

Instrumentation GNSS-R

Architecture et traitements du signal

Systemes d'observations par réflexion des signaux GNSS

Serge Reboul
serge.reboul@univ-littoral.fr

Plan

- Introduction
- Altimétrie par le SNR
- Altimétrie par le code
- Altimétrie par la phase
- Conclusion

- **Navigation**

- Map matching

Thèse de Karim el Mokthari 2015 [6]

- **Traitement des signaux GNSS en boucle ouverte:**

- Boucle de phase
- Boucle de code

Thèse de Georges Stienne 2013 [2][3] -Thèse de Stanislas Boutoille 2007 [1]

- **Réflectométrie GNSS**

- Altimétrie SNR
- Altimétrie code
- Altimétrie phase

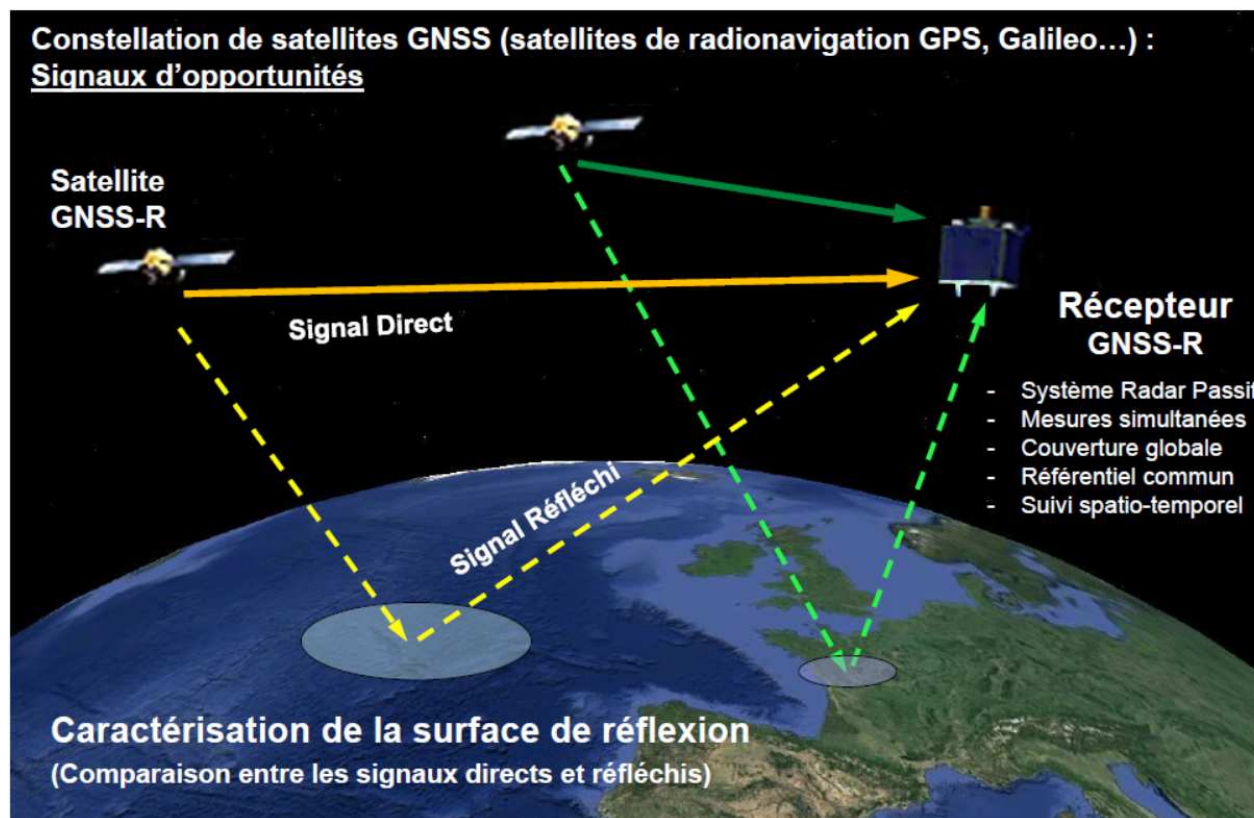
Thèse de Jean Christophe Kucwaj 2016 [4][5][7]

