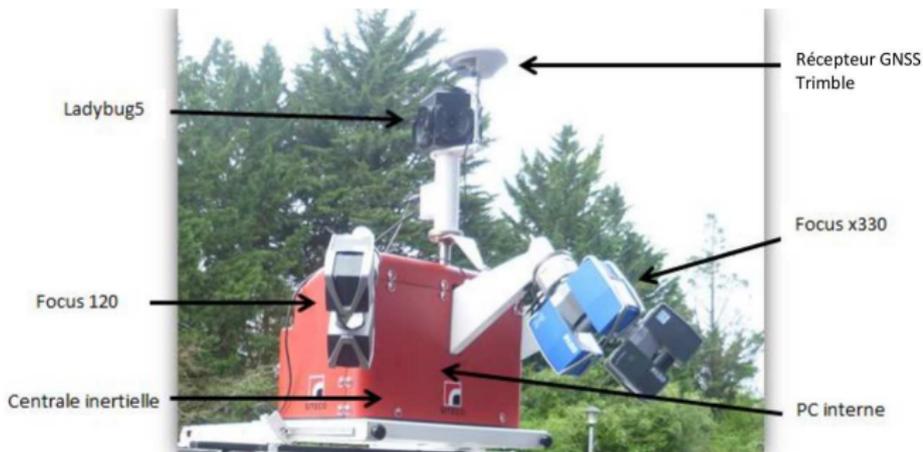
# Composants génériques d'un système de levé

## 1 Capteur(s) de levé



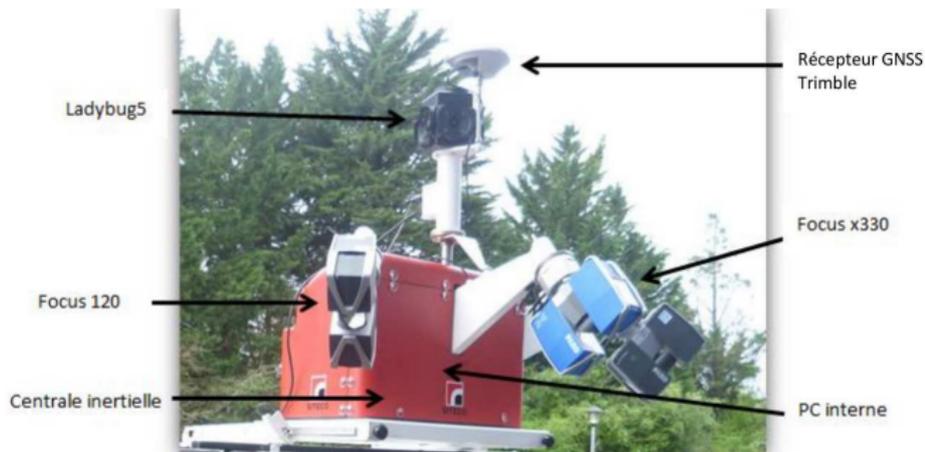
# Composants génériques d'un système de levé

- 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 ⇒ **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.

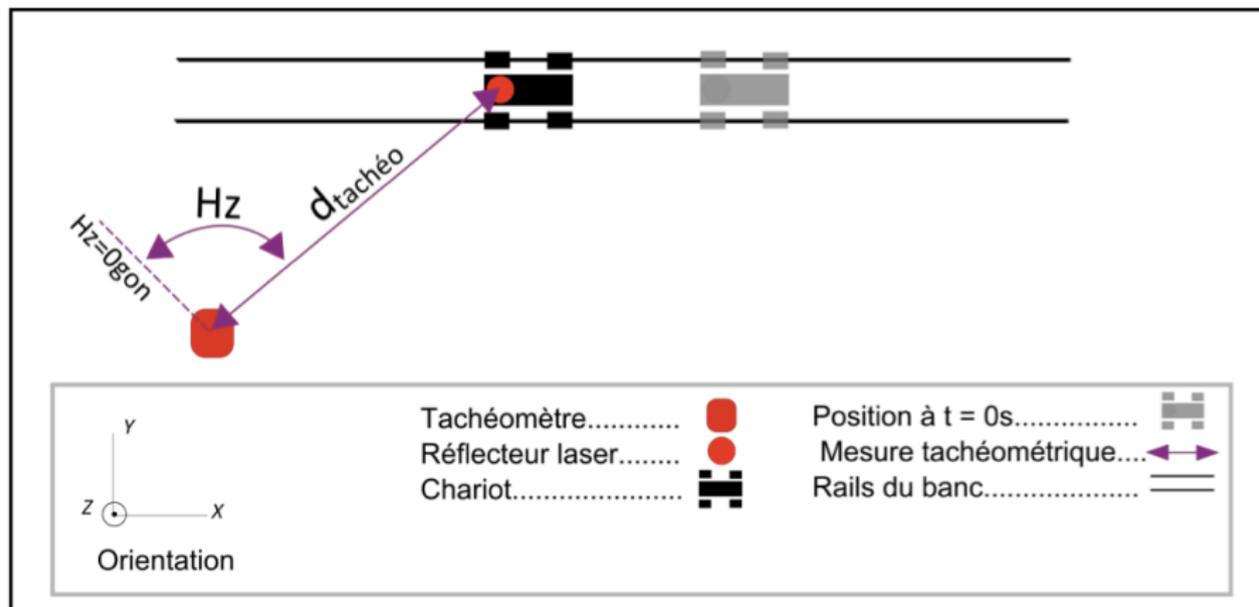
**BOGATIN, Sonja, et al.**, 2008 : *Evaluation of linear Kalman filter processing geodetic kinematic*, Measurements, Vol. 41, 561–578, p. 18.

