

Approches Avancées de Navigation par Signaux GNSS en Environnement Urbain utilisant un Modèle 3D

Soutenance de thèse
de **Aude BOURDEAU**

6 Décembre 2013

Encadrants :

- Jean-Yves Tourneret (directeur de thèse)
- Mohamed Sahmoudi (co-encadrant)

Contexte Scientifique

- **Le GPS, technologie grand public.**

Oui ! MAIS... **La recherche est encore nécessaire !**



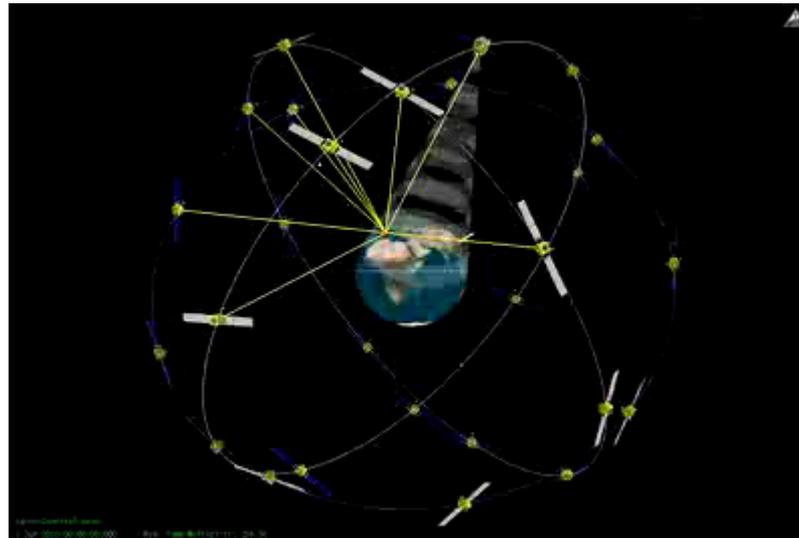
Erreur de position !

Signal perdu !

Contexte Scientifique

- **Le GNSS, qu'est-ce que c'est ?**

GNSS : **G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystem



Constellation GALILEO
Crédit : CNES

Contexte Scientifique

Trilatération

➤ 2D → 3 satellites

➤ 3D → 4 satellites

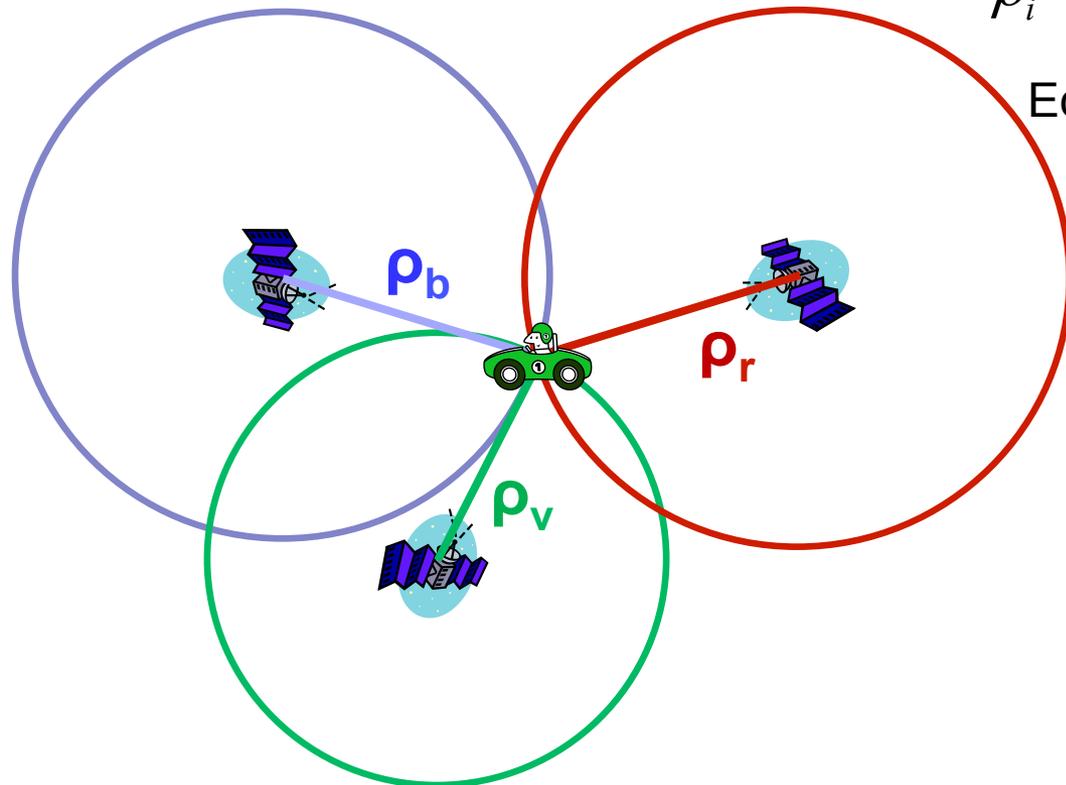
Le récepteur estime ρ à partir du temps de vol
 $\rho' = f(\text{temps de vol}) \rightarrow$ **pseudo**-distance

$$\rho_i = \sqrt{(R_x - S_x^i)^2 + (R_y - S_y^i)^2 + (R_z - S_z^i)^2}$$

Equation géométrique pour la trilatération

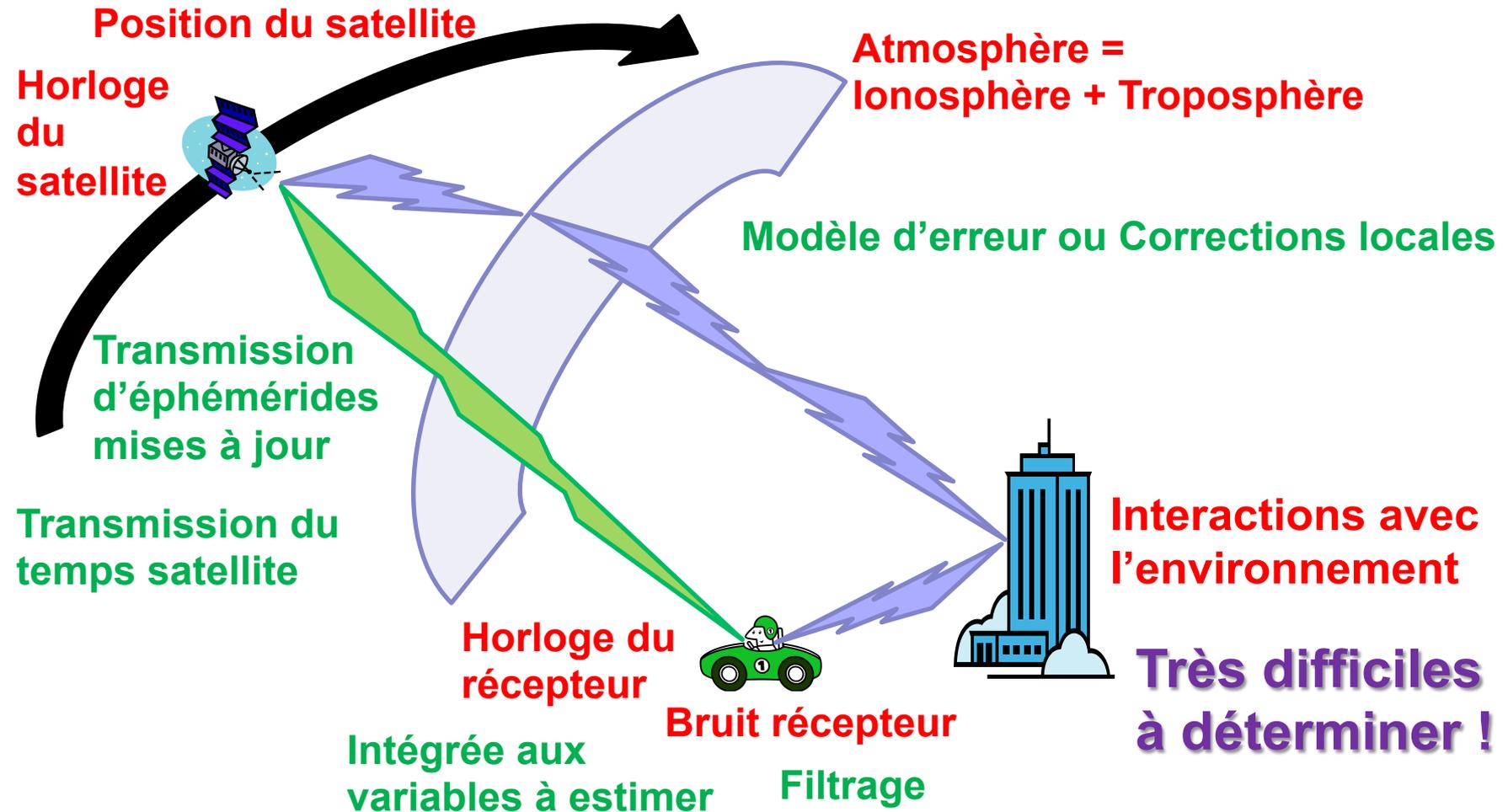
- ❖ Position du récepteur R
- ❖ Position du satellite S
- ❖ Pseudodistance ρ entre R et S

$$\rho'_i = \rho_i + \text{erreurs}$$



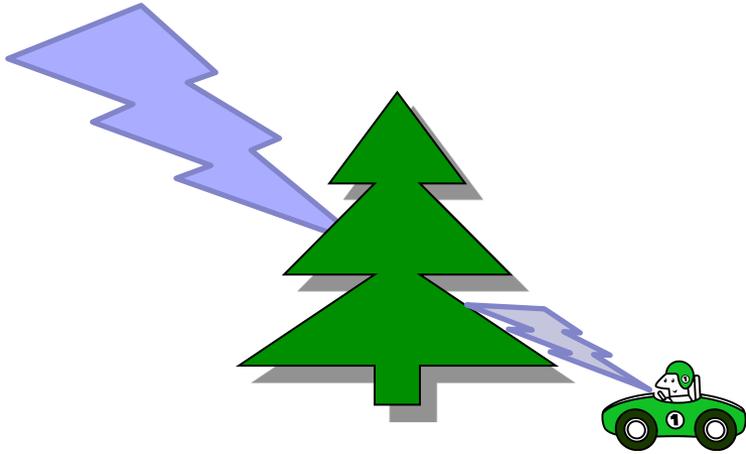
Contexte Scientifique

- Les sources d'erreurs



Contexte Scientifique

- Interactions avec l'environnement



Atténuation

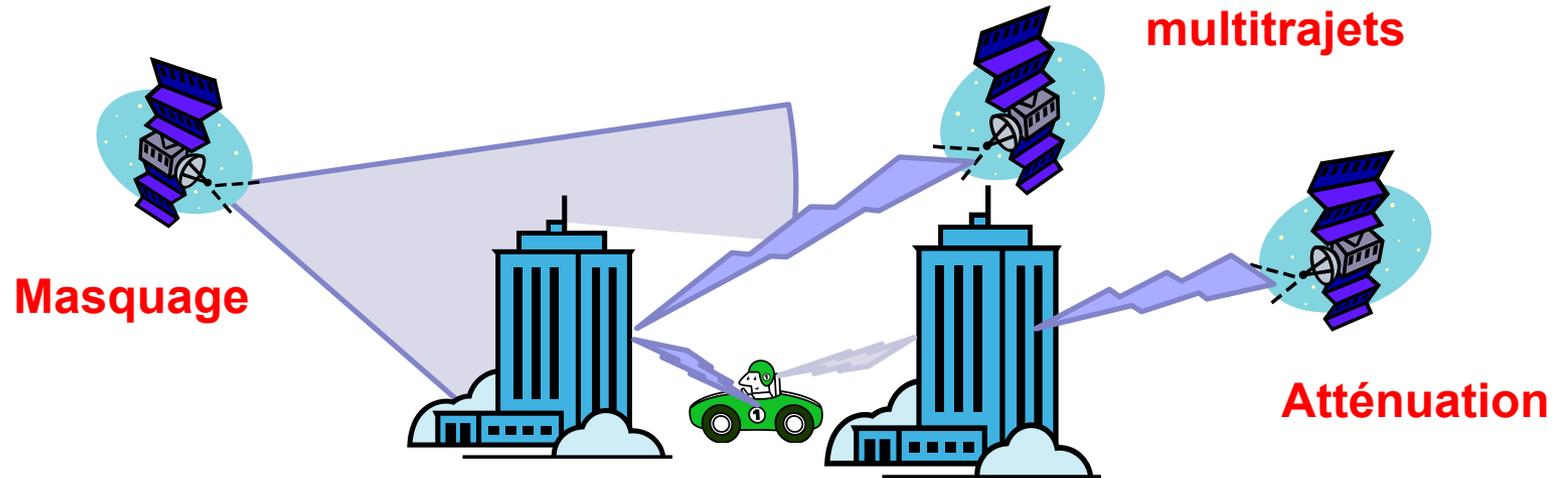


Réflexion
Diffraction
=
Multitrajets

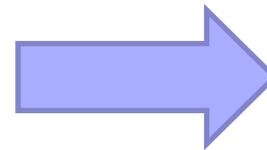


Contexte Scientifique

- Le milieu urbain : accumulateur de problématiques



**Situation dite
« Canyon urbain »**



- Peu de satellites visibles
- Mauvais DOP
- Beaucoup de multitrajets

Problématique

Comment faire quand on reçoit **seulement** ou **principalement** des signaux **multitrajets**?



Exploiter tous les signaux GNSS reçus, **y compris les multitrajets.**



Nécessite de connaître les **caractéristiques** des multitrajets.

Sommaire

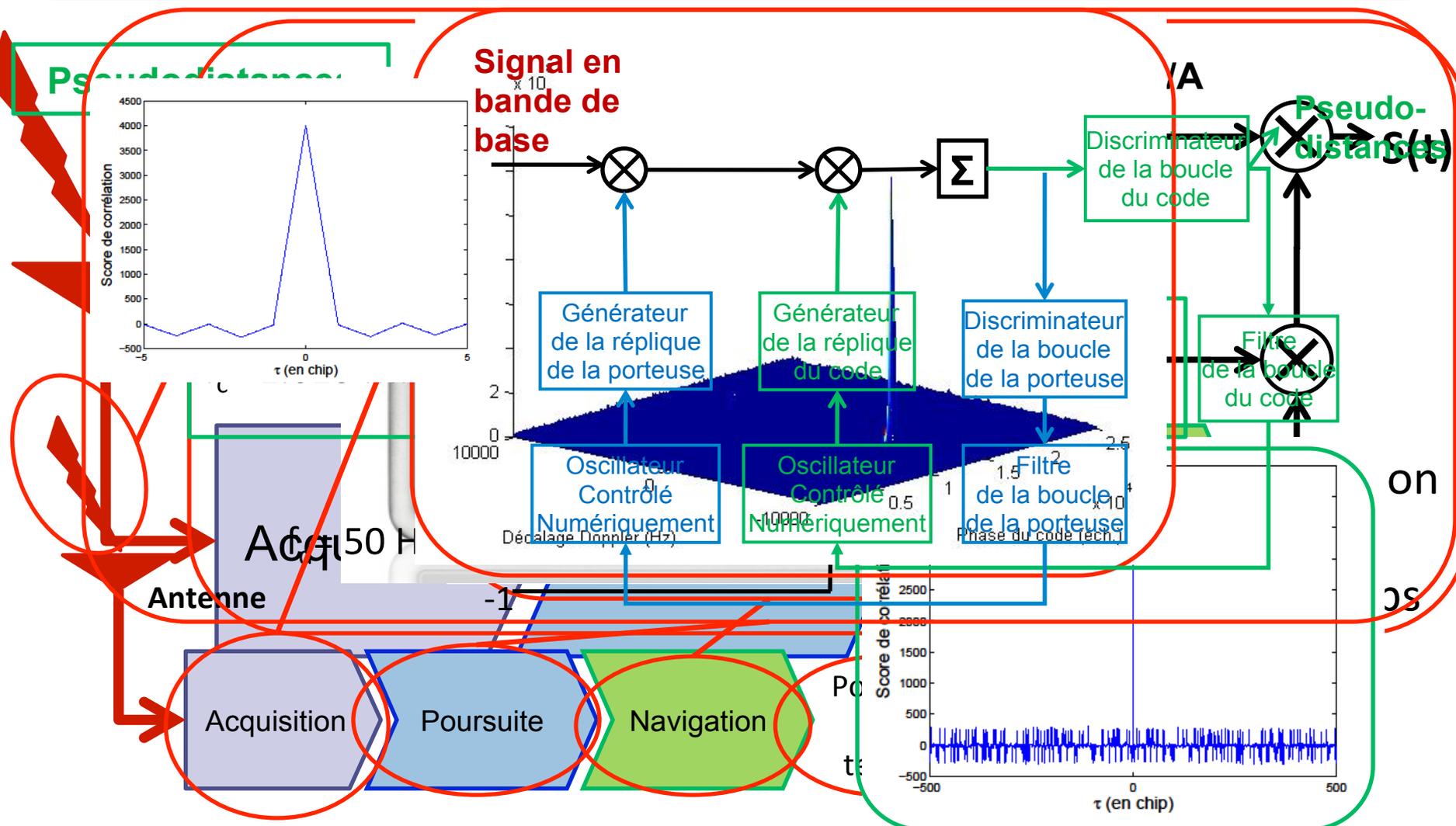
- I/ Positionnement par GNSS : Principes & Problématiques**
- II/ Utilisation constructive des NLOS**
- III/ Modélisation et correction des biais dus aux multitrajets**
- IV/ Méthodes de poursuite vectorielle avancées**

Plan de la partie

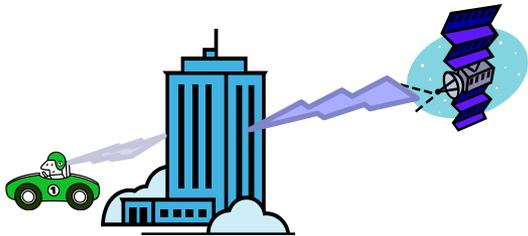
I/ Positionnement par GNSS : Principes & Problématiques

- Le récepteur GPS
- Atténuation
- Masquage
- Multitrajets
- Non Line of Sight (NLOS)
- Canyon Urbain
- Utiliser les multitrajets : comment ?

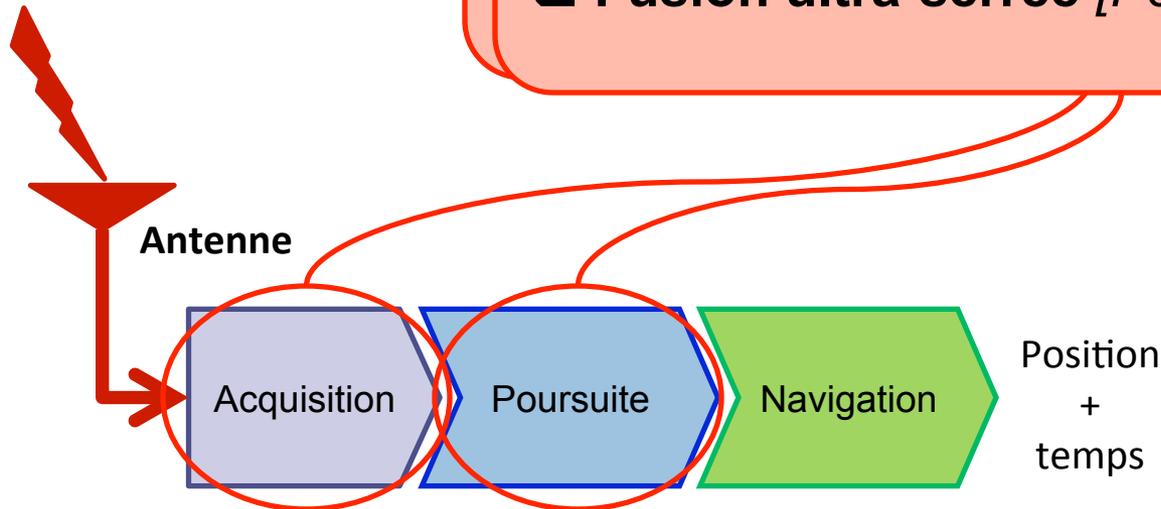
Le récepteur GPS



Atténuation



- ❑ Vector Tracking Loop [Spilker 1996]
- ❑ Fusion ultra-serrée [Petovello 2008]



[Esteves 2012] P. Esteves, M. Sahmoudi, N. Ziedan et M.-L. Boucheret. A New Adaptive Scheme for High-Sensitivity GNSS Acquisition in Presence of Large Doppler Shifts. In Proc. of ION GNSS, pp. 28-40, Nashville, TN, Sep. 2012.
[Spilker 1996] J.J. Spilker. Fundamentals of signal tracking theory. In Global Positioning System: Theory and Applications, Vol. 1, pp. 245-327. AIAA, Inc., 1996.
[Monnerat 2004] M. Monnerat, R. Couy, N. Vincent, O. Huez et F. Chatre. The Assisted GNSS: Technology and Applications. In Proc. of ION GNSS, pp. 2479-2488, Long Beach, CA, Sep. 2004.
[Petovello 2008] M.G. Petovello, C. O'Driscoll et G. Lachapelle. Weak signal carrier tracking using extended coherent integration with an ultra-tight GNSS/IMU receiver. In Proc. of ENC, Toulouse, France, 2008.