- **Géolocalisation sous marine**

- Localisation hyperbolique

Thèse de Baptiste Kouzoundjian (thèse en cours)

Réflectométrie GNSS (GNSS-R)



Quelques applications :

- **Altimétrie, mesure du niveau d'eau**
- Mesure du taux d'humidité des sols
- Rugosité de surface
- Couverture végétale

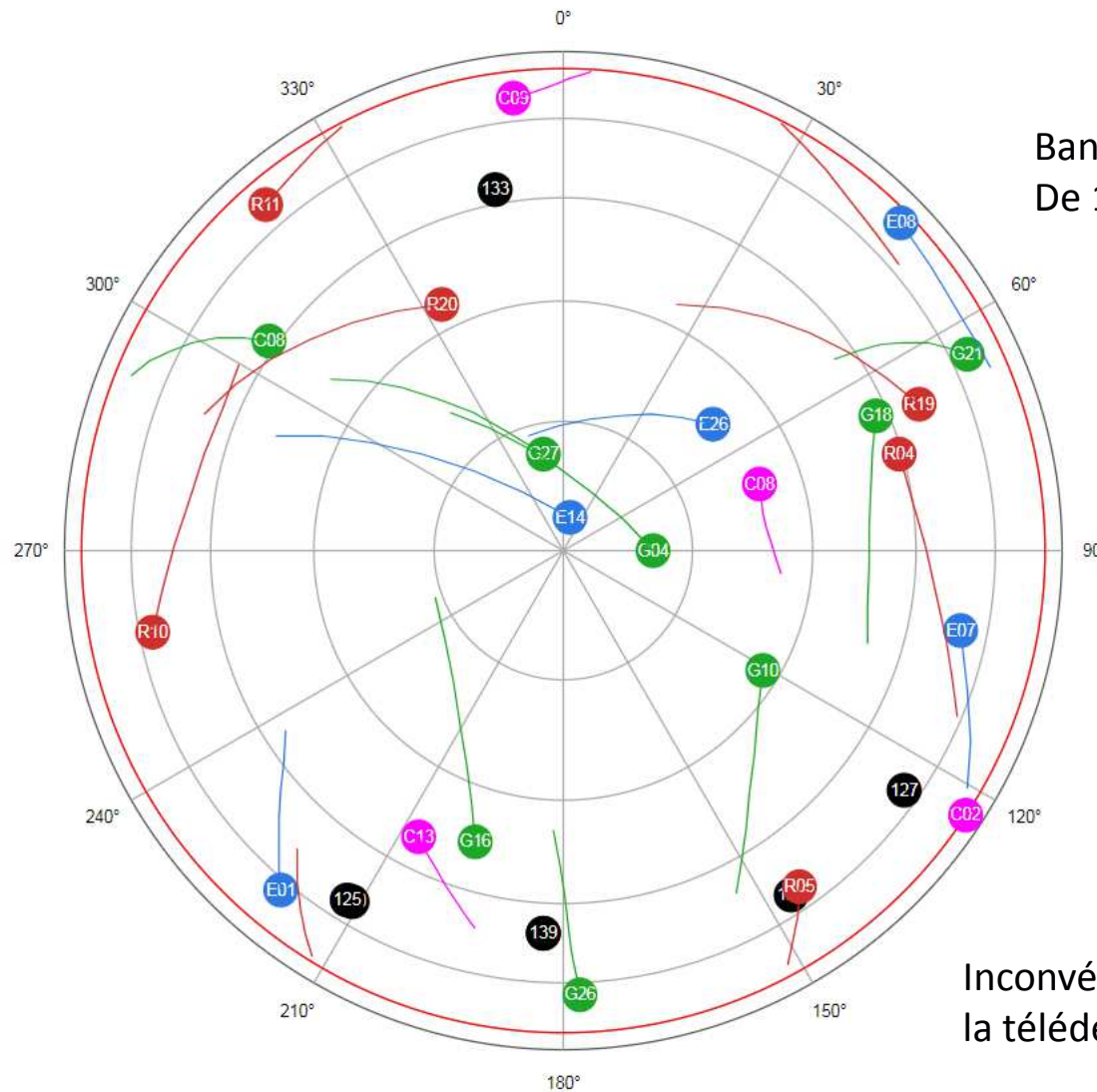
Réflectométrie GNSS : diversité (actuelle) de sources