*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 :  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  ?

- 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.
- $\theta$  : 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  $(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ .

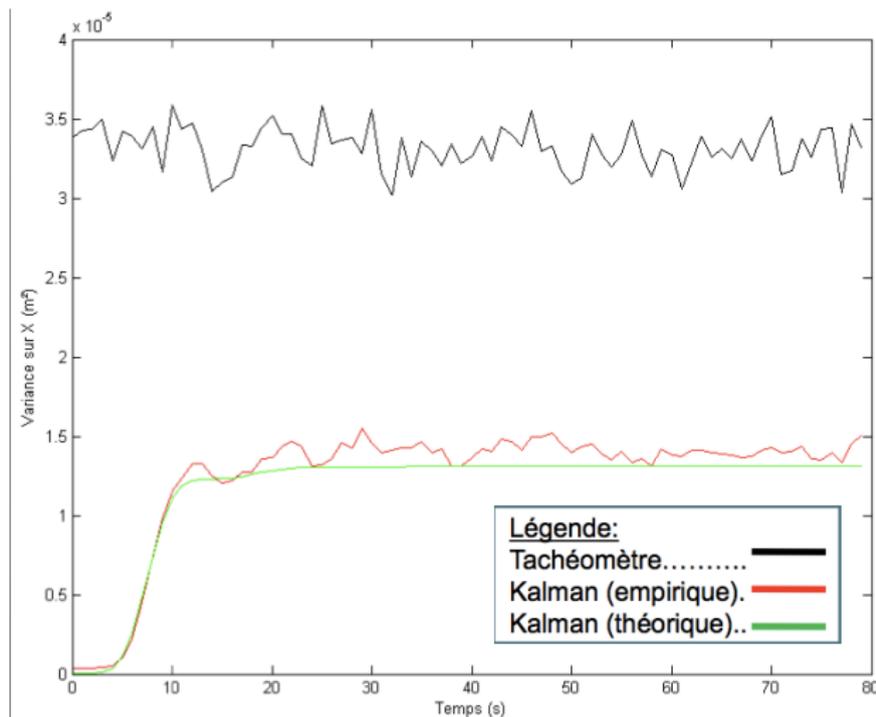
2 cas possibles :

- 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 :

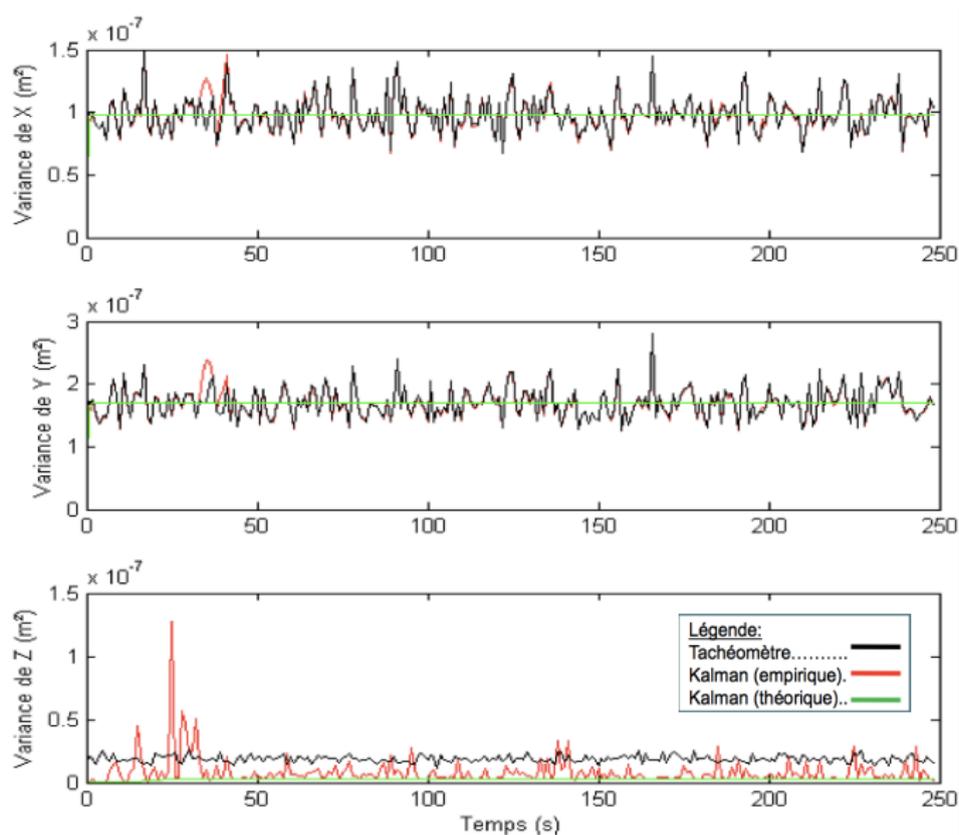
- 1 les mesures sont toutes observables  $\Rightarrow$  fonction-coût = vraisemblance
- 2 au moins une mesure n'est pas observable  $\Rightarrow$  fonction-coût = composition vraisemblance et FDK