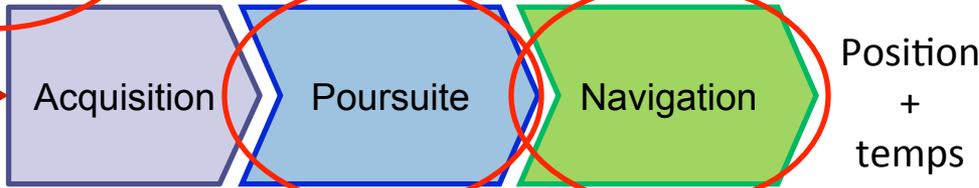
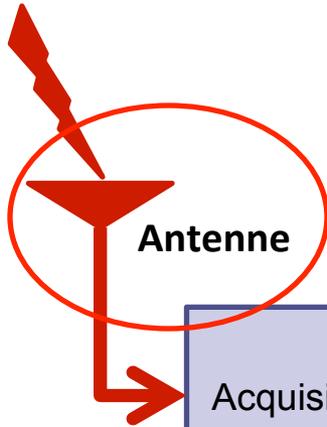
Multitrajets



Map-Matching [Drevelle 2013]

Modélisation du biais sur les pseudodistances [Marais 2013]

Détection des mesures biaisées [Spangenberg 2010]

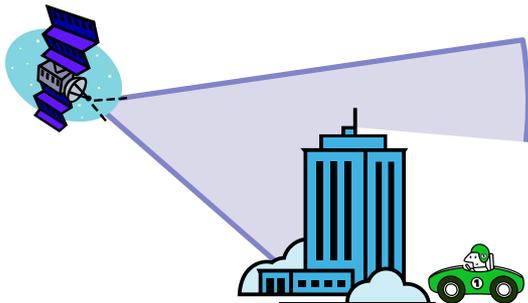


[Drevelle 2013] V. Drevelle et P. Bonnifait. *Reliable Positioning Domain Computation for Urban Navigation*. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 5, no. 2, pp. 29-39, 2013. Proc. of IEEE International Symposium on Location-Based Services, The Multi-Base Localization Delay Lock Loop, pp. 306-310, 2013. Proc. of IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Yokohama, Japan, Nov. 1992, pp. 39-42.

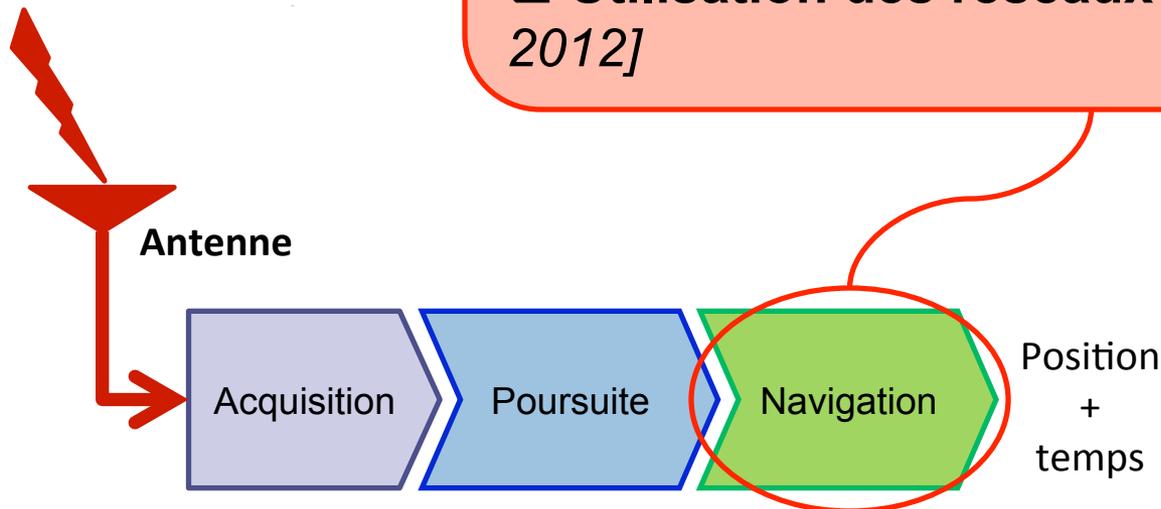
[Marais 2013] J. Marais, D. F. Nahimana, N. Viandier et F. Duos. *GNSS accuracy enhancement based on pseudo range error detection*. In: *Navigation, Positioning and Timing (NPT) for the 21st Century*, pp. 505-515, 2013. IEEE Aerospace Conf., vol. 8, pp. 1-6, 2010.

[Spangenberg 2010] W. Spangenberg. *Detection of Variance Changes and Mean Value Measurement Noise for Multipath Mitigation in Urban Navigation*. NAVIGATION, J. Inst. of Nav., vol. 57, no. 1, pp. 35-52, 2010.

Masquage



- Fusion avec capteurs proprioceptifs (INS/odomètres) [Groves 2013]
- Utilisation des réseaux sans fils [Bullock 2012]



[Groves 2013] P.D. Groves. *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*. Artech House, 2013.

[Bullock 2012] J.B. Bullock, M. Chowdhary, D. Rubin, D. Leimer, G. Turetzki et M. Jarvis. *Continuous Indoor Positioning Using GNSS, Wi-Fi, and MEMS Dead Reckoning*. In Proc. of ION GNSS, pp. 2408-2416, Sep. 2012.

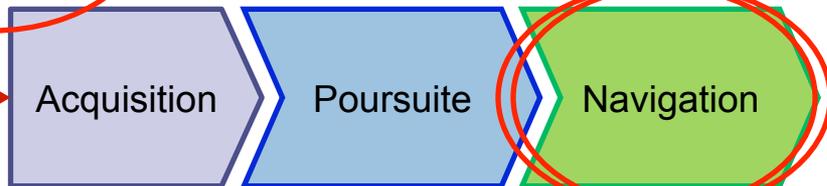
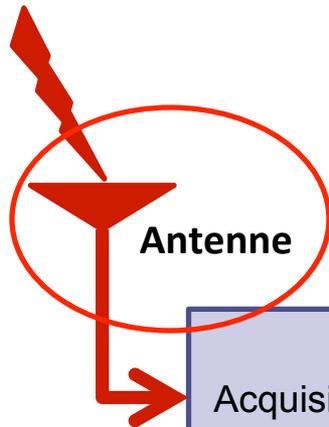
Non Line Of Sight (NLOS)



Estimation des paramètres d'un modèle géométrique [Gustafson 2006]

Mesures laser [Soloviev 2009]

RAIM [Pesonen 2011]



Position
+
temps

[Jiang 2012] Z. Jiang et P.D. Groves. *NLOS GPS signal detection using a dual-polarisation antenna*. GPS Solutions, pp. 1-12, 2012.
 [Gustafson 2006] D.E. Gustafson, J.M. Elwell et J.A. Soltz. *Innovative indoor geolocation using RF multipath diversity*. In Proc. of IEEEION PLANS, pp. 904-912, San Diego, CA, Apr. 2006.
 [Pesonen 2011] R. Pesonen et al. *About Non Line Of Sight Satellite Detection and Exclusion in a 3D Map-Aided Localization Algorithm*. Sensors, vol. 13, no. 1, pp. 829-847, 2013.
 [Soloviev 2009] A. Soloviev et E. Van Graas. *Use of deeply integrated GPS/INS architecture and laser scanners for the identification of multipath reflections in urban environments*. IEEE J. Sel. Top. Signal Proc. vol. 3, no. 5, pages 786-797, Oct. 2009.
 [Pesonen 2011] R. Pesonen. *A Framework for Bayesian Receiver Autonomous Integrity Monitoring in Urban Navigation*. NAVIGATION, Journal of The Institute of Navigation, vol. 58, no. 3, pp. 229-240, 2011.

Canyon Urbain



➤ Très peu de signaux visibles

↳ Il faut garder les signaux biaisés

➤ Beaucoup de NLOS parmi les signaux visibles

↳ Il faut estimer leur biais pour les utiliser

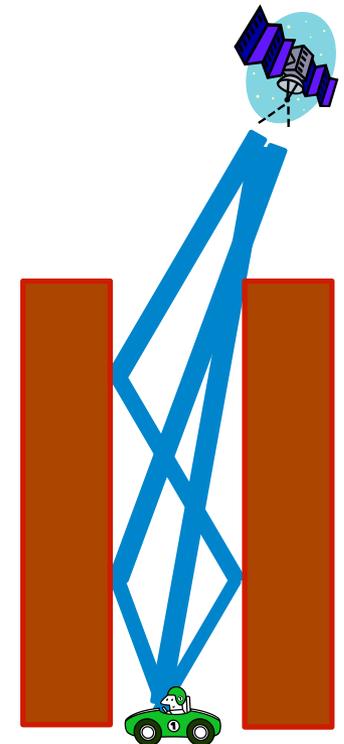
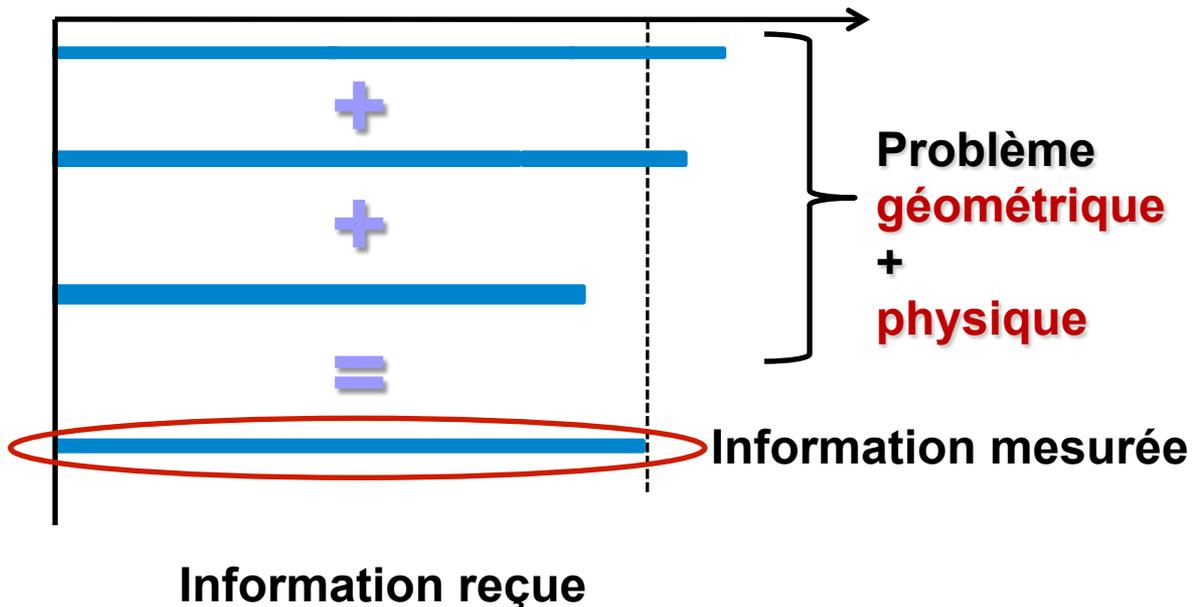


Utiliser les multitrajets

Oui, mais comment ?

Utiliser les multitrajets : comment ?

- Problématique pour l'utilisation des multitrajets



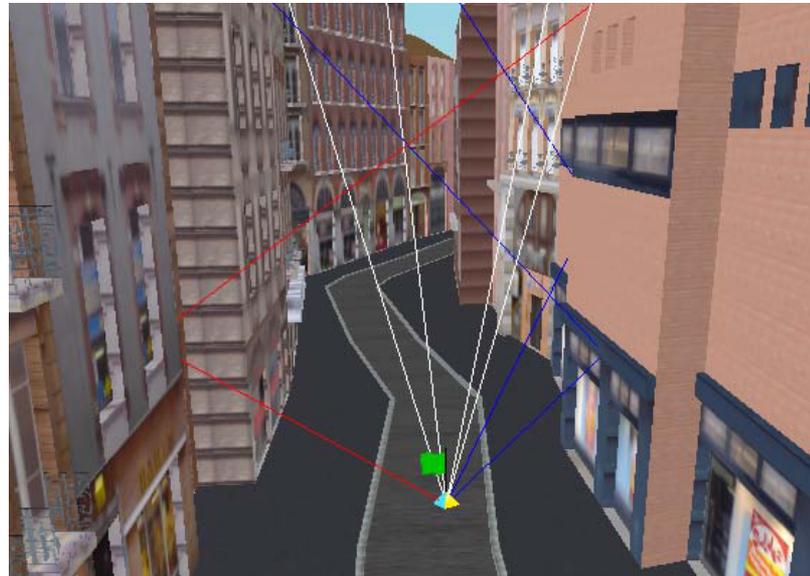
Réalité

Utiliser les multitrajets : comment ?

- Modéliser les trajectoires et les puissances des signaux reçus

↳ Utilisation d'un **modèle 3D** de ville

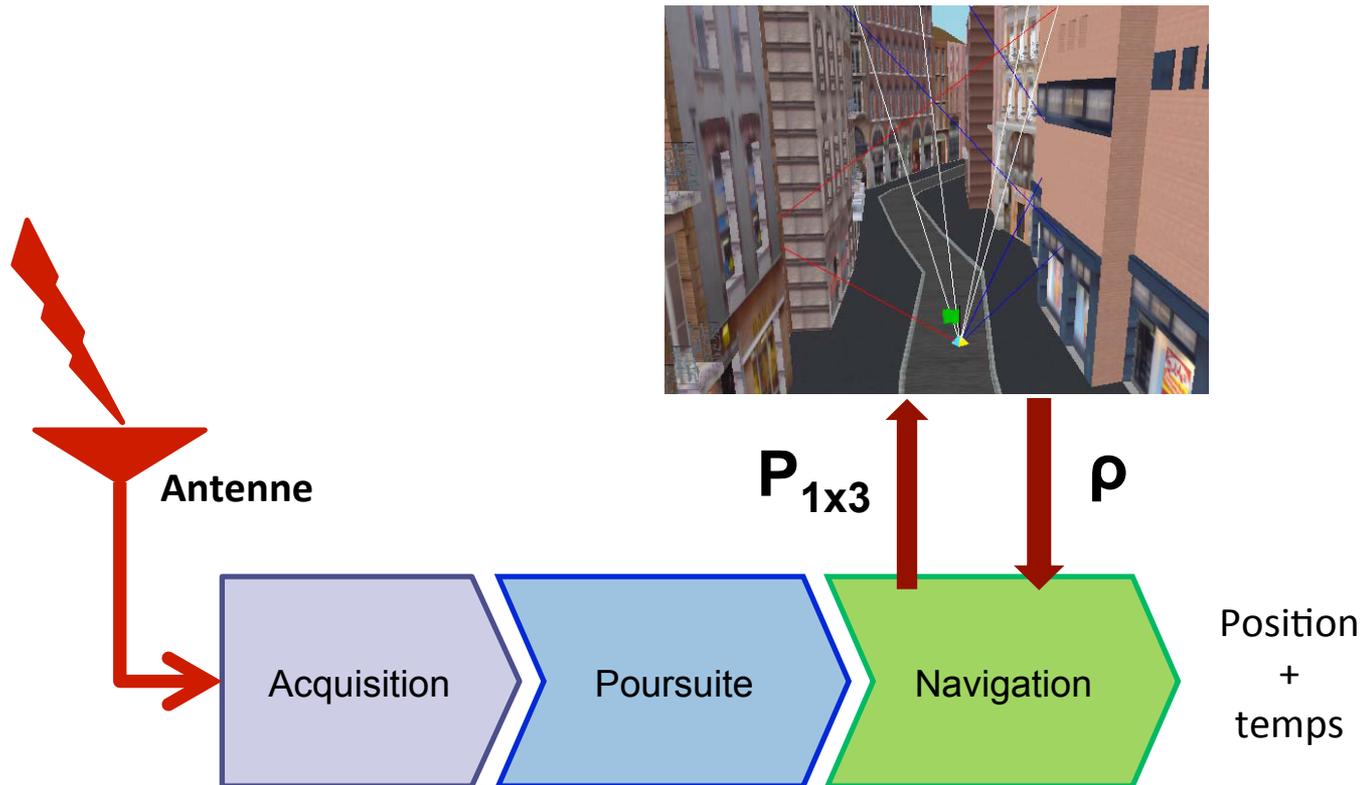
- **Trajectoire** : ray-tracing
- **Puissance** : bilan des interactions



Simulation SE-NAV en centre-ville de Toulouse.
OKTAL-SE

Utiliser les multitrajets : comment ?

- Intégrer les informations 3D à la navigation



Plan de la partie

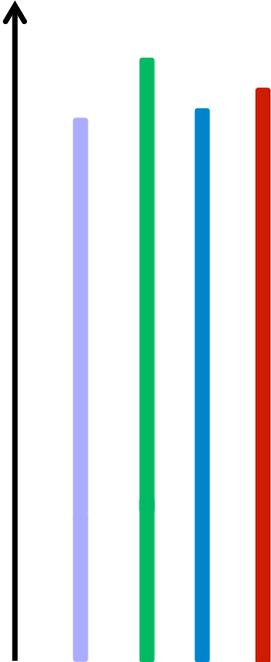
II/ Utilisation constructive des NLOS

- La problématique des NLOS
- Filtre de navigation
- Intégration du modèle 3D
- Robustification de l'EKF
- Modèles 3D
- Résultats

La problématique des NLOS

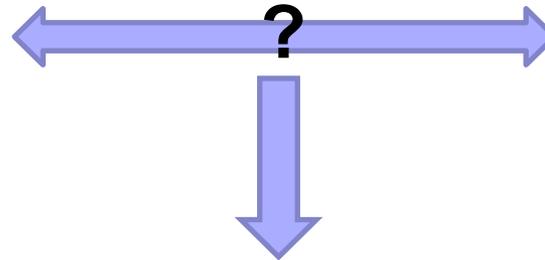
■ Comment utiliser les NLOS ?