Juan-les-Pins
08/09/2017
10h → 11h

Bandes fréquentielles :
De 1.16 à 1.61 GHz

CDMA/FDMA
BPSK, QPSK, BOC...

GPS
Glonass
Galileo
Beidou
EGNOS
WAAS
GAGAN

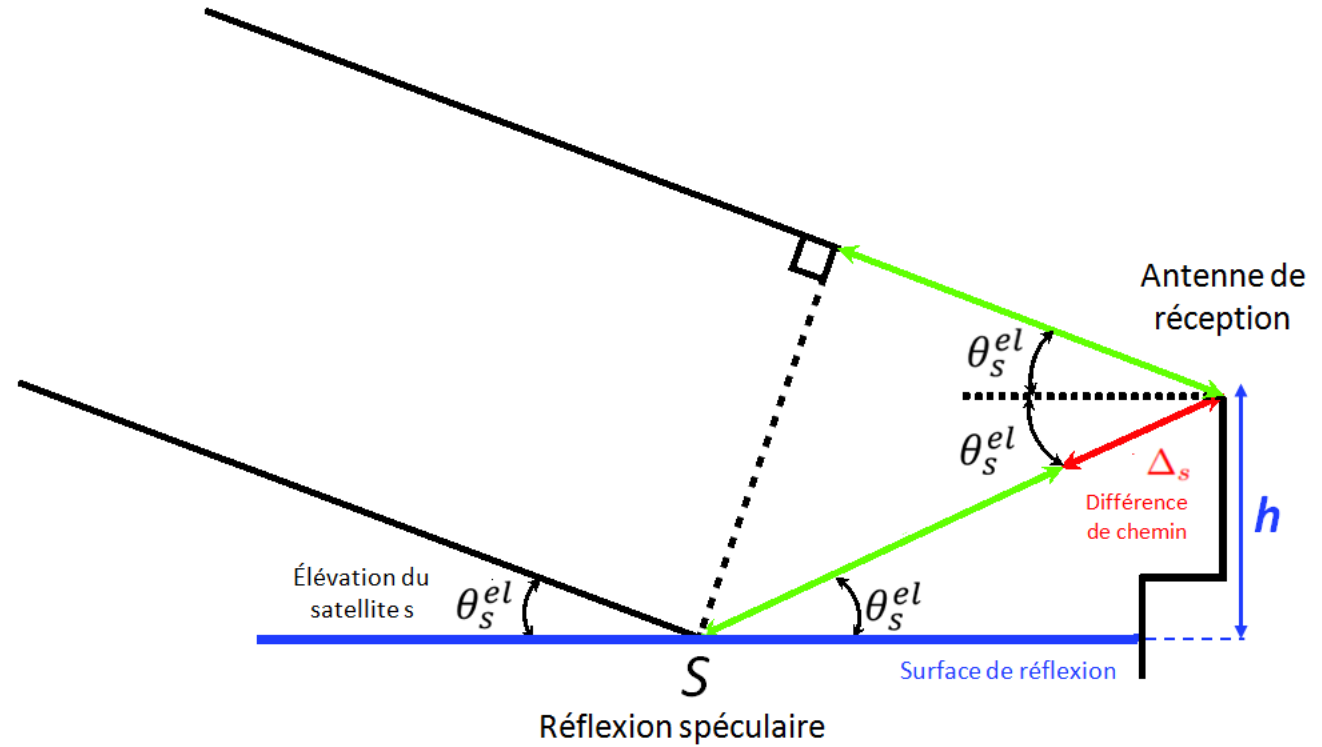


Inconvénients : non dédiée à
la télédétection, faible RSB

Altimétrie GNSS-R au sol (GPS-L1)