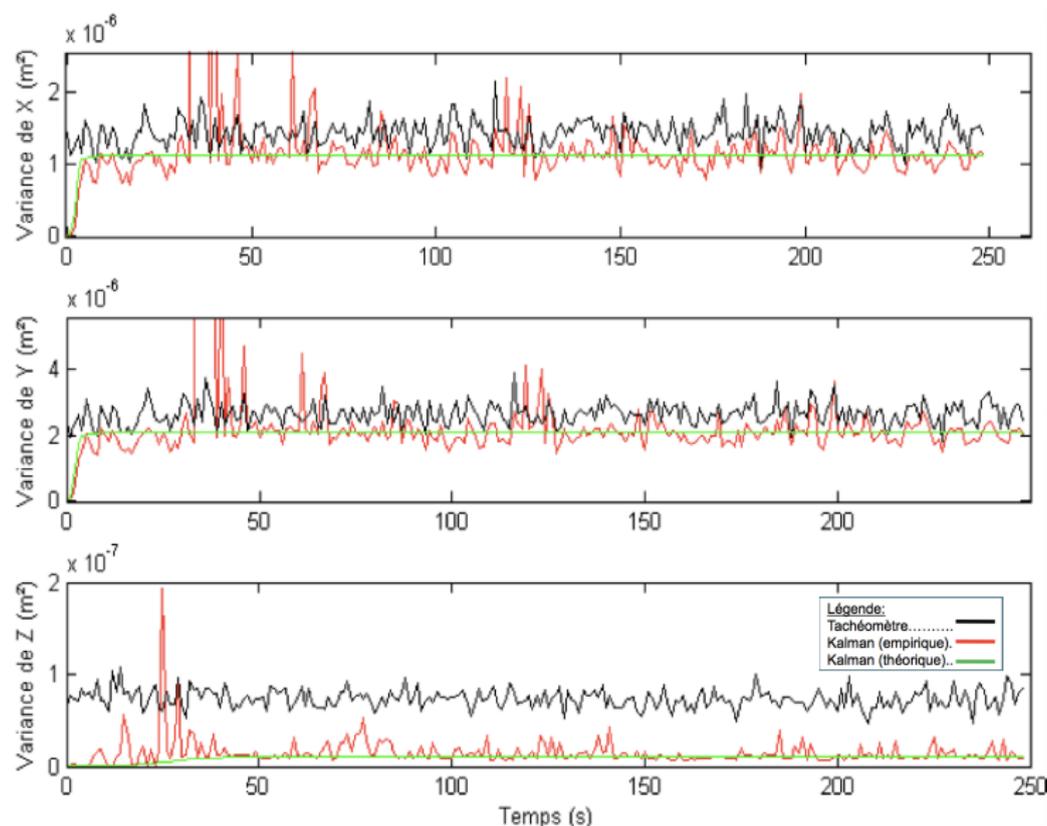
# Paramètres de l'expérience

	Test 1	Test 2	Test 3
$\sigma_{Hz}$	3 dmgon	6 dmgon	3 & 6 dmgon
$\sigma_d$	0.5 mm	2 mm	0.5 & 2 mm
$\sigma_V$	3 dmgon	6 dmgon	3 & 6 dmgon
Instrument	Leica TCRP (Haut de gamme)	Leica ICON robot 50 (Milieu de gamme)	Leica TCRP dégradé localement