Pseudodistance mesurée (m)

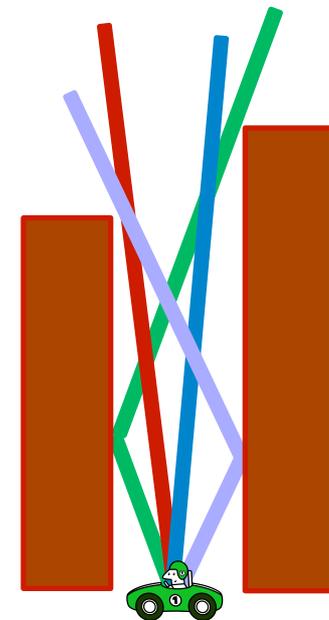


Information reçue

Problématique **géométrique**



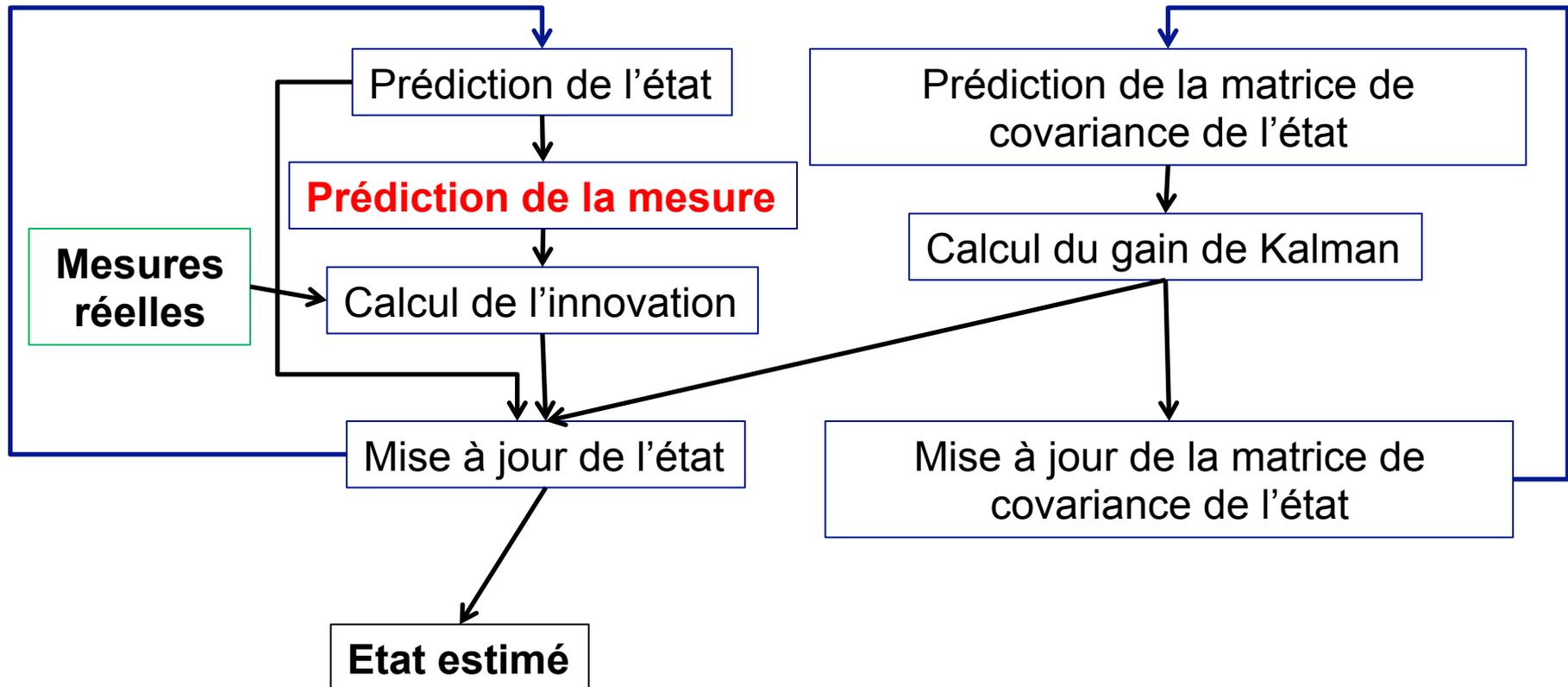
L'**environnement** doit être connu.



Réalité

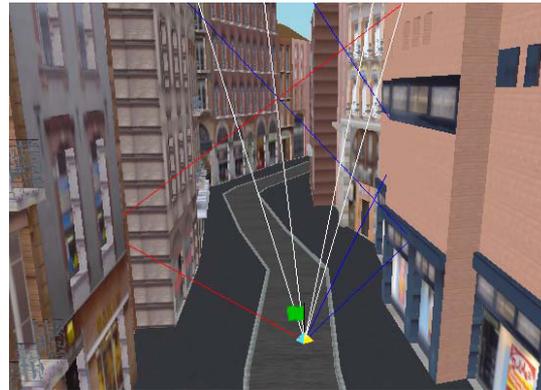
Filtre de navigation

■ Filtre de Kalman Etendu (EKF)



Intégration du modèle 3D

Carte 3D (plans)



- **Signal reçu le plus puissant** pour chaque satellite

- **Parcours géométrique** de chaque signal reçu

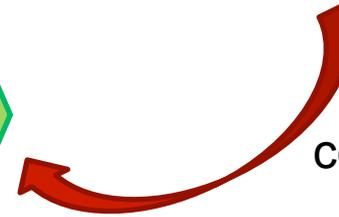
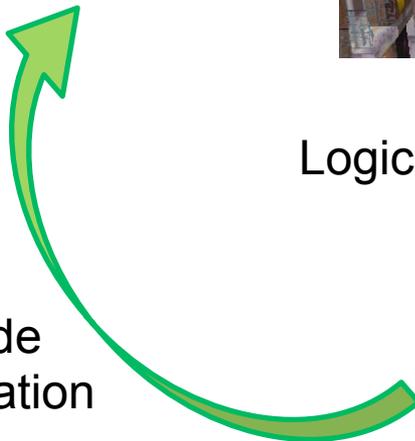
- **Plan(s) de réflexion** pour chacun des NLOS

- Position récepteur
- Positions satellites



Logiciel SE-NAV, OKTAL-SE.

Protocole de communication



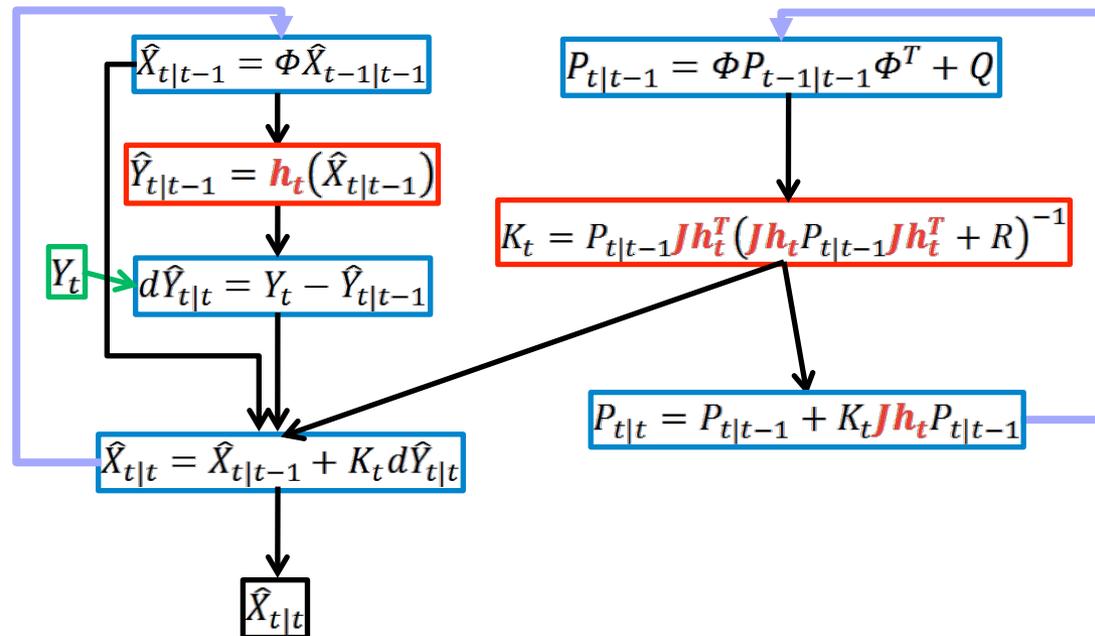
Protocole de communication

Intégration du modèle 3D

■ Fusion modèle 3D / EKF

Etat prédit envoyé au modèle 3D

Prédiction des points de réflexion pour les NLOS



Les points de réflexions dépendent de $\hat{X}_{t|t}$ \Rightarrow A dériver pour obtenir Jh_t

Nécessité d'établir h_t



Intégration du modèle 3D

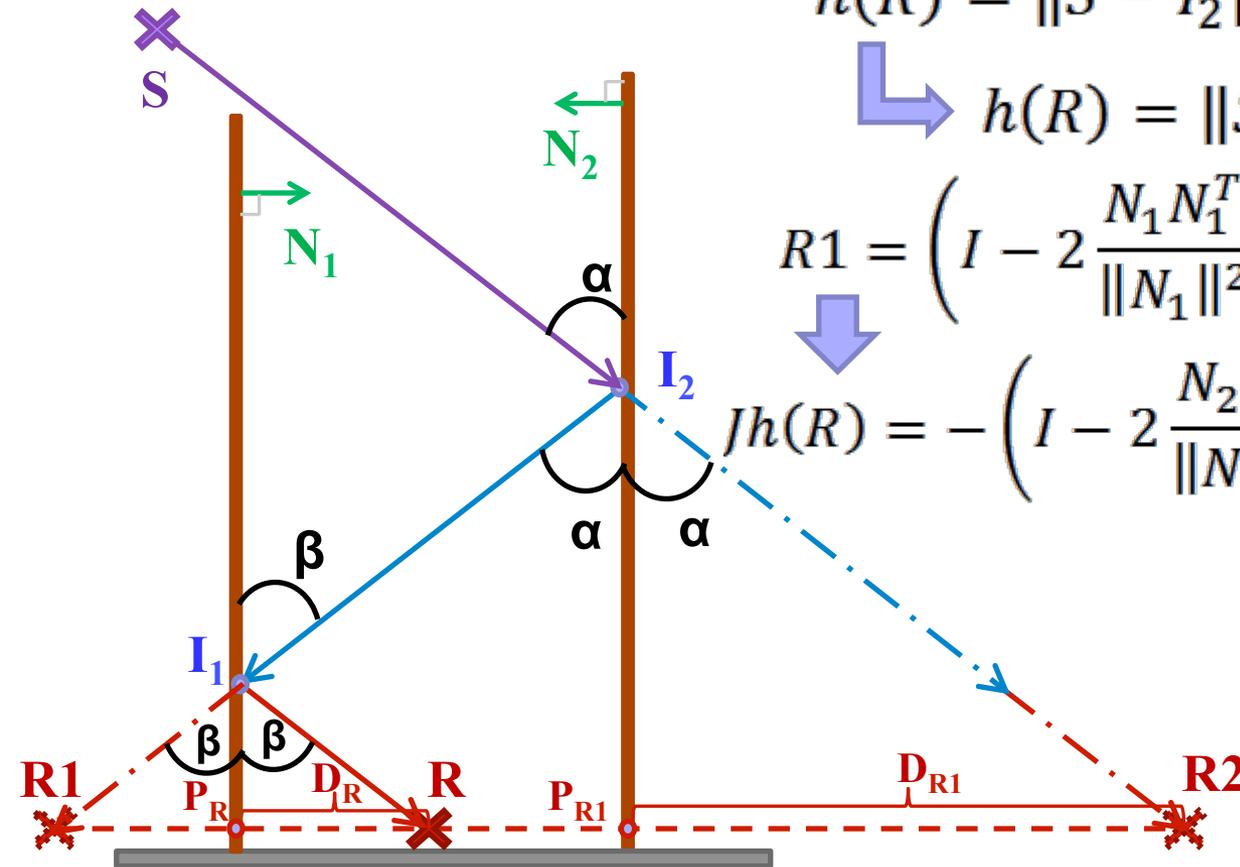
- Calcul de la Jacobienne du modèle de mesure

$$h(R) = \|S - I_2\| + \|I_2 - I_1\| + \|I_1 - R\|$$

$$\hookrightarrow h(R) = \|S - R_2\|$$

$$R1 = \left(I - 2 \frac{N_1 N_1^T}{\|N_1\|^2} \right) R - 2 \frac{d_1 N_1}{\|N_1\|^2}$$

$$Jh(R) = - \left(I - 2 \frac{N_2 N_2^T}{\|N_2\|^2} \right) \left(I - 2 \frac{N_1 N_1^T}{\|N_1\|^2} \right) \frac{S - R_2}{h(R)}$$



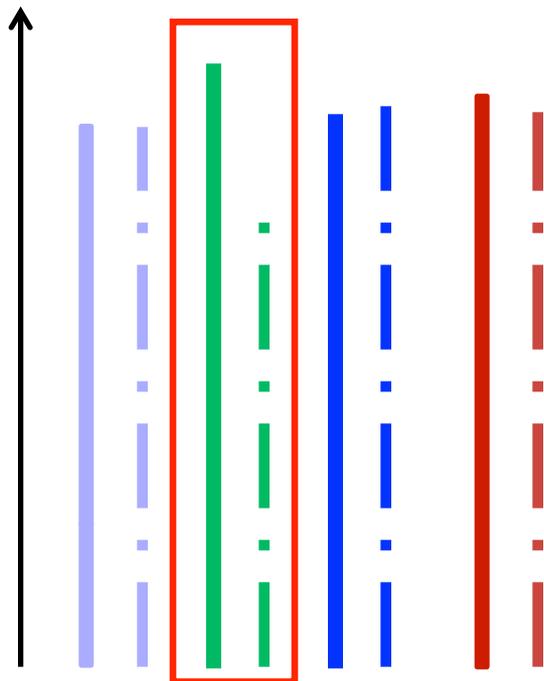
Robustification de l'EKF

➤ Test innovation LOS/NLOS



Configuration la plus probable

Mauvaise prédiction du biais



➤ Atténuation des innovations trop grandes

$$\begin{cases} d\hat{Y}'_{t|t} = D(Y_t - \hat{Y}_{t|t-1}) \\ S'(i, i) = \frac{S(i, i)}{D(i)^2} \end{cases}$$

Matrice diagonale de pondération :

$$D(d\hat{Y}) = \begin{cases} 1 & \text{if } |d\hat{Y}| < a \\ a/|d\hat{Y}| & \text{if } a \leq |d\hat{Y}| < c \\ (a/c)\exp\left(1 - d\hat{Y}^2/c^2\right) & \text{if } |d\hat{Y}| \geq c \end{cases}$$

K. D. Rao, M. N. S. Swamy, and E. I. Plotkin, *GPS navigation with increased immunity to modeling errors*, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 40, no. 1, pp. 2–11, Jan. 2004

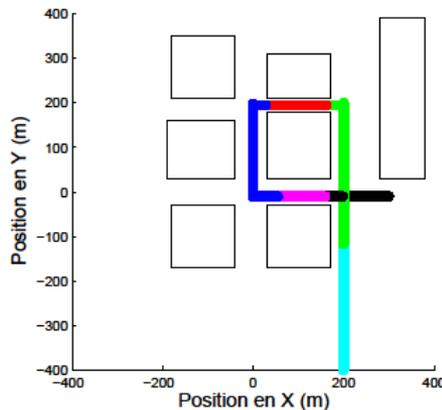
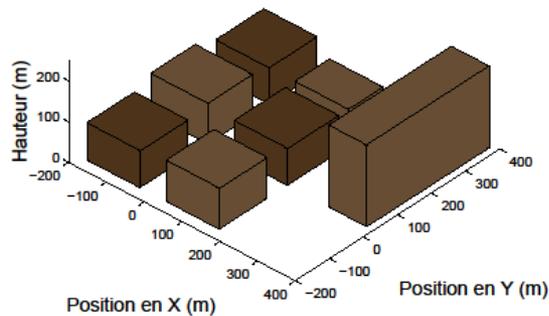
— : Y_t mesure réelle

- - - : $\hat{Y}_{t|t-1}$ mesure prédite

Modèles 3D

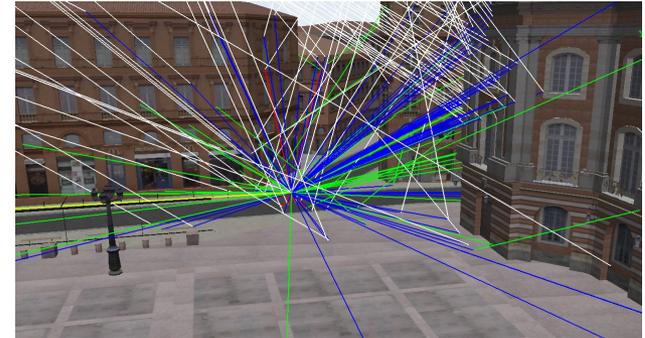
Simulations simples en 3D

- 9 sources fixes
- 1 réflexion maximum autorisée



Simulations réalistes avec SE-NAV

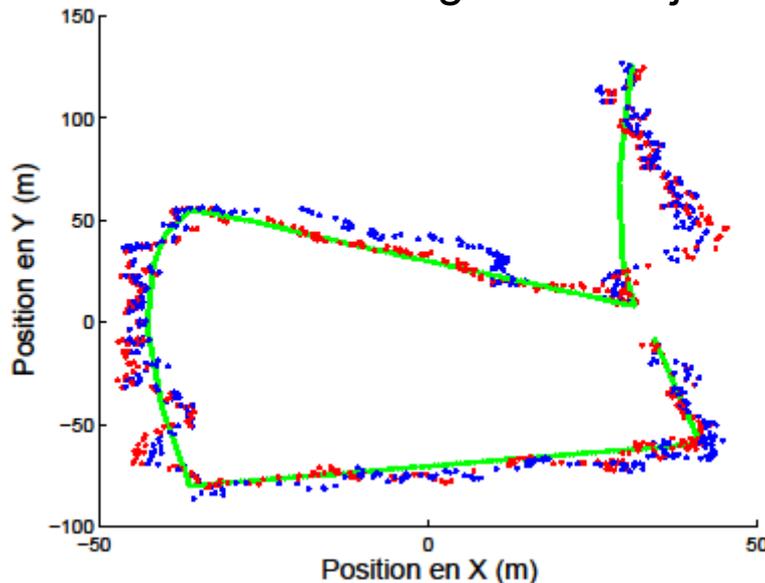
- Ephémérides réelles
- Plusieurs réflexions autorisées



Résultats

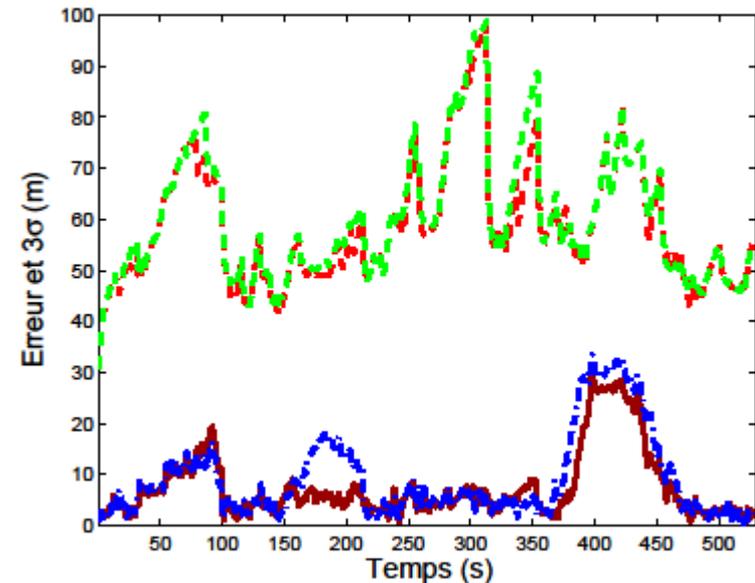
■ Simulations réalistes avec SE-NAV

Modèle d'évolution en marche aléatoire
Bruit blanc gaussien ajouté sur les mesures : $\sigma=3\text{m}$



Trajectoires estimées

(Vert : référence;
Bleu : EKF simple;
Rouge : EKF 3D)



Erreurs en position

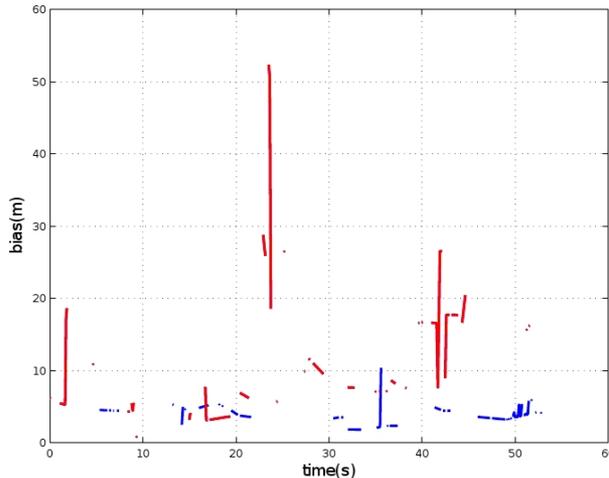
(Bleu : EKF simple; Rouge sombre : EKF 3D)

Borne d'incertitude à 3σ

(Vert : EKF simple; Rouge clair : EKF 3D) **28**

Résultats

■ Contraintes des simulations



Biais sur les signaux reçus
durant la trajectoire (Bleu :
satellite 4 ; Rouge : satellite 17)

❖ Seulement les signaux réfléchis

↳ Très haute variabilité

❖ Pas de canyon urbain dans la carte 3D
disponible

↳ Très peu propice aux NLOS

➤ Utiliser des **données réelles**.