Satellite émetteur s



$$\Delta_s(t) = 2 h \sin(\theta_s^{el}(t))$$

Altimétrie GNSS-R au sol (GPS-L1)

Signal direct reçu :

$$S^D(t) = \sum_{s \in S} A_s^D CA_s(t - \tau_s^D) \sin(2\pi f_s^{L1} t - \phi_s^D) + \eta_s$$

Réplique du signal direct :

$$S_s^D(t) = A_s^D CA_s(t - \tau_s^D) \sin(2\pi f_s^D t - \phi_s^D)$$

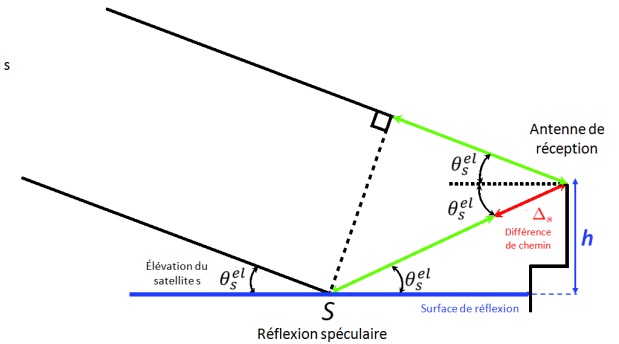
Réplique du signal réfléchi :

$$S_s^R(t) = \underline{A_s^R} CA_s(t - \tau_s^D - \underline{\Delta_s(t)/c}) \sin(2\pi f_s^D t - \phi_s^D - \underline{\psi_s(t)})$$

$$A = \sqrt{(A_s^D)^2 + (A_s^R)^2 + 2A_s^D A_s^R \cos(\psi_s(t))}$$

$$\Delta_s(t) = 2h \sin(\theta_s^{el}(t))$$

$$\psi_s(t) = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta_s(t) \right) \text{mod}(2\pi)$$



Plan

- Introduction
- Altimétrie par le SNR
- Altimétrie par le code
- Altimétrie par la phase
- Conclusion