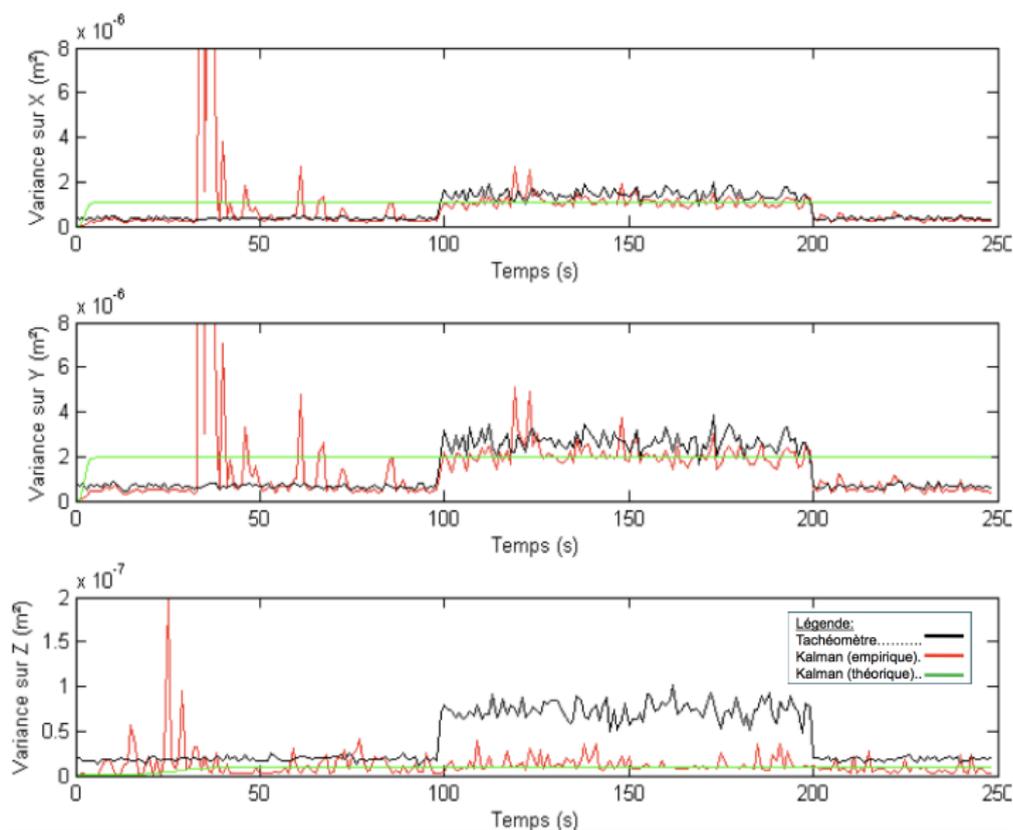
# Résultats expérimentaux



# 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

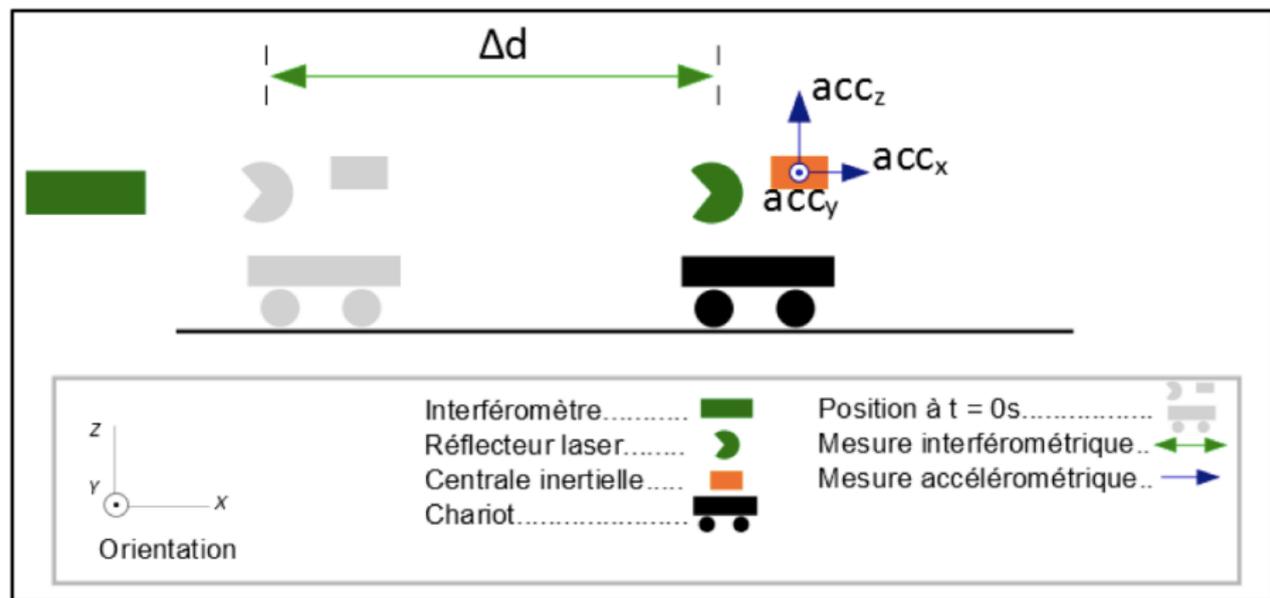
- Développement des systèmes hybrides GNSS/INS miniatures
- Apparition de FDK modifiés pour les bruits corrélés
- Banc d'étalonnage  $\Rightarrow$  trajectoire de référence