➤ Travailler sur **tous les multitrajets** présents
dans l'environnement disponible.

Plan de la partie

III/ Modélisation et correction des biais dus aux multitrajets

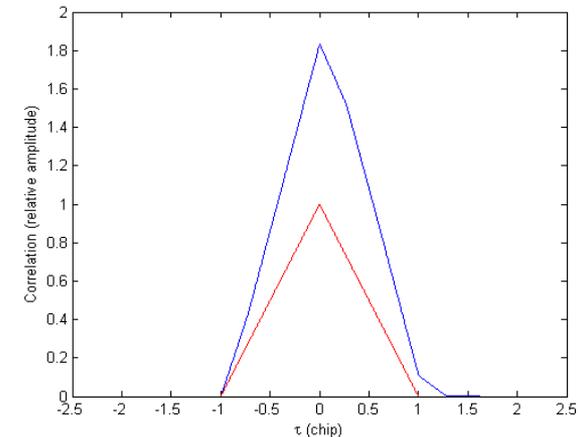
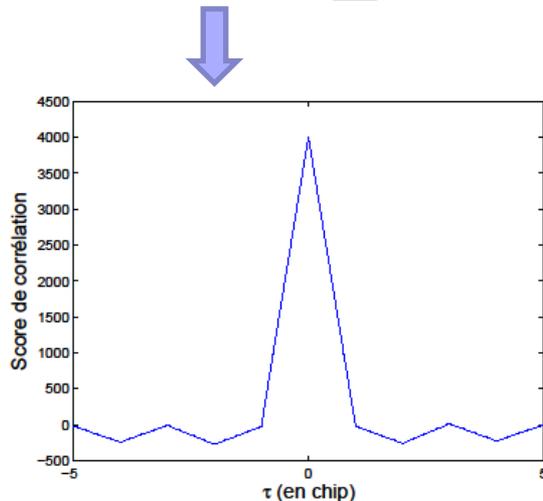
- Mesure des pseudodistances
- Modéliser les signaux reçus
- Mesures réelles
- Validation de l'estimation des biais
- Navigation en présence de multitrajets
- Campagne de mesure
- Résultats

Modéliser les signaux reçus

- Reconstruction du biais dus aux multitrajets dans la mesure de pseudodistance

$$\rho_m = \rho_{strong} + b_{MP} + n$$

$$C(\tau) = R(\tau) + \sum_{i=1}^m \alpha_i R(\tau - \delta\tau_i)$$



Fonction de corrélation du signal GPS L1 C/A **non bruitée (en rouge)**, et sa version **déformée par les multitrajets (en bleu)**.

Modéliser les signaux reçus

- Reconstruction du biais dus aux multitrajets dans la mesure de pseudodistance

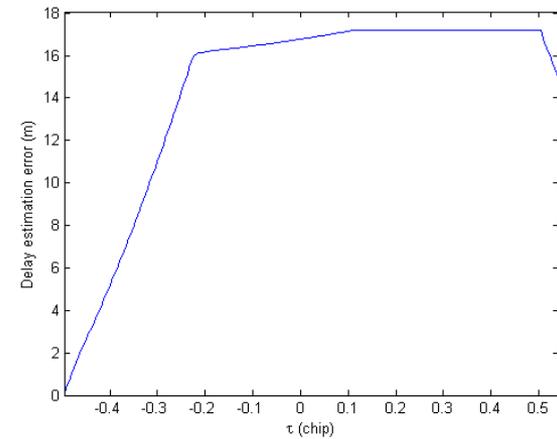
$$\rho_m = \rho_{strong} + b_{MP} + n$$

$$C(\tau) = R(\tau) + \sum_{i=1}^m \alpha_i R(\tau - \delta\tau_i)$$

$$D(\tau) = \frac{1}{2} \frac{\|C(\tau - d\tau)\| - \|C(\tau + d\tau)\|}{\|C(\tau - d\tau)\| + \|C(\tau + d\tau)\|}$$

$$f(\tau) = D(\tau) - \tau$$

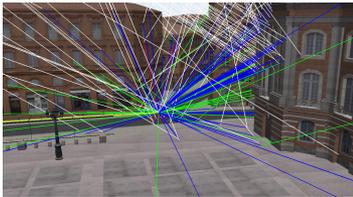
(valable autour du pic de corrélation)



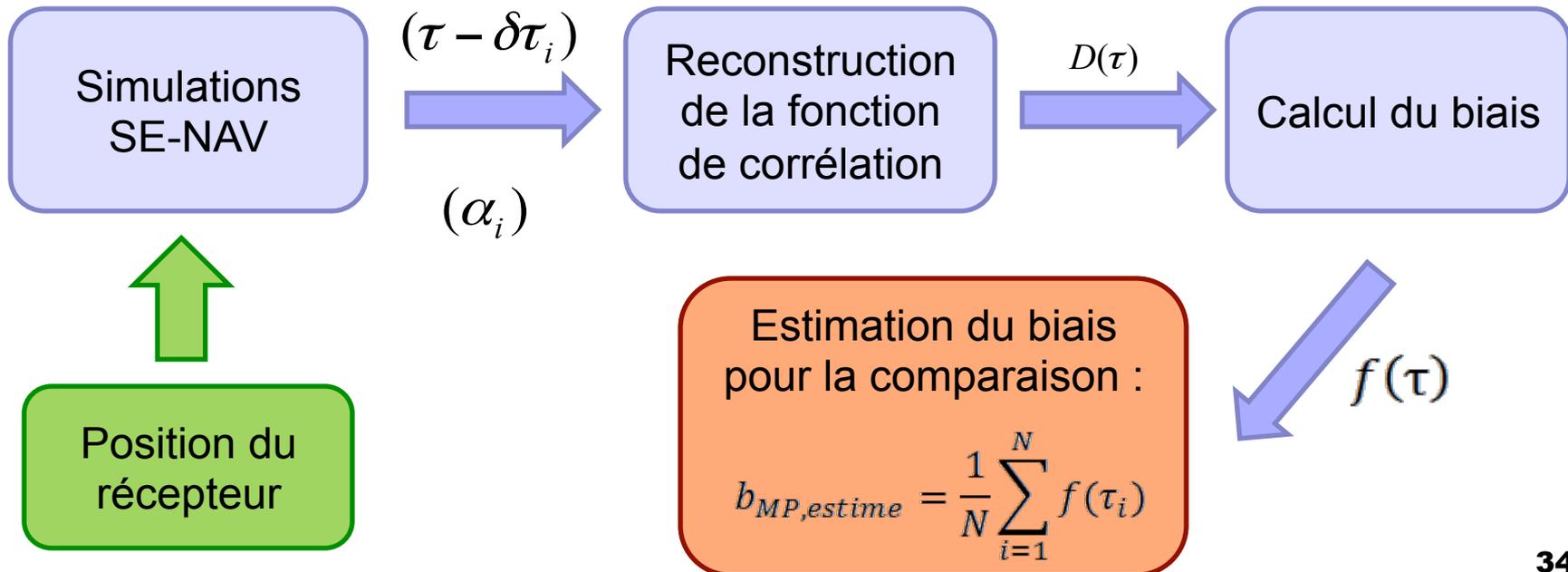
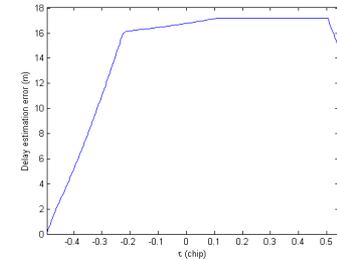
Sortie du discriminateur : Erreur sur l'estimation du retard due aux multitrajets.

Modéliser les signaux reçus

■ Estimation du biais à partir des informations 3D

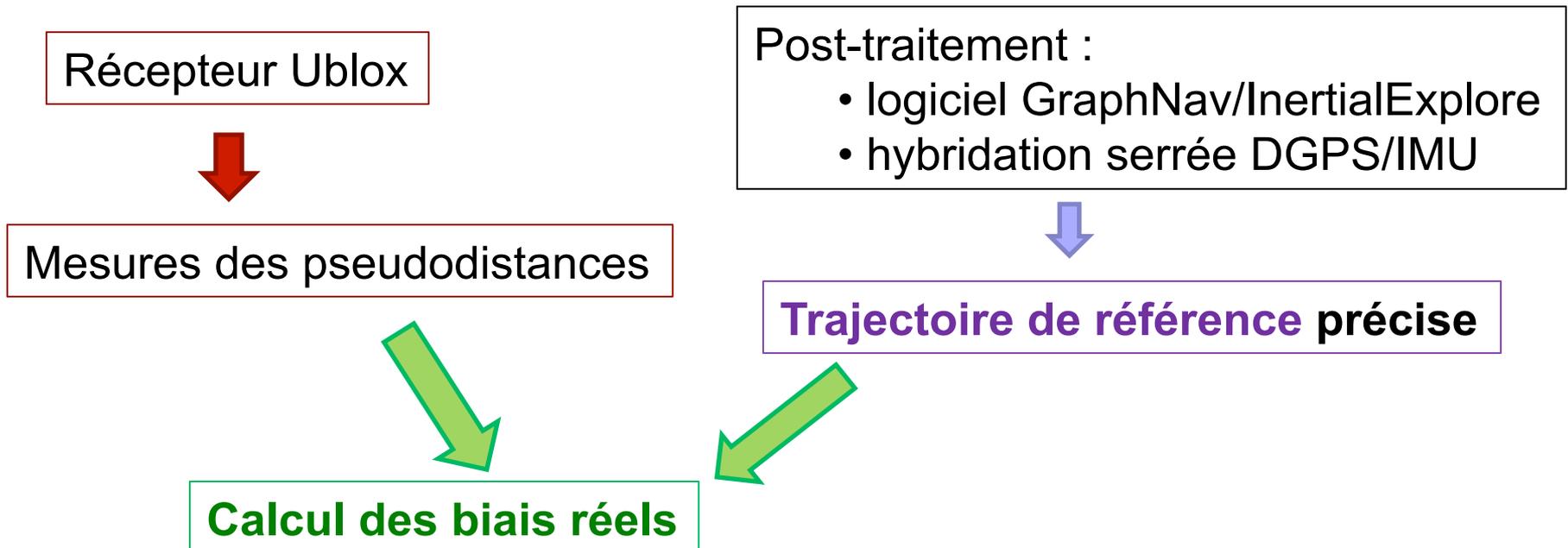


$$C(\tau) = R(\tau) + \sum_{i=1}^m \alpha_i R(\tau - \delta\tau_i)$$



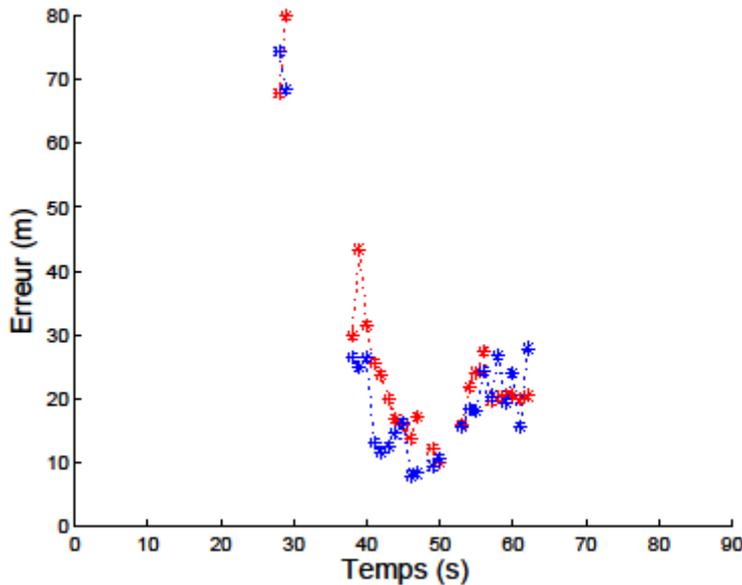
Mesures réelles

■ Conditions de traitement

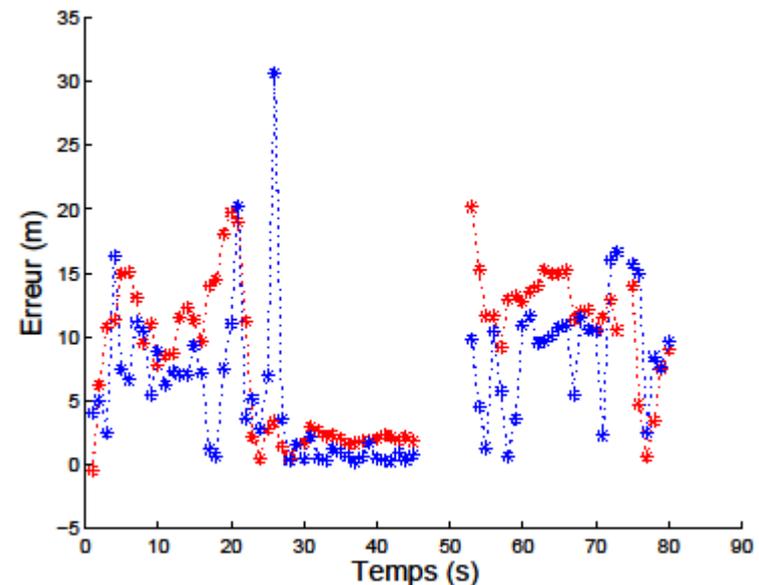


Validation de l'estimation des biais

■ Comparaison simulations 3D/Mesures réelles



Satellite n°17

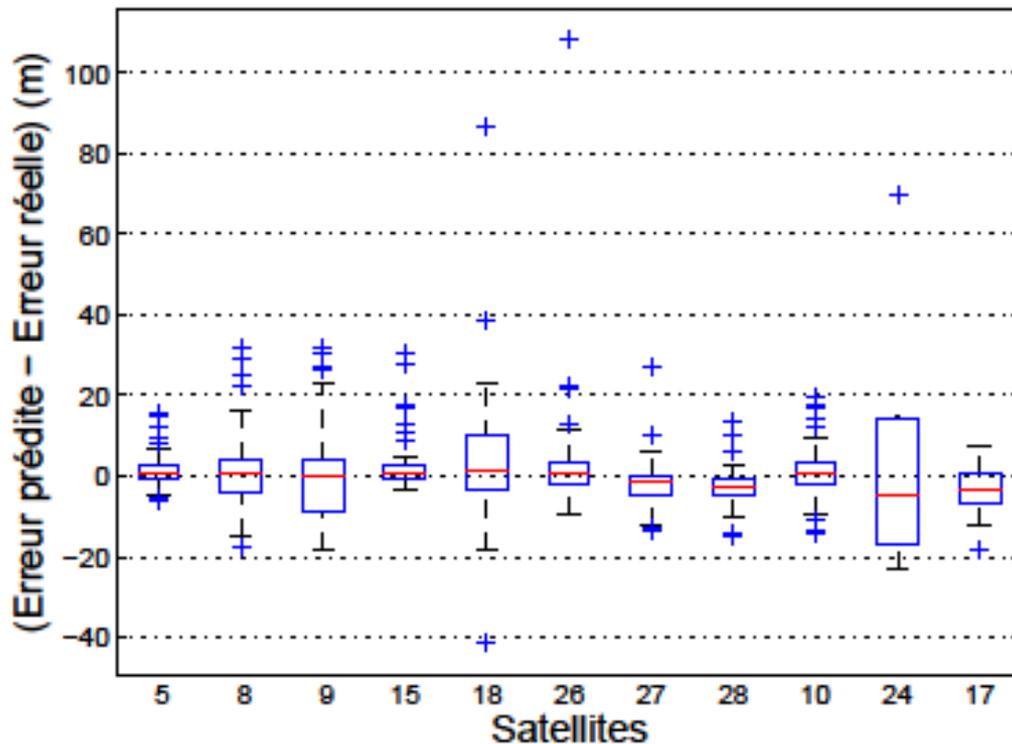


Satellite n°27

Comparaison entre les erreurs réelles sur les pseudodistance (en rouge) et les biais estimés par simulation SE-NAV (en bleu).

Validation de l'estimation des biais

■ Comparaison simulations 3D/Mesures réelles



Biais final =
Biais mesuré – Biais estimé

Scores :

$|\text{Biais final}| < |\text{Biais mesuré}|$

→ **76,52%**

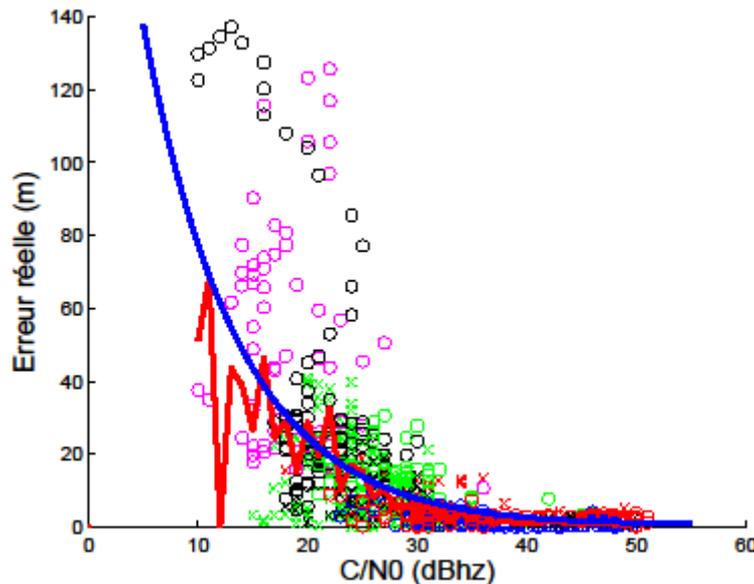
$|\text{Biais final}| < |\text{Biais mesuré}|/2$

→ **49,24%**

Distribution des **différences biais mesuré/biais estimé**, pour chaque satellite visible.

Navigation en présence de multitrajets

■ Navigation adaptative : modèle sigma-ε



Biais mesurés en fonction du C/N0.
 (Courbe **bleu** : modèle sigma-ε;
 Courbe **rouge** : variance réelle)

Adaptation de la matrice de covariance du bruit de mesure R :

$$\sigma_k^2 = C \cdot 10^{\frac{-C/N_0^k}{10}}$$

[Wieser 2005] A. Wieser, M. Gaggl et H. Hartinger. *Improved Positioning Accuracy with High-Sensitivity GNSS Receivers and SNR Aided Integrity Monitoring of Pseudo-Range Observations*. In Proc. of ION GNSS, pp. 1545-1554, Sep. 2005.