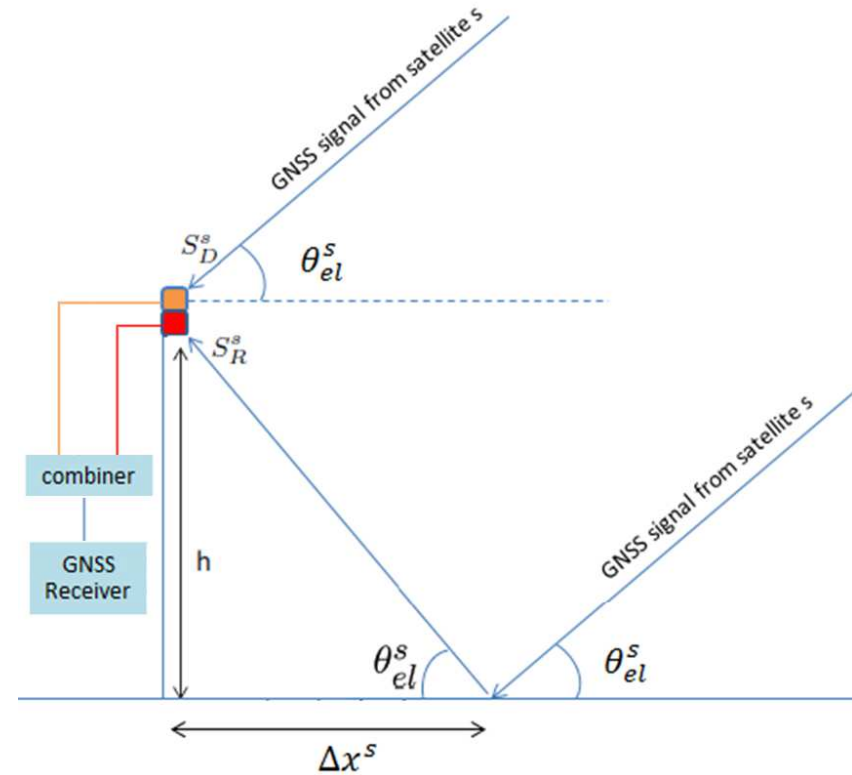
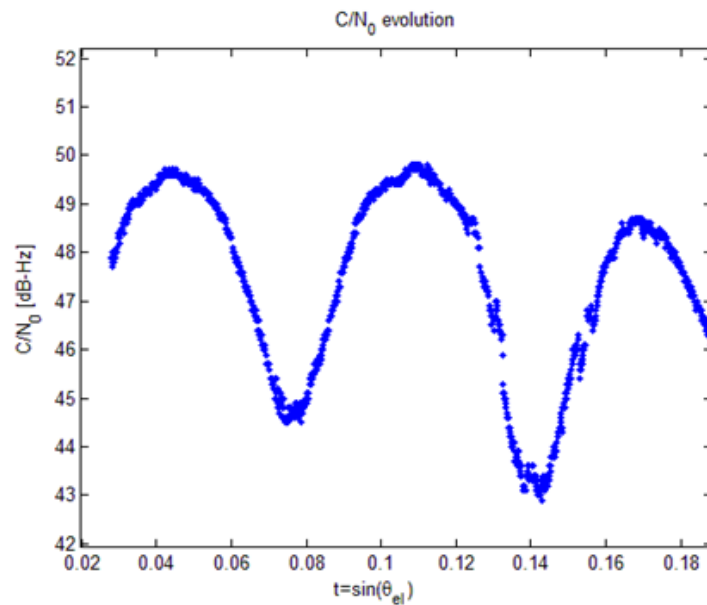
Interference Pattern Technique

Les signaux reçus sont combinés :

$$A = \sqrt{(A_s^D)^2 + (A_s^R)^2 + 2A_s^D A_s^R \cos(\psi_s(t))}$$

Avec:

$$\psi_s(t) = \frac{4\pi}{\lambda} h \sin(\theta_s^{el}(t))$$

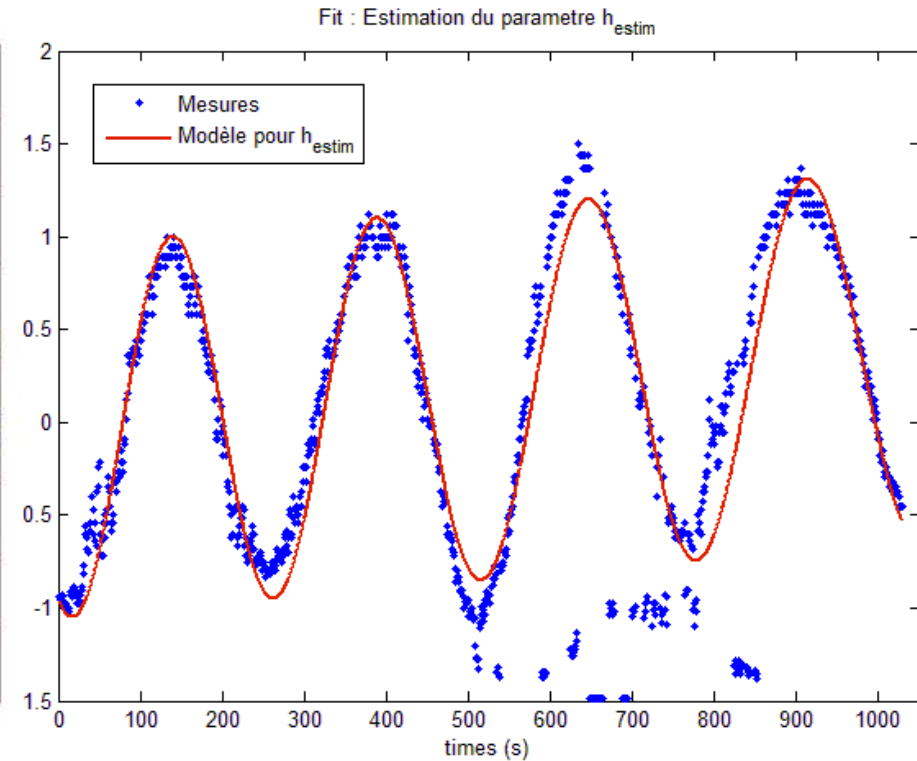
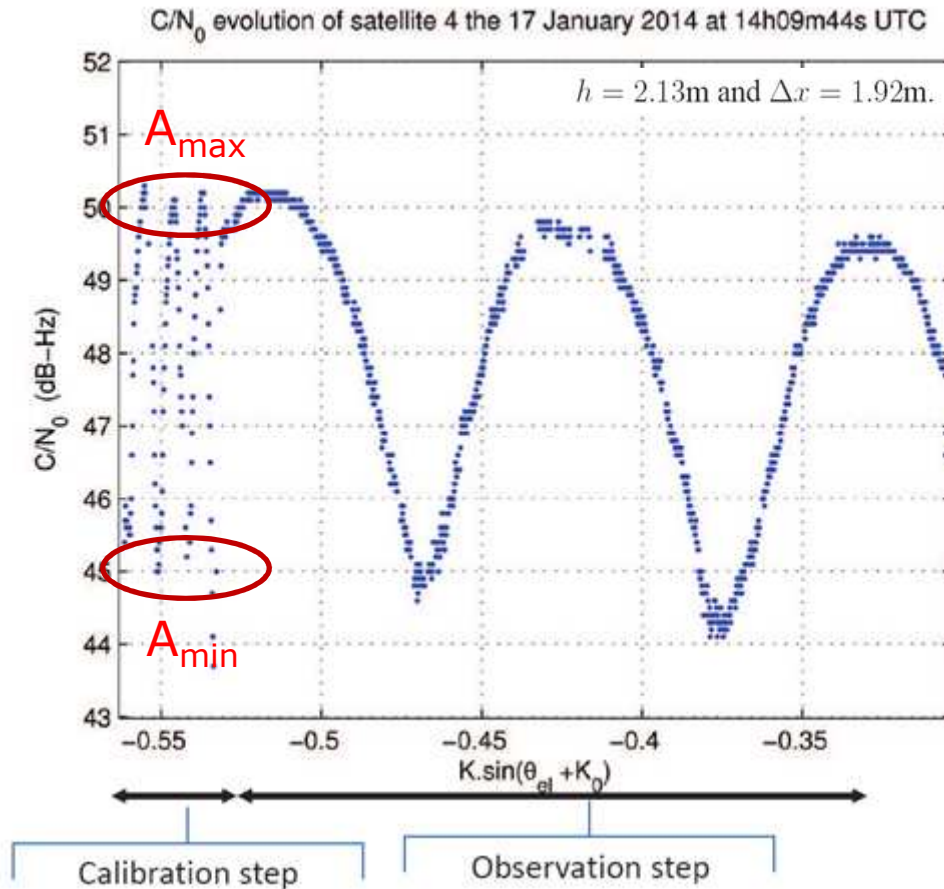