$\rightarrow$  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

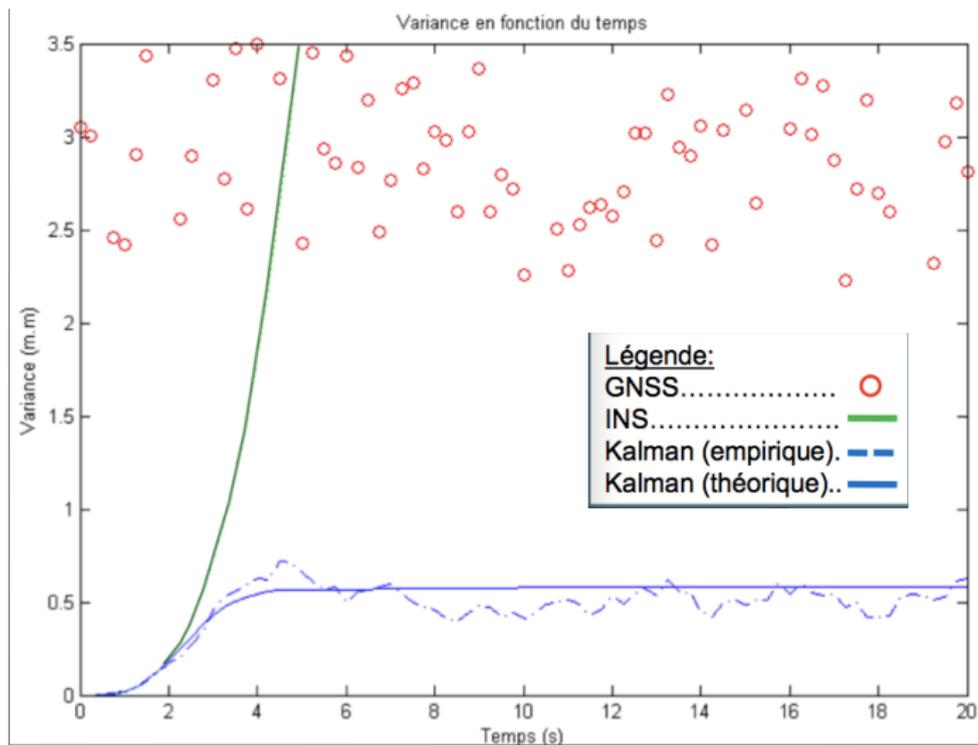
obtenus par EMV.

## Modèle d'évolution

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

obtenus par EMV.

Observations  $\Leftarrow$  Données « constructeur »



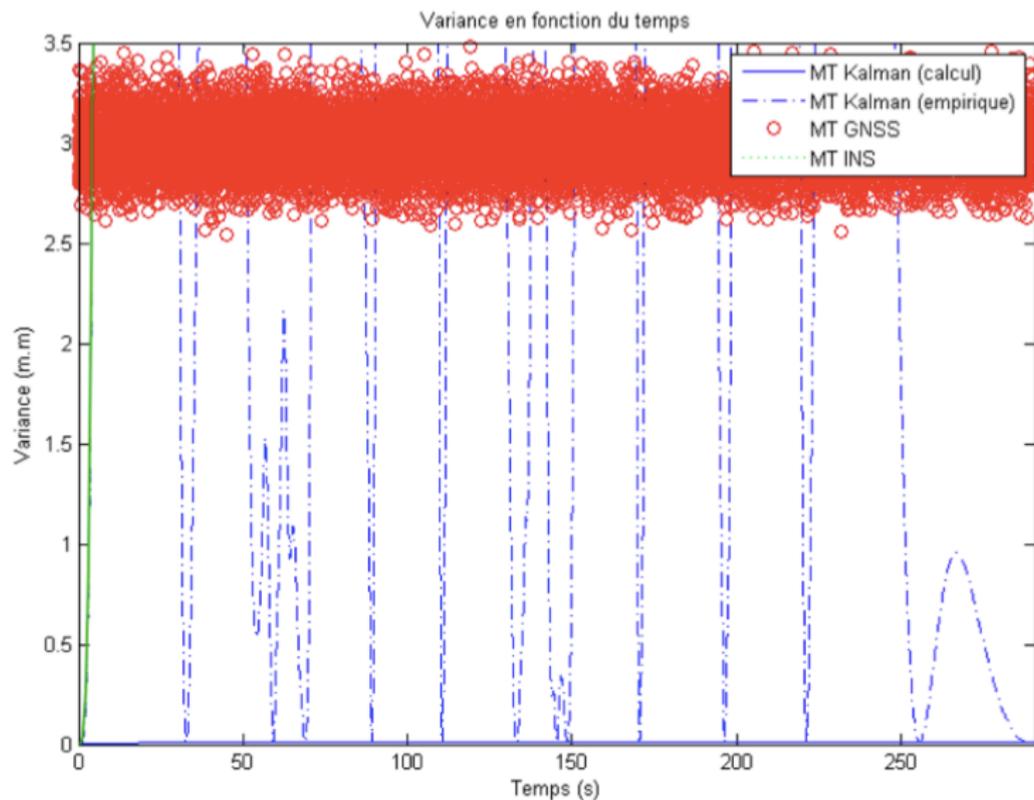
Accélérations fournies par le centrale ; chariot à l'arrêt.