Navigation en présence de multitrajets

■ Navigation aidée par le modèle 3D

- Correction des mesures de pseudodistances :

$$\rho_{\text{corrigé}} = \rho_{\text{mesuré}} - b_{MP}$$

- Adaptation de la matrice de covariance du bruit de mesure R :

$$\sigma_k^2 = (\sigma_{\text{fixe}} + b_{MP,k})^2$$

■ Navigation combinée modèle 3D/modèle sigma- ϵ

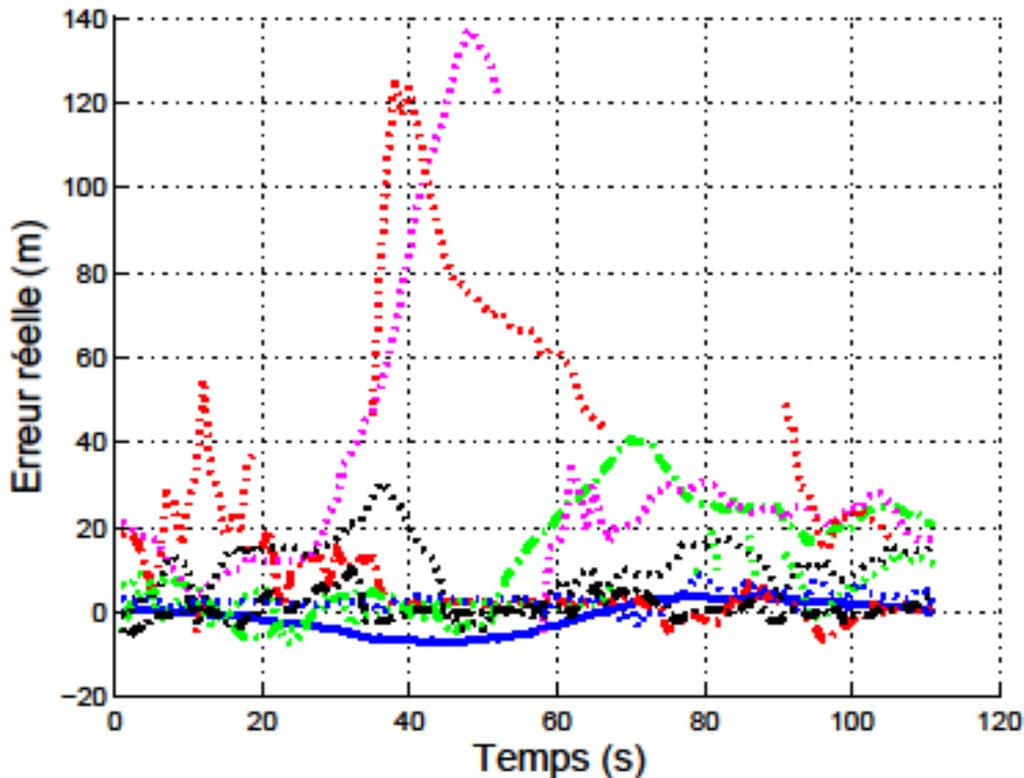
- Correction des mesures & Adaptation de la matrice R :

$$\rho_{\text{corrigé}} = \rho_{\text{mesuré}} - b_{MP}$$

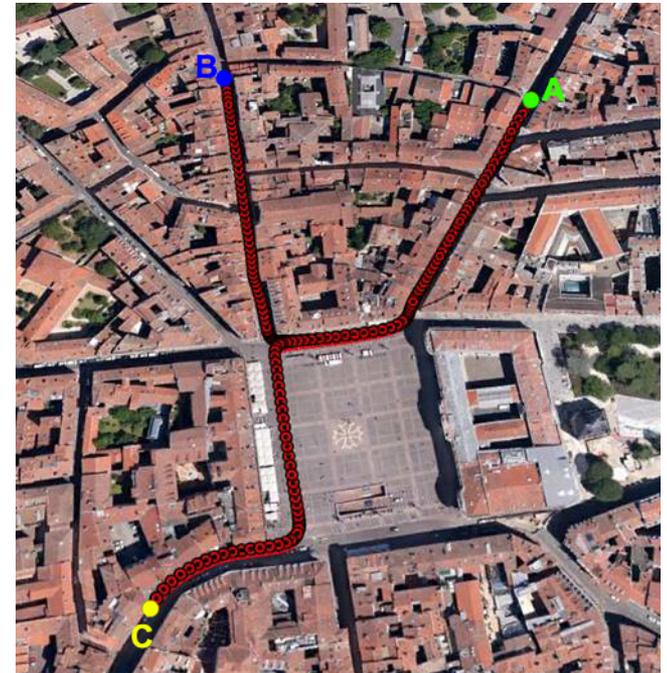
$$\sigma_k^2 = (\sigma_{\epsilon,k} + b_{MP,k})^2$$

Campagne de mesure

■ Campagne réalisée



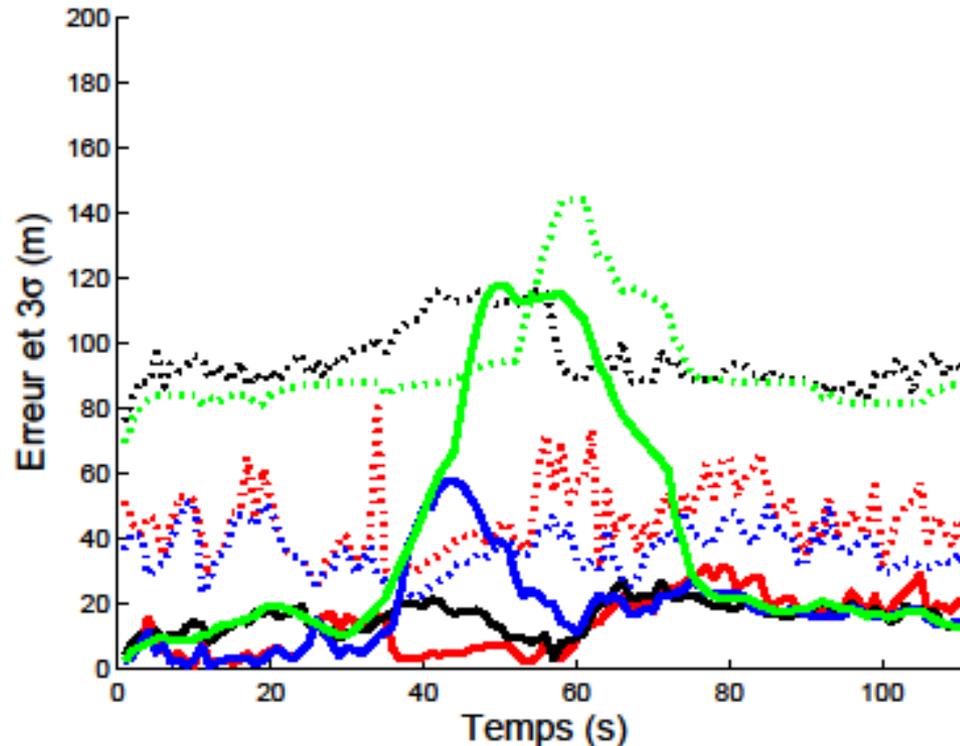
Biais sur les pseudodistances mesurées pour les différents satellites lors de la campagne autour du Capitole.



Trajectoire réalisée lors de la campagne :
Du point A au point B.

Résultats

■ Comparaison entre les filtres de navigation



Erreurs en position (en traits pleins) et bornes d'incertitude à 3σ (en pointillés).
(En verts : EKF robuste. En noirs : EKF robuste 3D. En bleus : EKF robuste σ - ϵ .
En rouges : EKF robuste 3D σ - ϵ .)

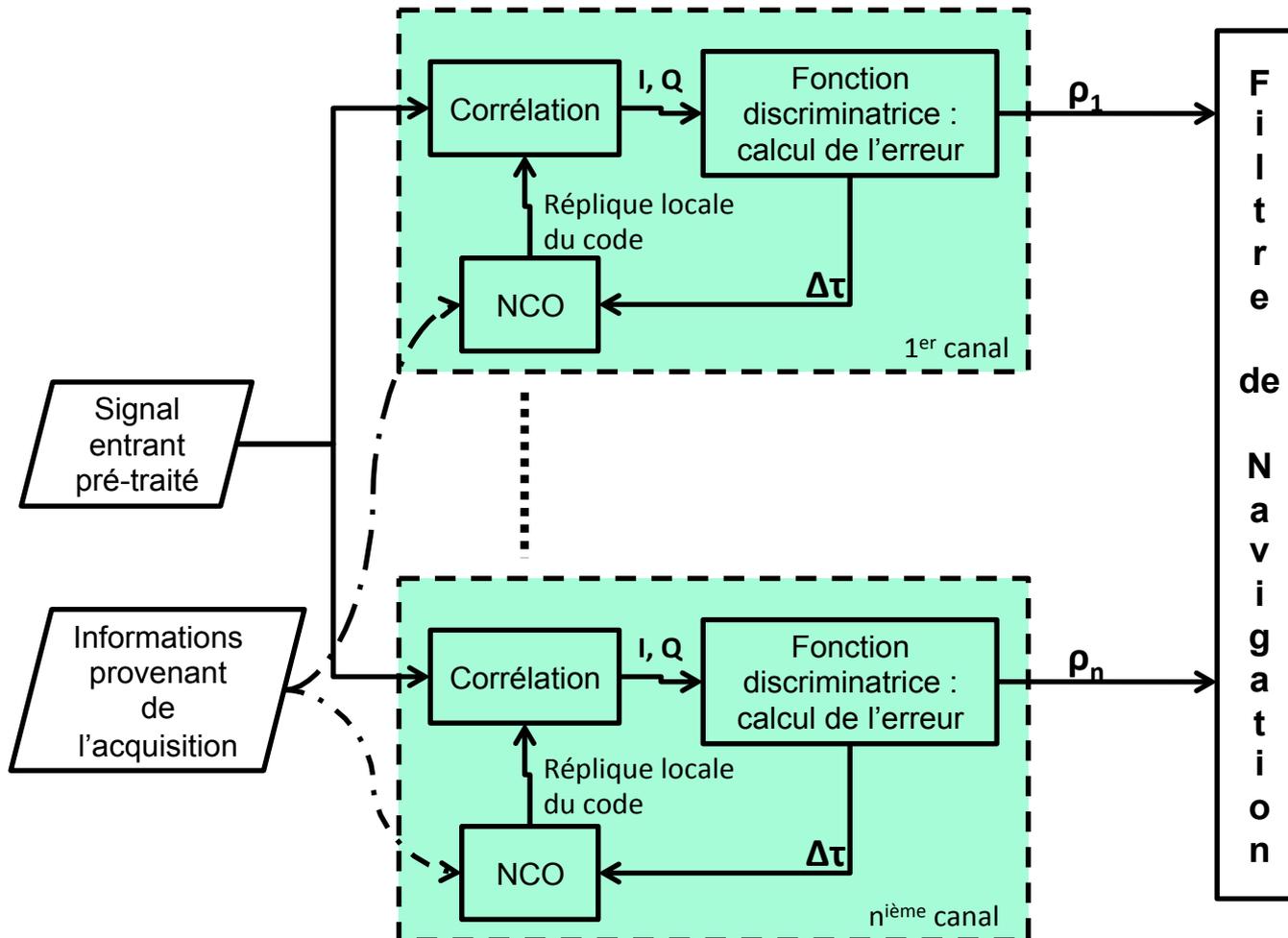
Plan de la partie

IV/ Méthodes de poursuite vectorielle avancées

- Rappel sur les DLL
- La VDLL
- Avantage & Inconvénient des VDLL
- VDLL assistée 3D
- Campagne de mesure
- Résultats

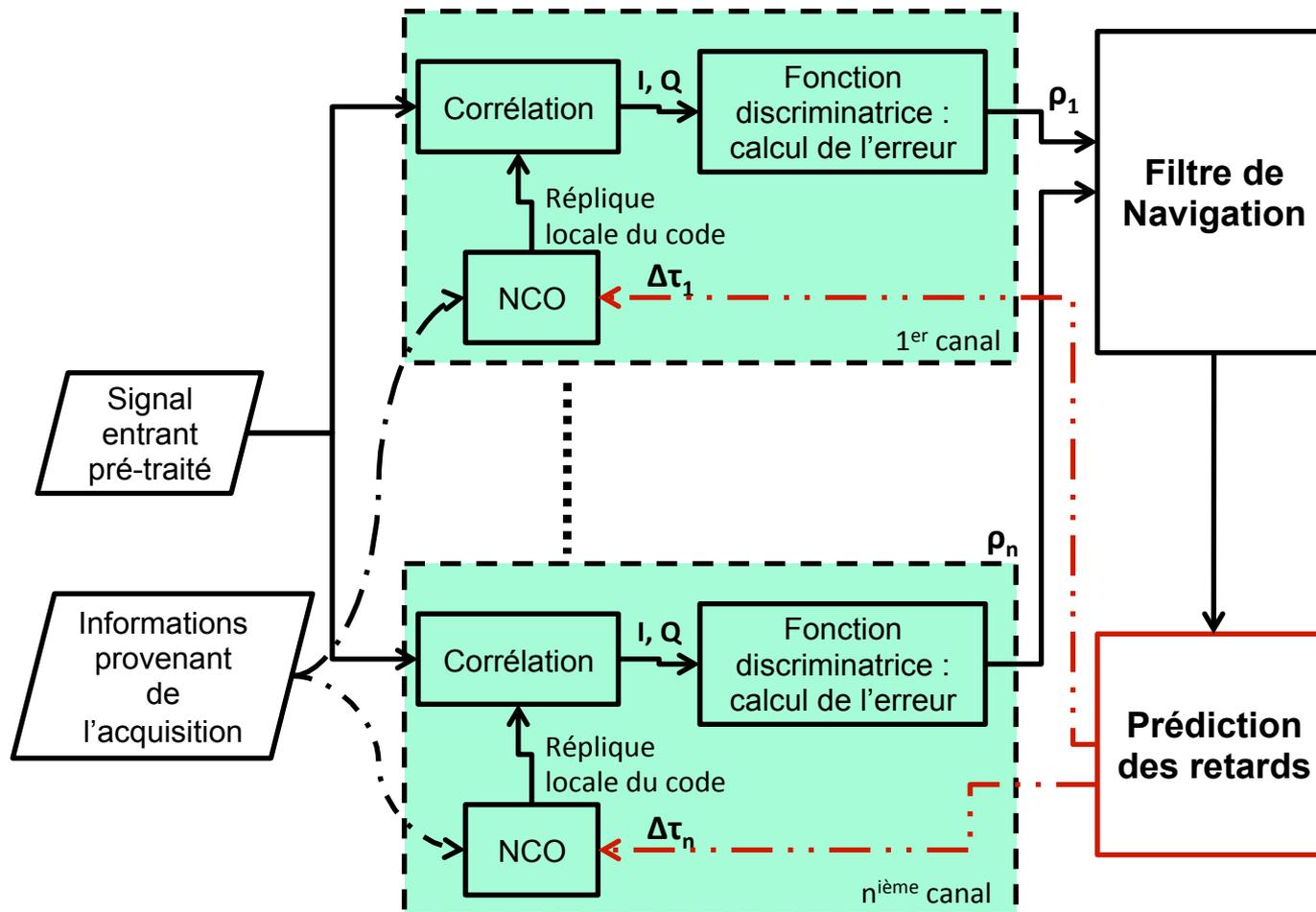
Rappel sur les DLL

■ Fonctionnement d'une Delay Lock Loop classique



La VDLL

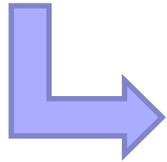
■ Fonctionnement d'une Vector Delay Lock Loop



Avantage & Inconvénient des VDLL

■ Avantage

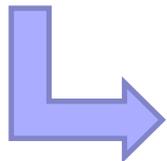
- **Diminution** globale de la **variances** des erreurs sur les **pseudodistances prédites**.



Les « bonnes » mesures **aident la poursuite** des signaux faibles.

■ Inconvénient

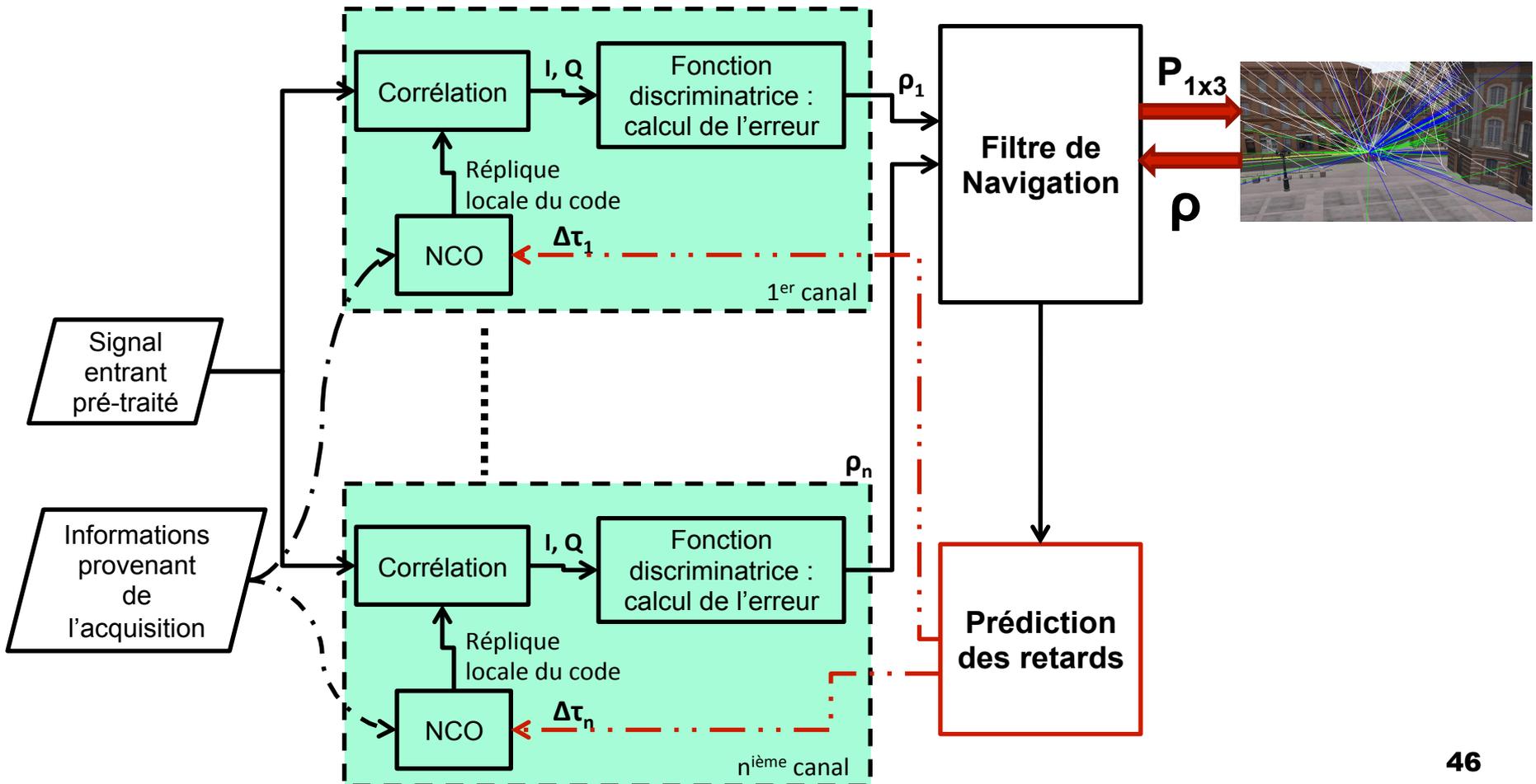
- La **qualité** des pseudodistances prédites **dépend** de la **précision** de la position estimée.



Les « mauvaises » mesures **pénalisent la poursuite** des signaux sans biais.

VDLL assistée 3D

■ Intégration de l'information 3D à la VDLL



Campagne de mesure

■ Mesures réalisées pour TAS par l'IFSTTAR

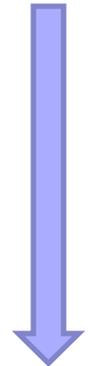


Trajectoire réalisée autour du Capitole

Antenne Novatel, bit-grabber CRISTALINA



Trajectoire de référence précise



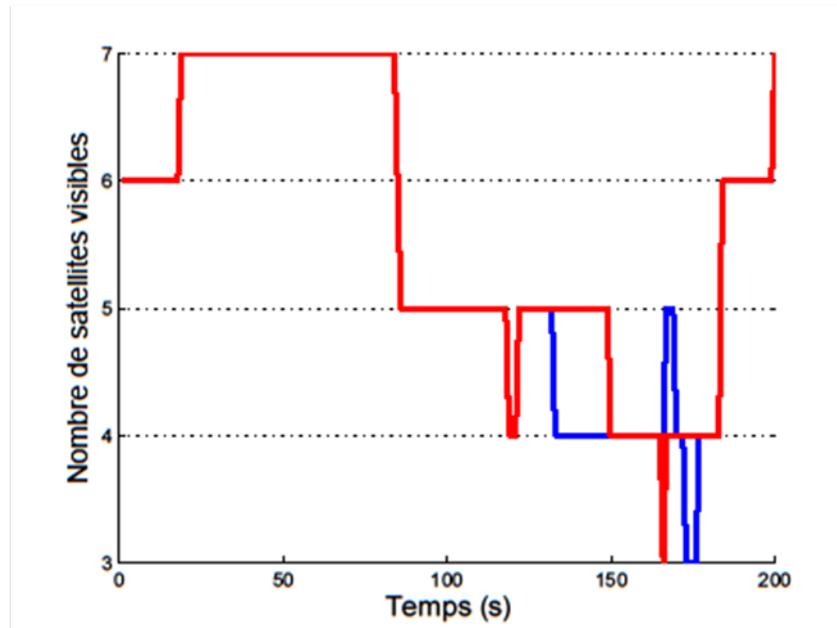
Signaux I & Q, en bande de base (échantillonnés à 25MHz)



Récepteur software sous Matlab : Acquisition => Navigation

Résultats

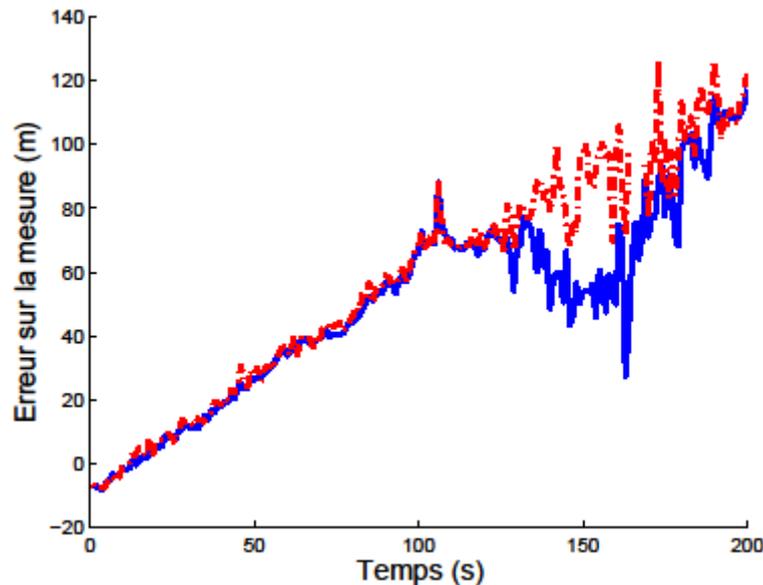
- Comparaison VDLL classique/VDLL assistée 3D



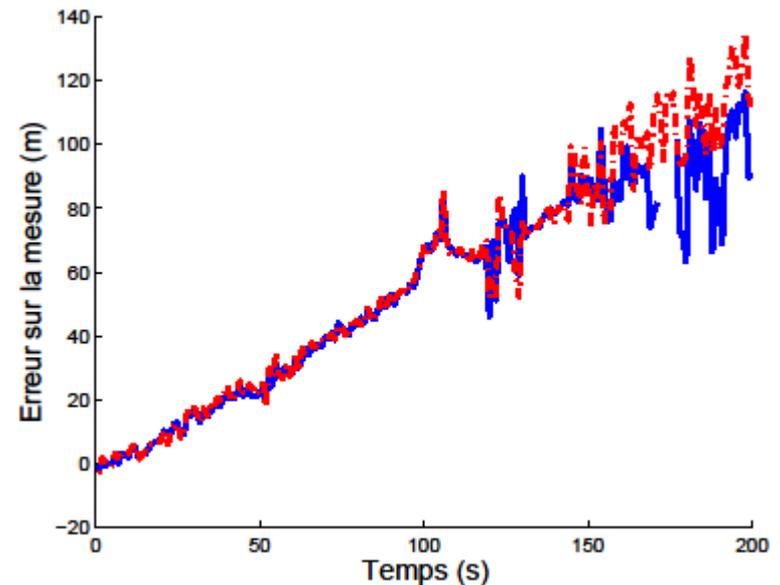
Nombre de satellites poursuivis au fil du temps par la VDLL classique (en bleu) et par la VDLL assistée 3D (en rouge).

Résultats

■ Comparaison VDLL classique/VDLL assistée 3D



Satellite n°29

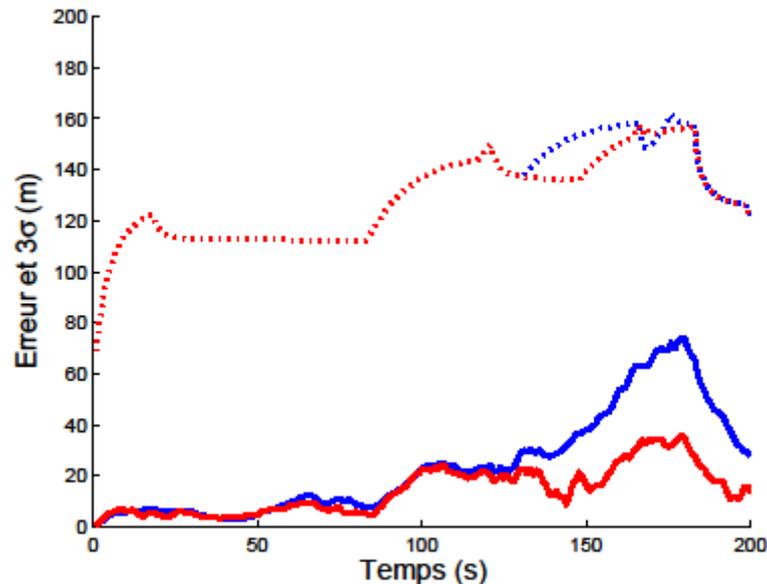


Satellite n°31

Erreurs sur les pseudodistances mesurées par la VDLL classique (en bleu) et par la VDLL assistée 3D (en rouge).

Résultats

- Comparaison VDLL classique/VDLL assistée 3D



Erreurs en position (traits continus) et bornes d'incertitude (tirets) à 3σ pour l'EKF robuste avec VDLL classique (en bleu) et pour l'EKF robuste avec VDLL assistée 3D (en rouge).

Conclusion

❖ Problématique :

Comment se **positionner** en **canyon urbain** ?

❖ Solution proposée :

Utiliser les signaux **multitrajets**.

❖ Méthodologie :

Estimation des **caractéristiques** des signaux biaisés par **modélisation 3D**.

❖ Travaux :

- Estimation du **trajet géométrique** des NLOS
- **Reconstruction** de la mesure de **pseudodistance biaisée**
- **Intégration** de l'**information 3D** au filtre de **navigation**
- Combinaison approche statistique/approche 3D

➡ Résultats **en position** très **prometteurs**

- VDLL assistée 3D

➡ Résultats de **poursuite** très **prometteurs**

Perspectives

- ❖ Validation de la prédiction des **NLOS** sur **données réelles**.
 - ⇒ **Test** en environnement de **canyon urbain**.
- ❖ Adapter **notre approche 3D** au traitement des **mesures Doppler**.
- ❖ **Poursuivre** les signaux **NLOS** par une **VDLL assistée 3D**.
- ❖ **Combiner** approches **3D/map-matching**.

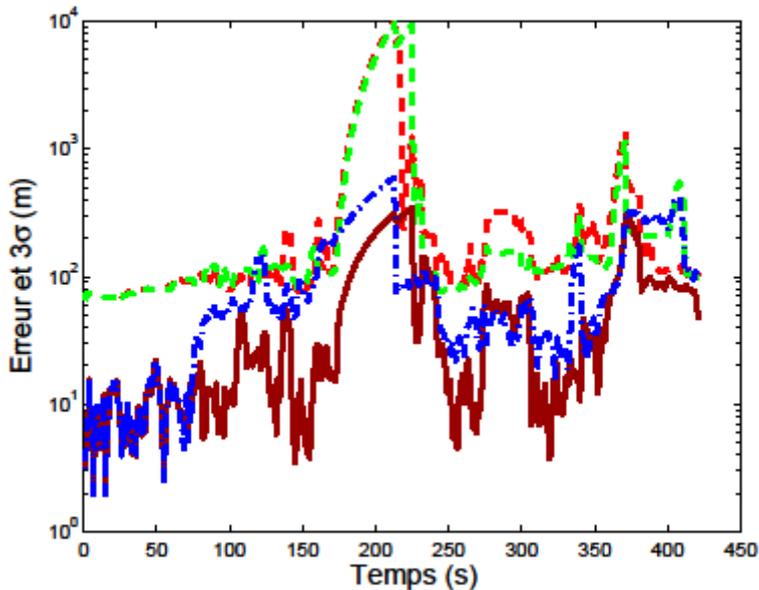
Merci de votre attention



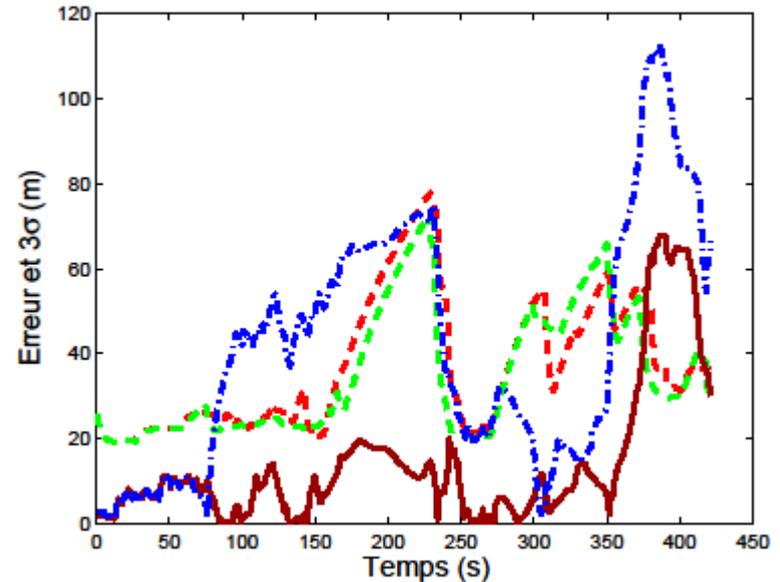


Annexes

■ Chap. II, simu simple, VC



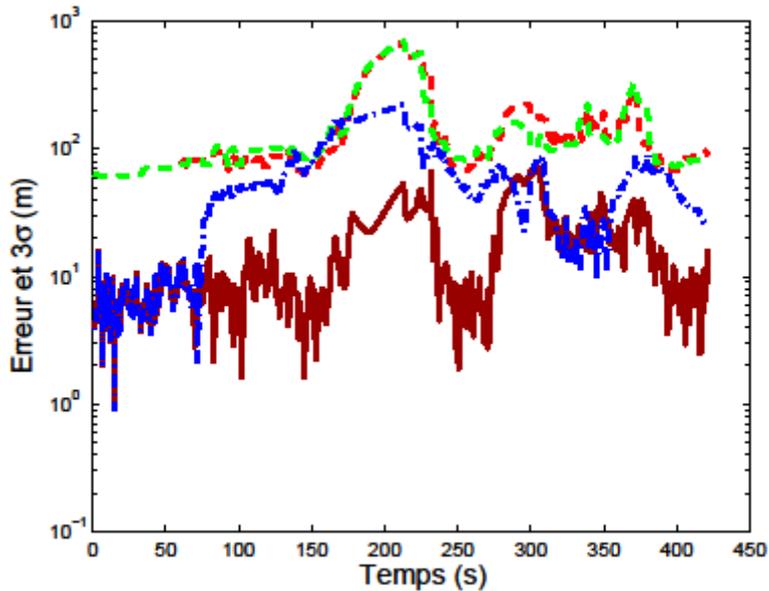
Erreur en position



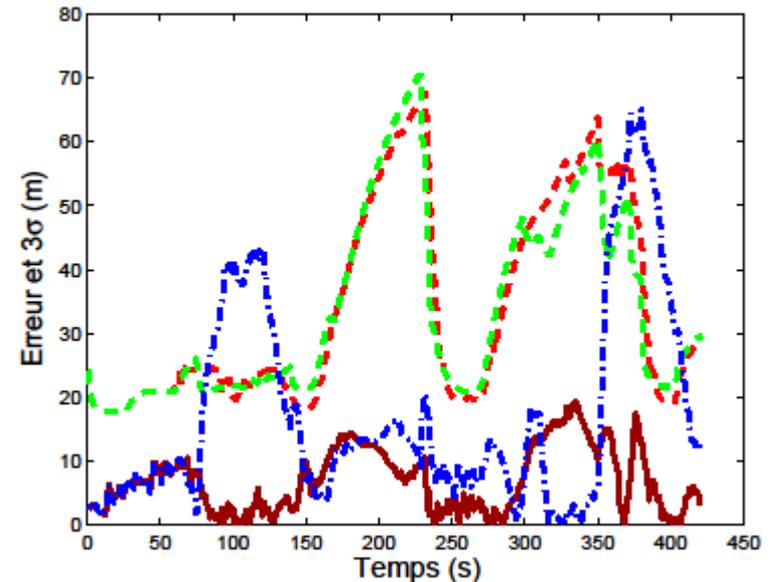
Erreur sur le biais d'horloge

Annexes

■ Chap. II, simu simple, MA



Erreur en position



Erreur sur le biais d'horloge

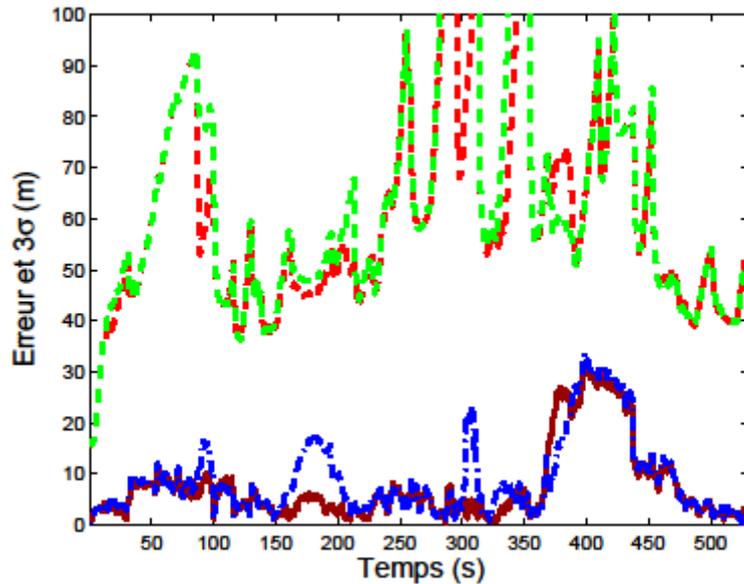
Annexes

■ Chap. II, simu simple

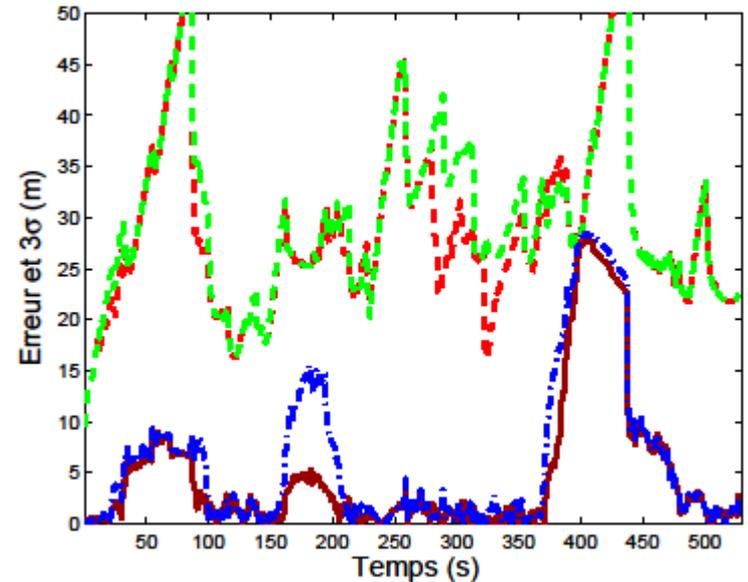
		3D AEKF		EKF classique	
		Vitesse constante	Marche aléatoire	Vitesse constante	Marche aléatoire
Erreur en position	Moyenne (m)	59,3	17,9	111,9	63,7
	Ecart-type (m)	78,1	15,4	130,5	55,0
	Maximum (m)	343,9	72,2	599,7	221,9
Erreur sur l'estimation du biais d'horloge	Moyenne (m)	14,1	7,0	41,7	17,5
	Ecart-type (m)	16,7	4,9	28,9	16,1
	Maximum (m)	68,0	19,2	112,2	65,0

Annexes

■ Chap. II, simu SE-NAV, VC



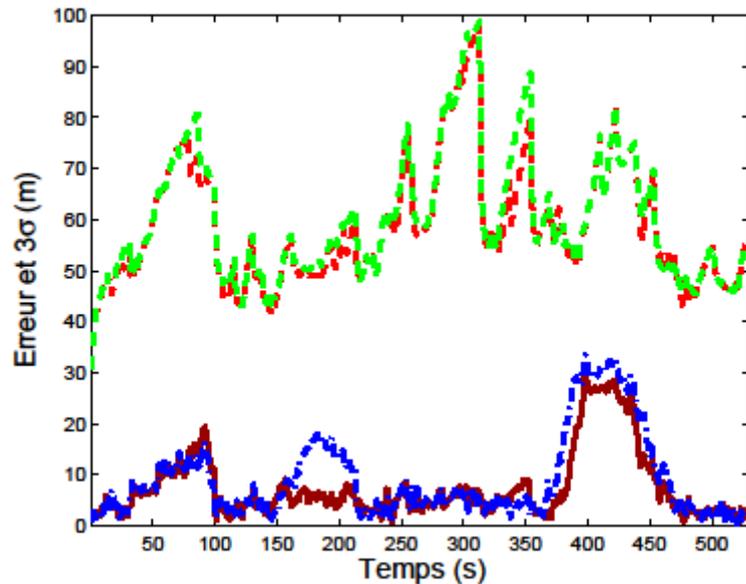
Erreur en position



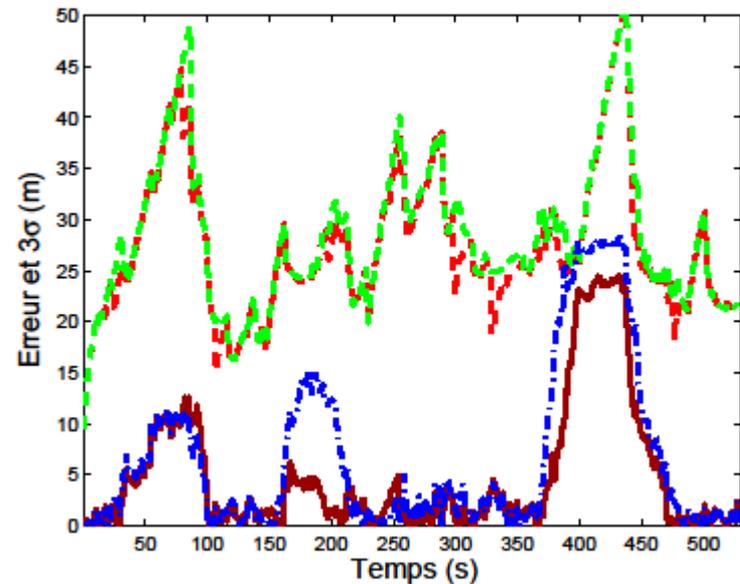
Erreur sur le biais d'horloge

Annexes

■ Chap. II, simu SE-NAV, MA



Erreuret en position



Erreuret sur le biais d'horloge

Annexes

■ Chap. II, simu SE-NAV

		3D AEKF		EKF classique	
		Vitesse constante	Marche aléatoire	Vitesse constante	Marche aléatoire
Erreur en position	Moyenne (m)	7,61	7,54	9,01	9,23
	Ecart-type (m)	7,56	6,71	7,69	8,26
	Maximum (m)	31,03	29,67	33,28	33,43
Erreur sur l'estimation du biais d'horloge	Moyenne (m)	4,85	4,9	6,17	6,77
	Ecart-type (m)	6,99	6,53	7,72	8,18
	Maximum (m)	27,92	24,53	28,49	28,32