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

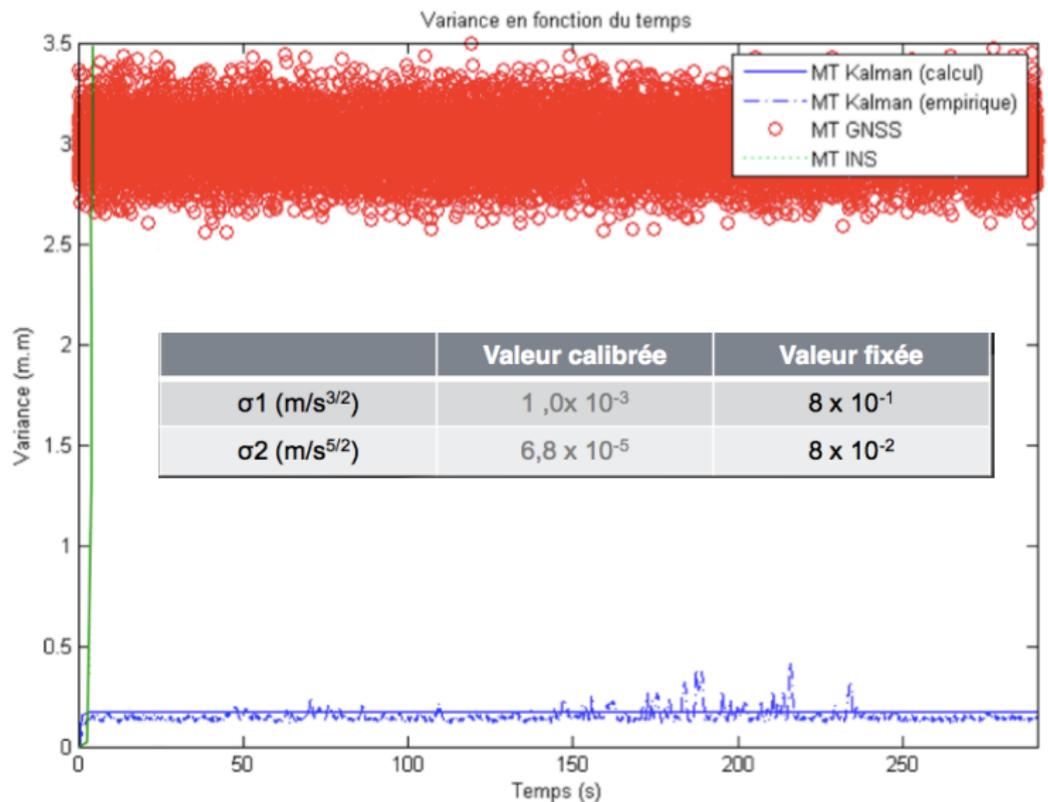
$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} b(t) \\ \dot{b}(t) \\ \vdots \\ b^{(ar-1)}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \cdot & a_{ar-2} & -a_{ar-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix}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

	Valeur calibrée	Valeur fixée
$\sigma_1$ (m/s <sup>3/2</sup> )	1,0x 10 <sup>-3</sup>	
$\sigma_2$ (m/s <sup>5/2</sup> )	6,8 x 10 <sup>-5</sup>	