Annexes

■ Chap. II, équations géométriques

$$\begin{cases} R - D_R N_1 = P_R \\ N_1^T P_R + d_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow D_R = \frac{d_1 + N_1^T R}{N_1^T N_1}.$$

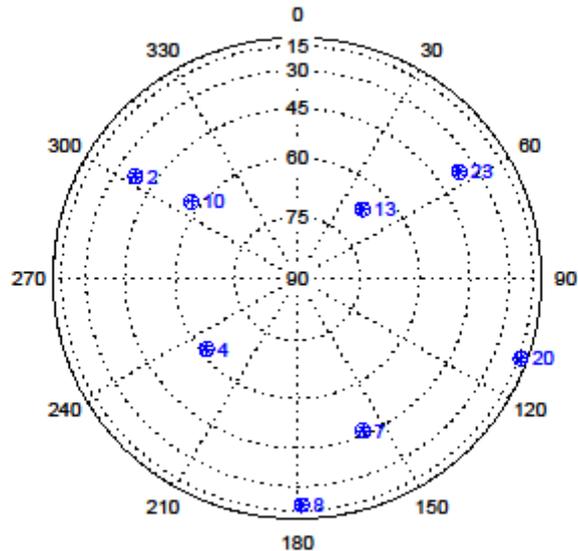
$$\begin{aligned} R1 &= R - 2D_R N_1 \\ &= \left(I - 2 \frac{N_1 N_1^T}{\|N_1\|^2} \right) R - 2 \frac{d_1 N_1}{\|N_1\|^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \|S - R2\| \\ &= \left\| S - \left(\left(I - 2 \frac{N_2 N_2^T}{\|N_2\|^2} \right) \left(I - 2 \frac{N_1 N_1^T}{\|N_1\|^2} \right) R - \left(I - 2 \frac{N_2 N_2^T}{\|N_2\|^2} \right) 2 \frac{d_1 N_1}{\|N_1\|^2} - 2 \frac{d_2 N_2}{\|N_2\|^2} \right) \right\|. \end{aligned} \quad (2.11)$$

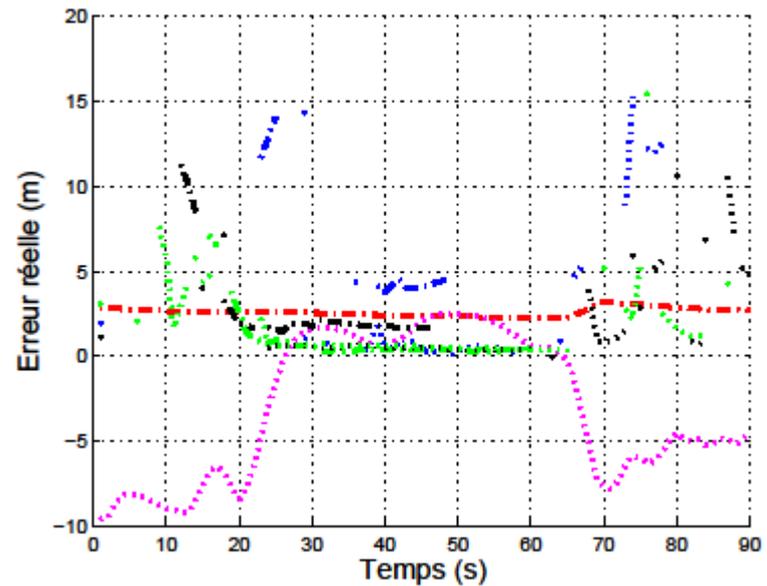
$$\frac{\delta \rho}{\delta R} = - \left(I - 2 \frac{N_2 N_2^T}{\|N_2\|^2} \right) \left(I - 2 \frac{N_1 N_1^T}{\|N_1\|^2} \right) \frac{S - R2}{\rho}.$$

Annexes

■ Chap. III, Validation, Novatel



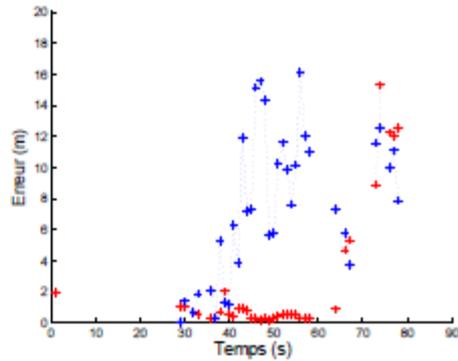
Répartition des satellites



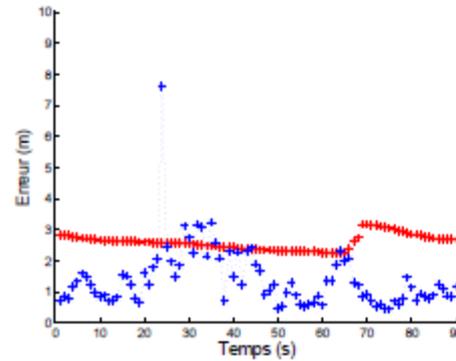
Erreurs sur les mesures

Annexes

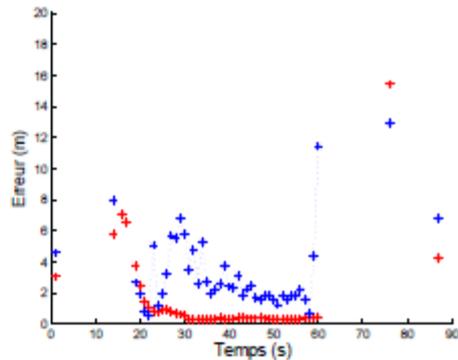
■ Chap. III, Validation, Novatel



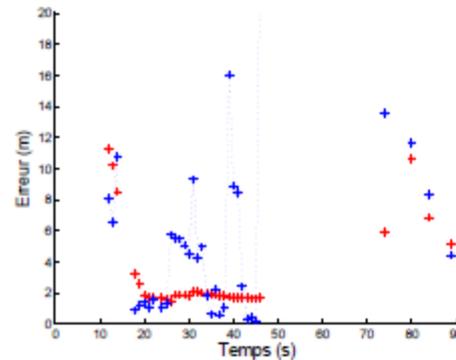
(a) Satellite 2.



(b) Satellite 4.



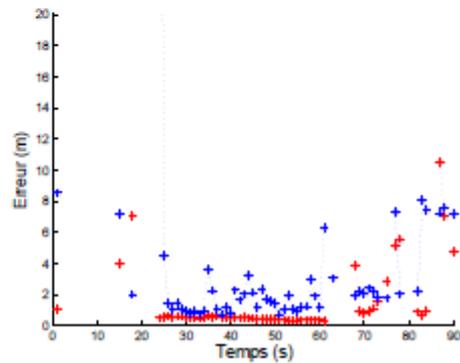
(c) Satellite 7.



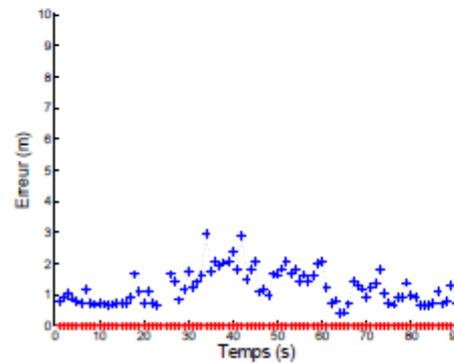
(d) Satellite 8.

Annexes

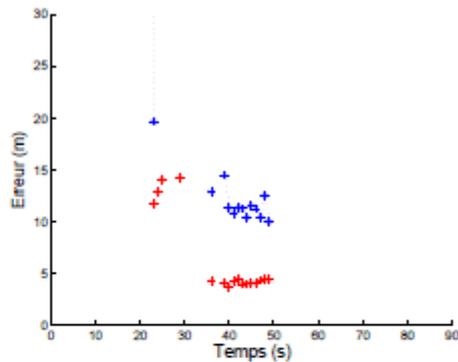
■ Chap. III, Validation, Novatel



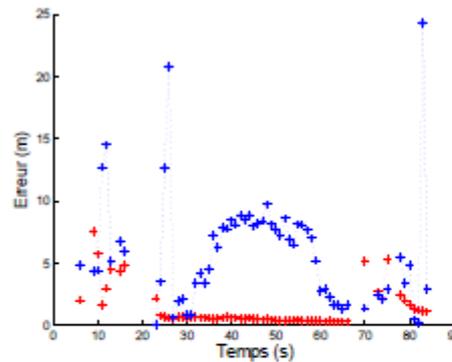
(e) Satellite 10.



(f) Satellite 13.



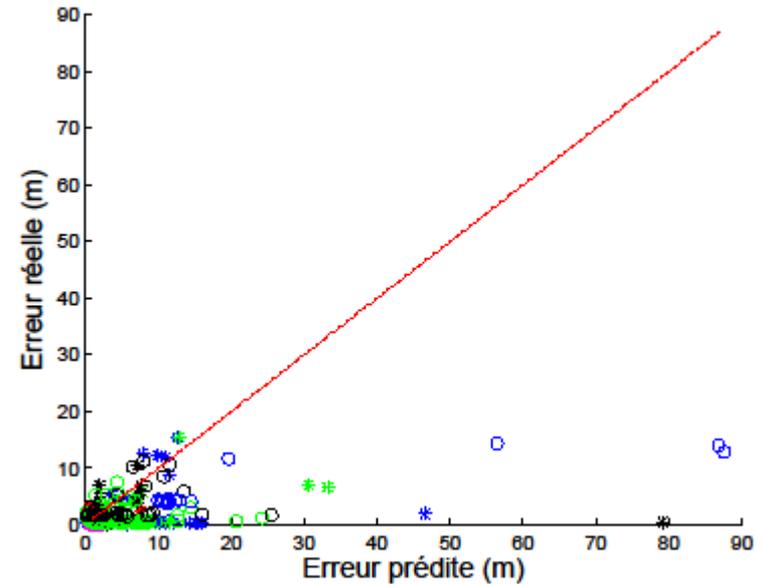
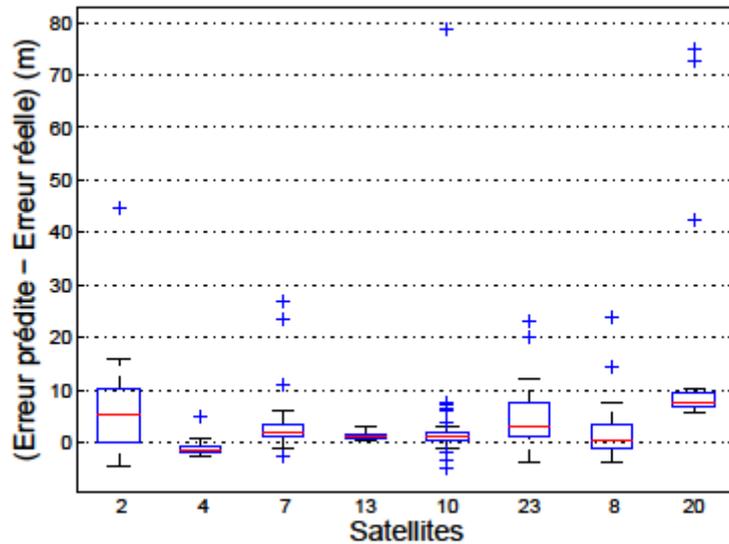
(g) Satellite 20.



(h) Satellite 23.

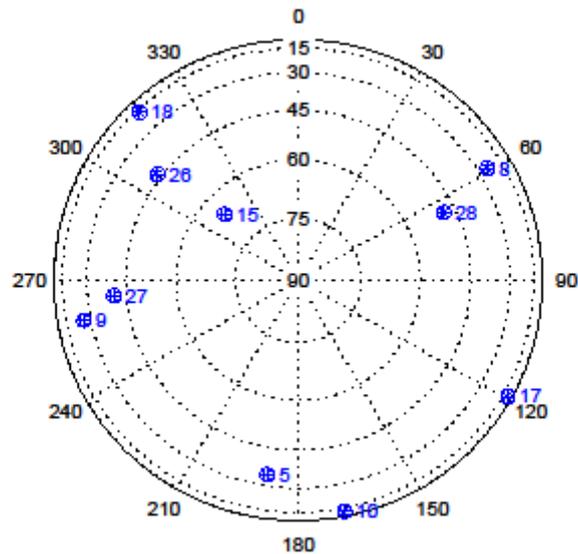
Annexes

■ Chap. III, Validation, Novatel

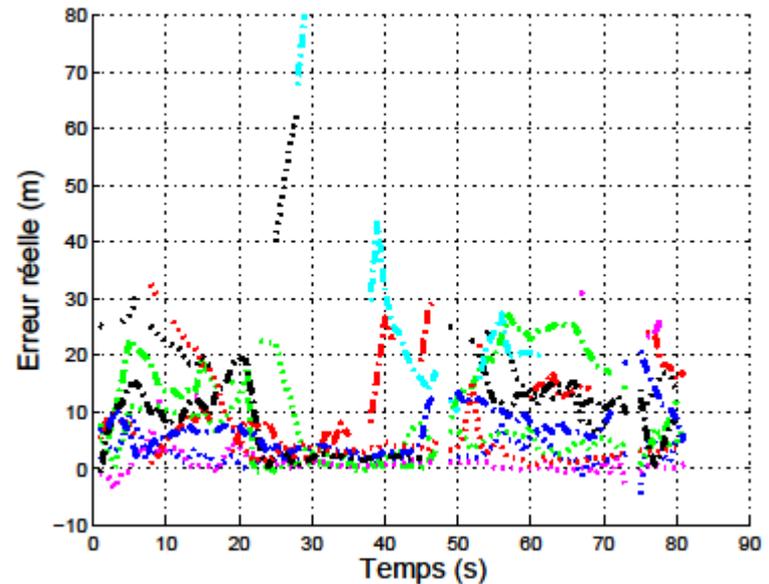


Annexes

■ Chap. III, Validation, Ublox



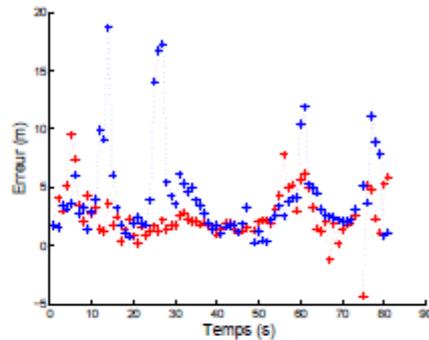
Répartition des satellites



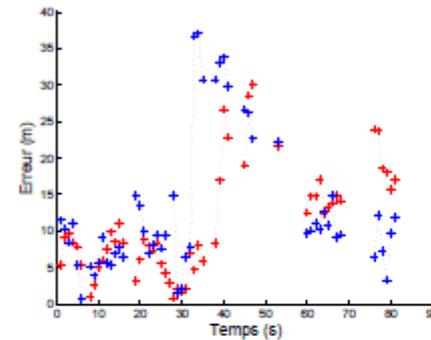
Erreurs sur les mesures

Annexes

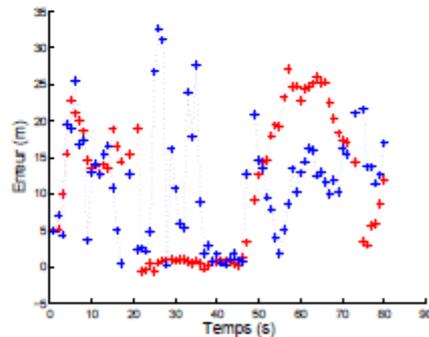
■ Chap. III, Validation, Ublox



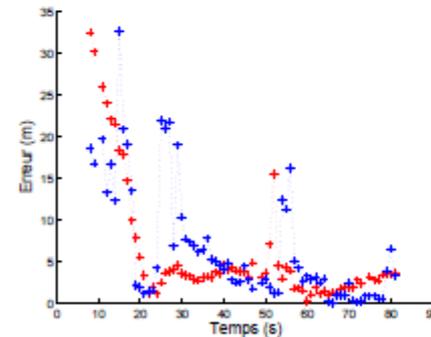
(a) Satellite 5.



(b) Satellite 8.



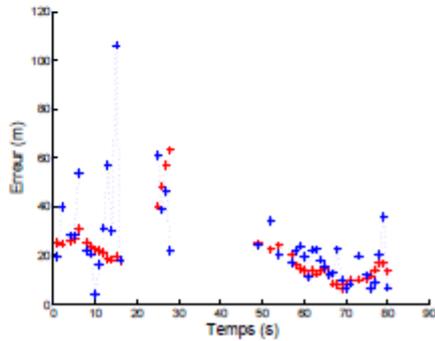
(c) Satellite 9.



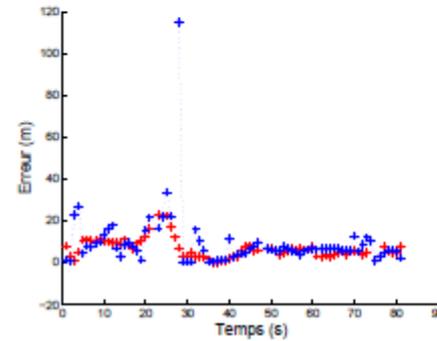
(d) Satellite 10.

Annexes

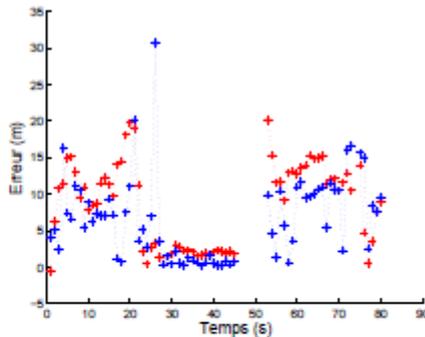
■ Chap. III, Validation, Ublox



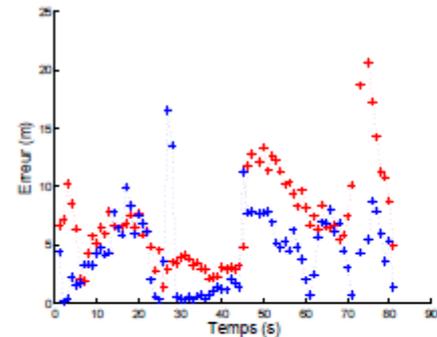
(g) Satellite 18.



(h) Satellite 26.



(i) Satellite 27.



(j) Satellite 28.