# 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

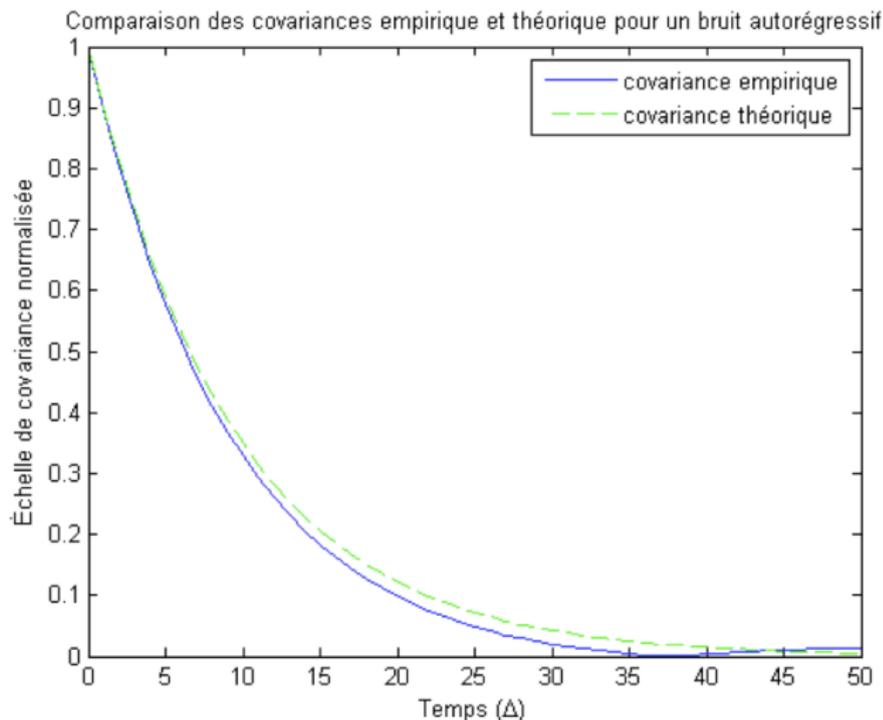
- 1 EMV : permet seulement d'approximer les valeurs des paramètres de bruit.
- 2 Fonctionne correctement  $\implies$  réduction de variance de 1.7 m à 0.7 m.

- 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 :

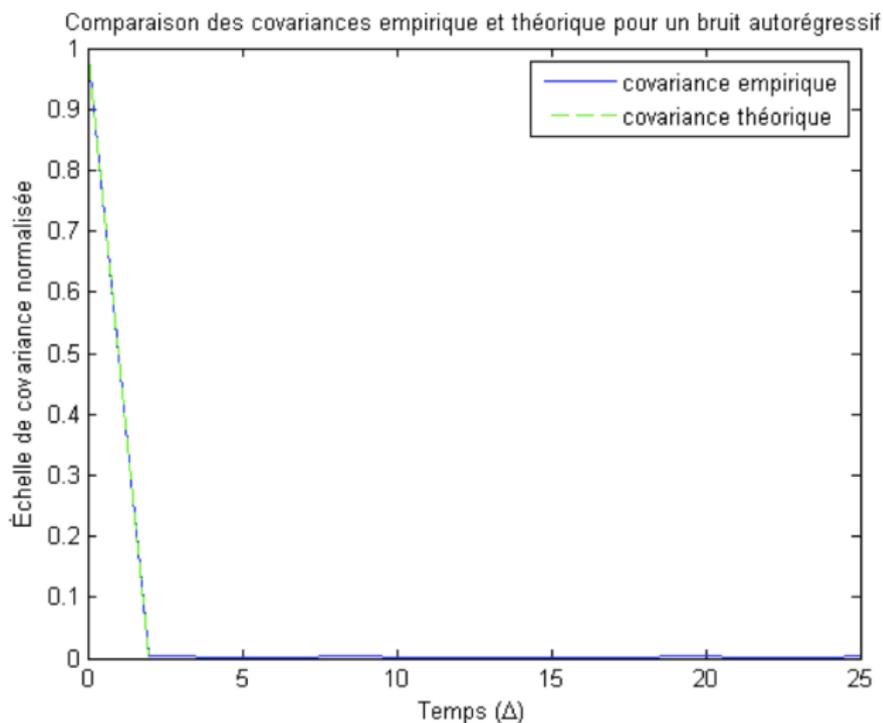
## Structures de covariance possibles :

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



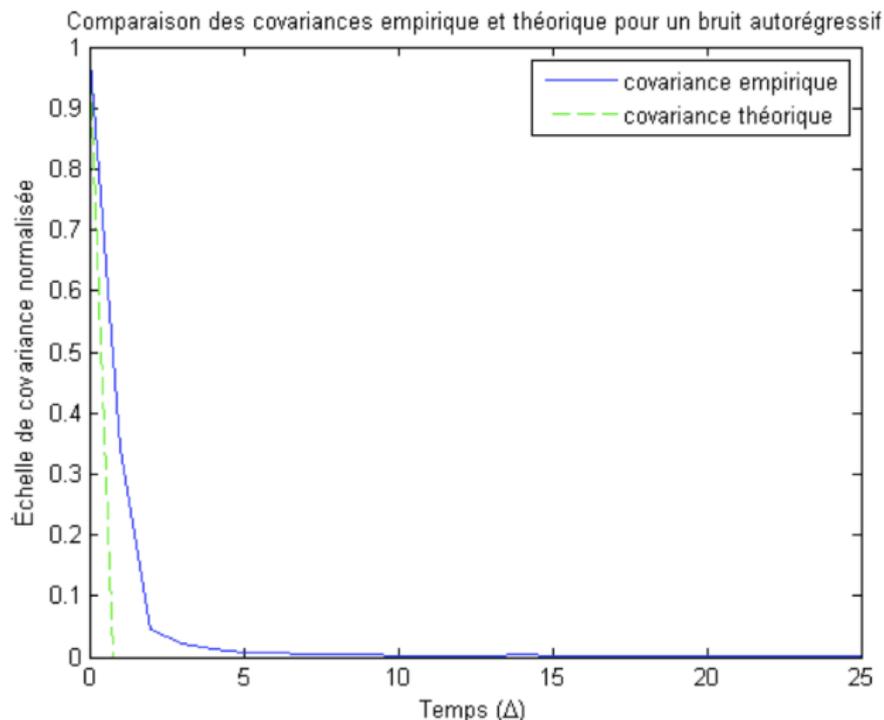
## Structures de covariance possibles :

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



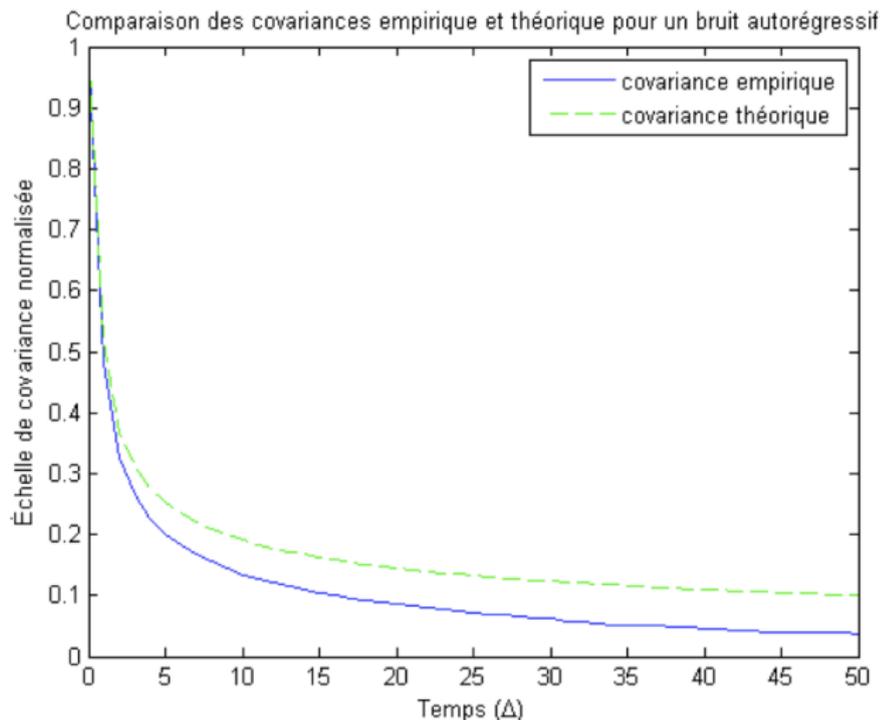
## Structures de covariance possibles :

③ fGn,  $H = 0.2$



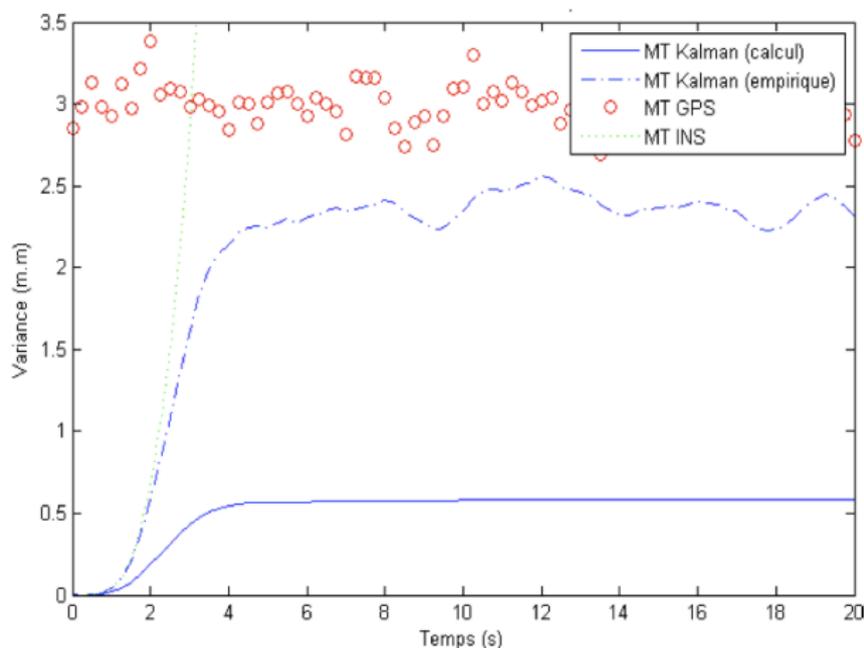
## Structures de covariance possibles :

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*