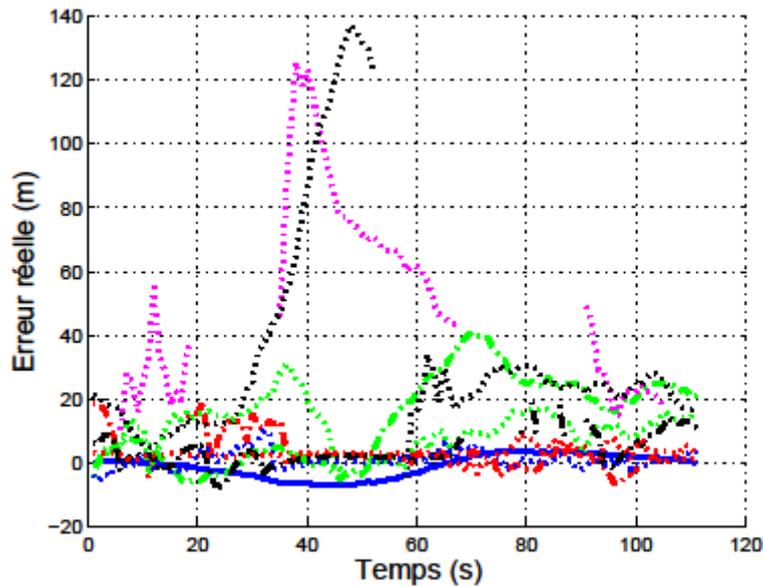
Annexes

■ Chap. III, Validation

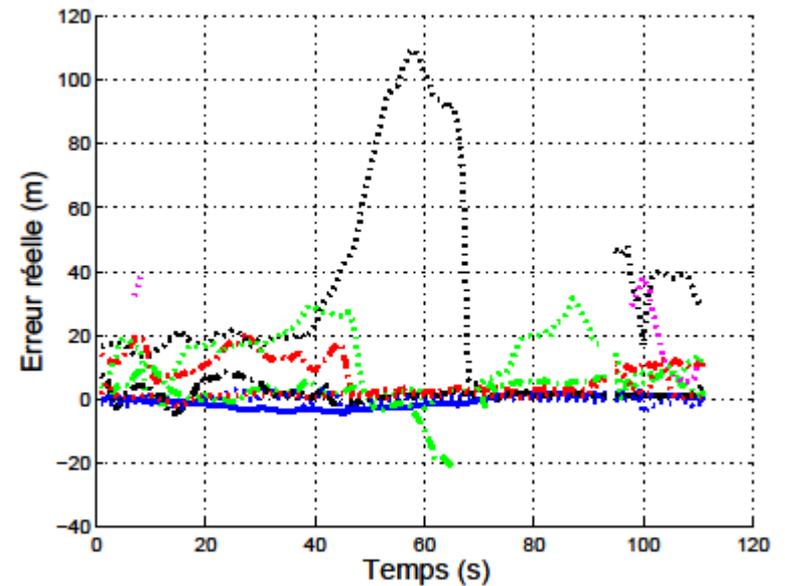
		Récepteur Novatel	Récepteur Ublox
Biais final < Biais mesuré (%)	Pas de bruit sur la position	54,73	76,52
	Bruit sur la position entre [-4m ; +4m]	52,92	75,84
	Bruit sur la position entre [-8m ; +8m]	49,55	72,2
Biais final < Biais mesuré /2 (%)	Pas de bruit sur la position	31,87	49,24
	Bruit sur la position entre [-4m ; +4m]	30,15	43
	Bruit sur la position entre [-8m ; +8m]	26,61	35,57

Annexes

■ Chap. III, Navigation



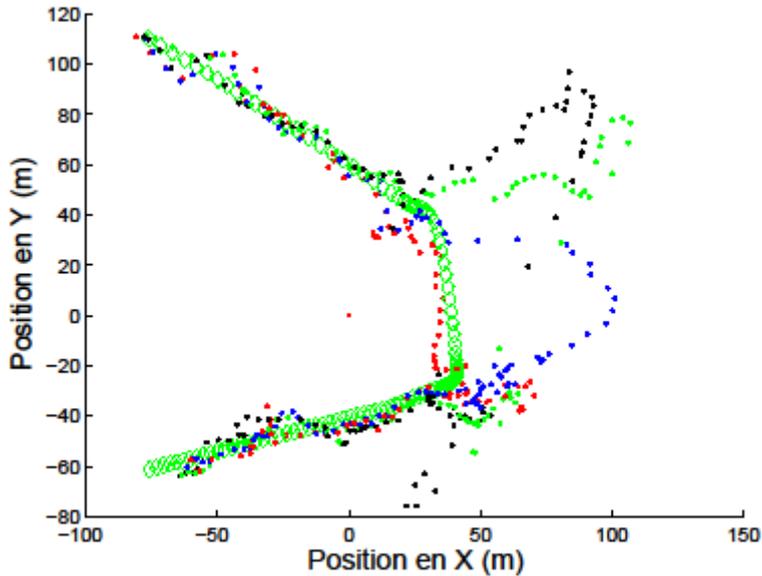
1^{er} passage



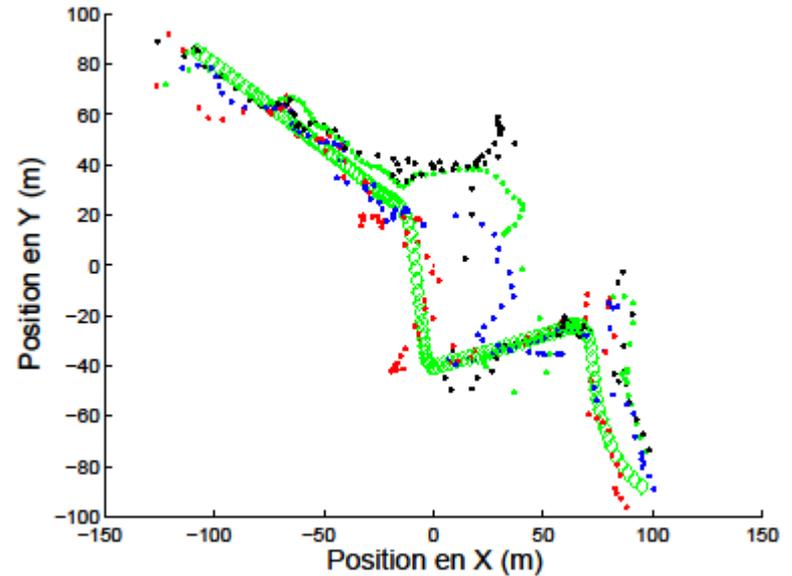
2eme passage

Annexes

■ Chap. III, Navigation, VC



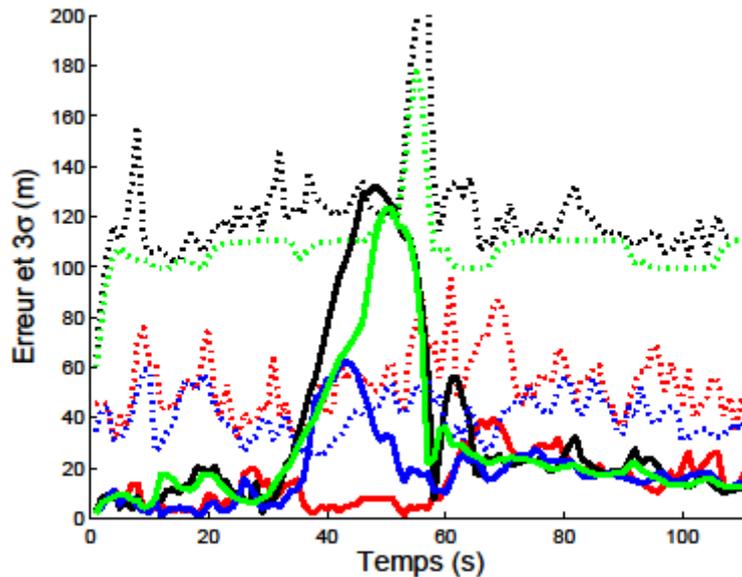
1^{er} passage



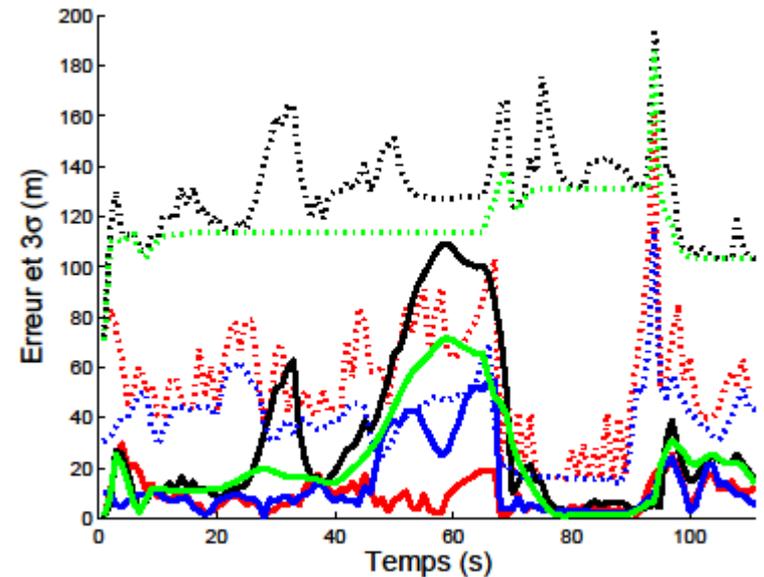
2eme passage

Annexes

■ Chap. III, Navigation, VC



1^{er} passage



2eme passage

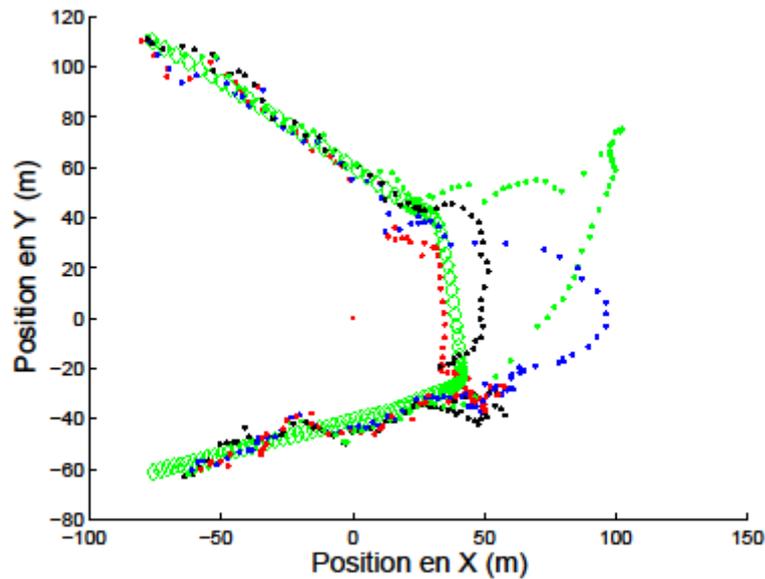
Annexes

■ Chap. III, Navigation, VC

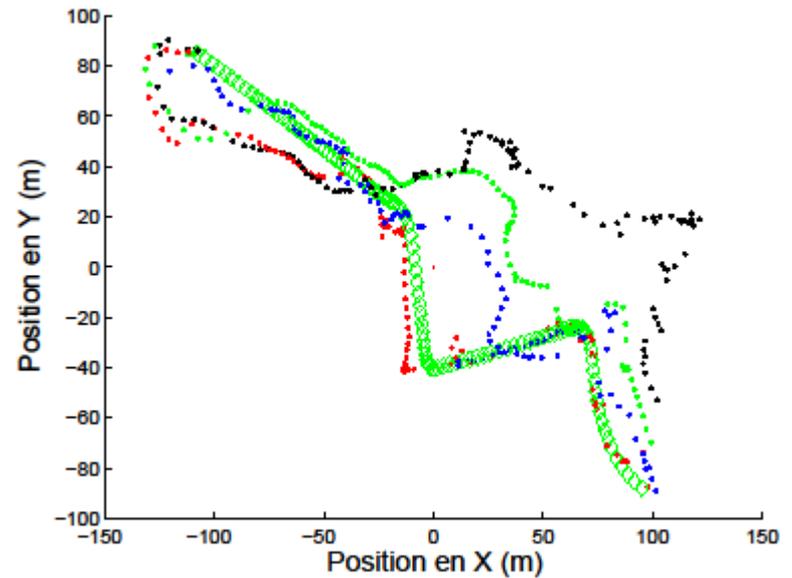
	Moyenne (m)		Ecart-type (m)		Maximum (m)	
	1 ^{er} pas- sage	2 ^{ème} passage	1 ^{er} pas- sage	2 ^{ème} passage	1 ^{er} pas- sage	2 ^{ème} passage
EKF robuste	28.82	22.72	29.13	19.82	123.38	71.69
EKF robuste 3D	33.75	31.52	35.71	31.52	132.15	109.19
EKF robuste sigma- ϵ	18.21	13.72	13.89	13.86	62.67	55.09
EKF robuste 3D sigma- ϵ	14.33	9.23	9.69	6.20	39.68	29.74

Annexes

■ Chap. III, Navigation, MA



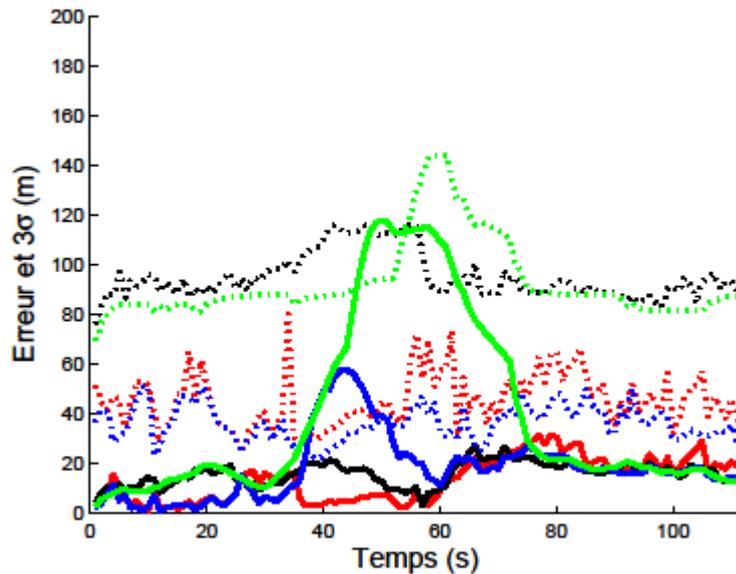
1^{er} passage



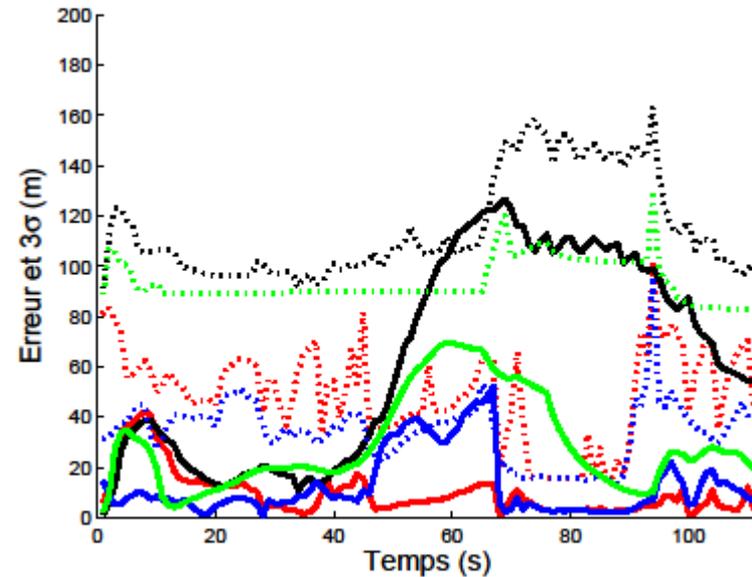
2eme passage

Annexes

■ Chap. III, Navigation, MA



1^{er} passage



2eme passage

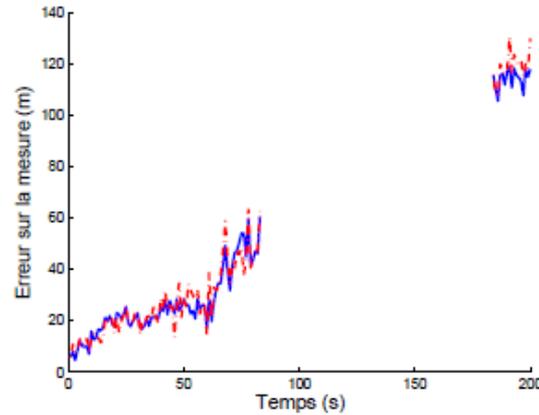
Annexes

■ Chap. III, Navigation, MA

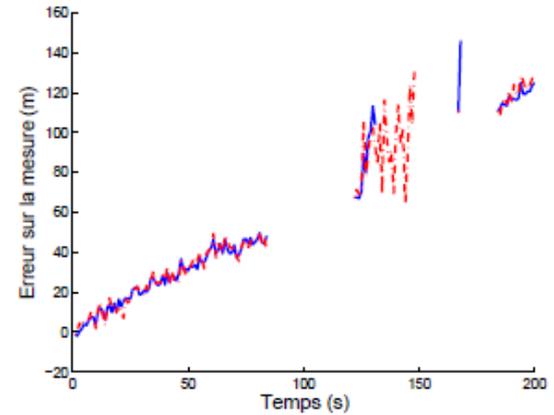
	Moyenne (m)		Ecart-type (m)		Maximum (m)	
	1 ^{er} pas- sage	2 ^{ème} passage	1 ^{er} pas- sage	2 ^{ème} passage	1 ^{er} pas- sage	2 ^{ème} passage
EKF robuste	39.56	29.49	36.55	18.88	117.52	69.69
EKF robuste 3D	16.01	63.00	4.68	40.45	27.45	126.48
EKF robuste sigma- ϵ	18.40	12.95	13.43	12.66	57.62	52.47
EKF robuste 3D sigma- ϵ	13.69	9.77	8.75	8.96	31.72	42.11

Annexes

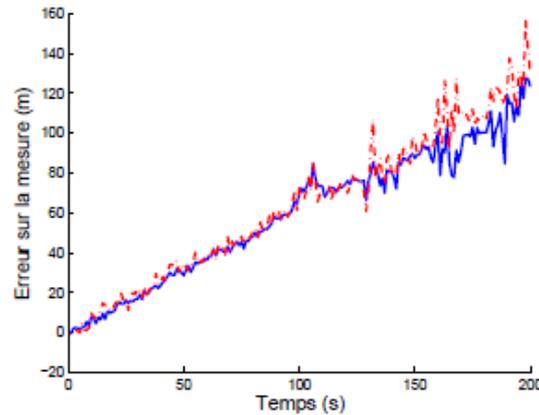
■ Chap. IV



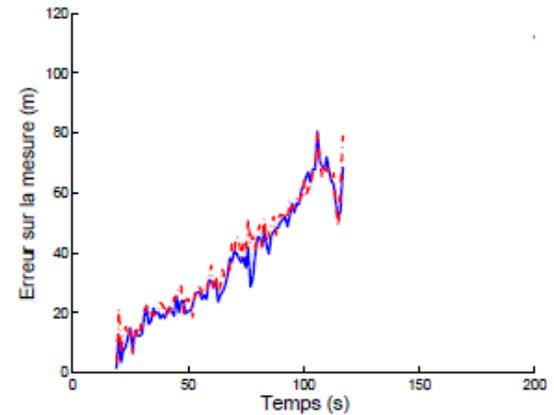
(a) Satellite 3.



(b) Satellite 6.



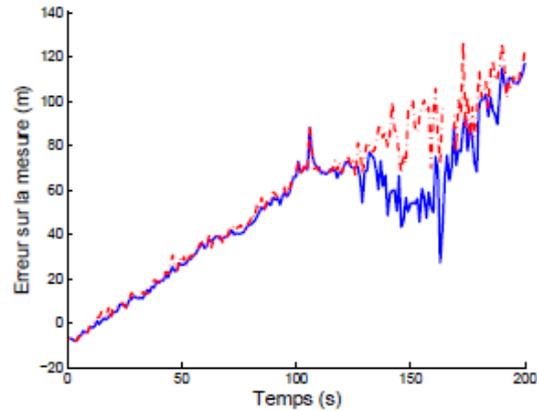
(c) Satellite 21.



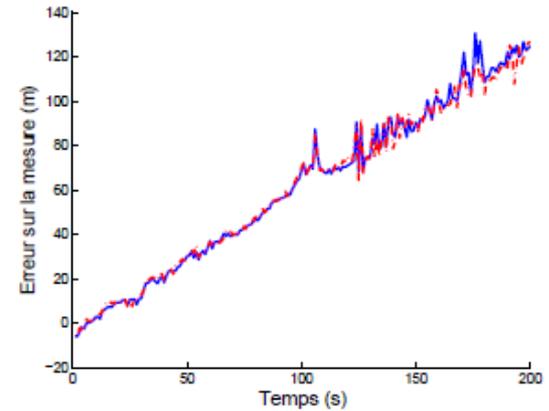
(d) Satellite 25.

Annexes

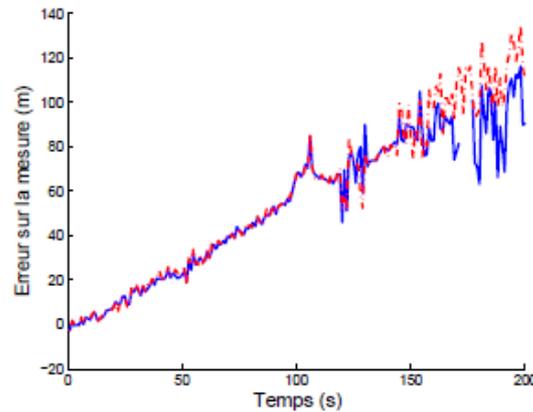
■ Chap. IV



(e) Satellite 29.



(f) Satellite 30.



(g) Satellite 31.