=> Il faut estimer A_s^D et A_s^R

Interference Pattern Technique

Calibration : mesures de A_{\max} , A_{\min} et estimation de A_s^D et A_s^R

Estimation : ajustement d'un modèle sur les observations



$$A^2 = (A_s^D)^2 + (A_s^R)^2 + 2A_s^D A_s^R \cos(\psi_s(t))$$

Interference Pattern Technique

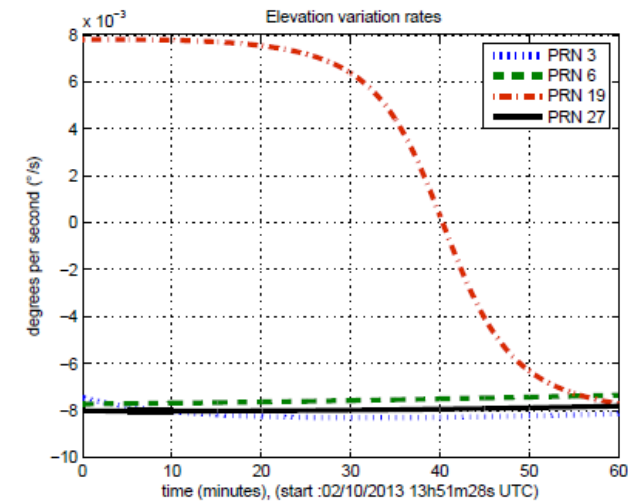
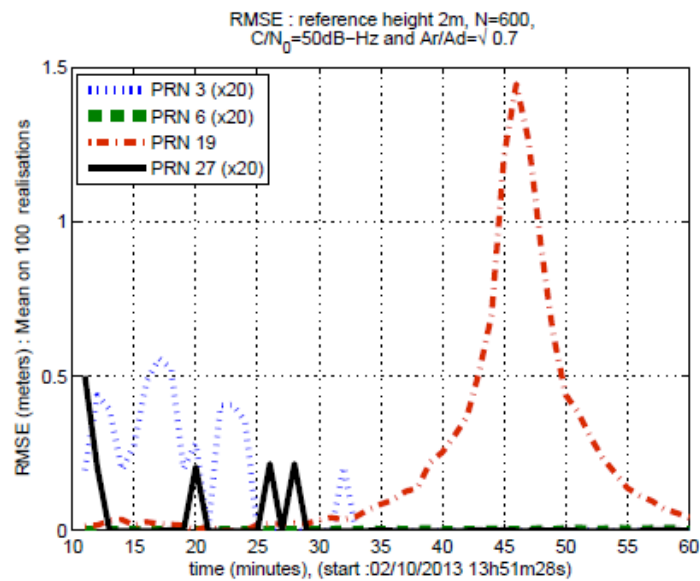
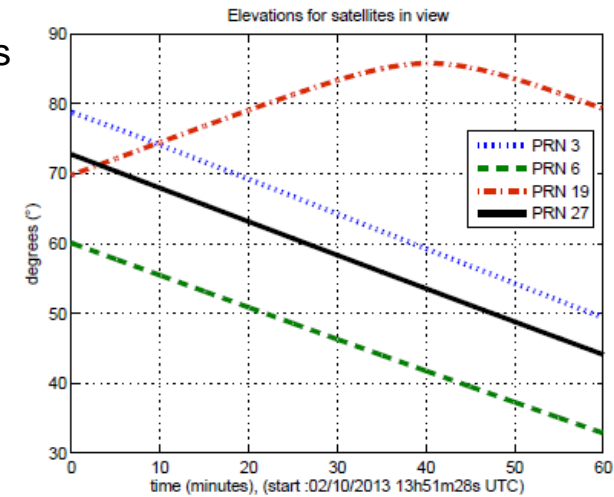
Borne de Cramér-Rao de l'estimateur proposé, appliquée à l'Interference Pattern Technique [4]

L'estimateur produit de mauvais résultats pour de faibles variations de $\sin(\theta_{el}^S)$. On observe une augmentation importante du RMSE pour :

- Une élévation importante
- Une faible vitesse de variation de θ_{el}^S

Une précision centimétrique est attendue pour :

- $20^\circ < \theta_{el}^S < 70^\circ$ et 600 s d'observations
- Vitesse de variation de θ_{el}^S supérieure à $2.10^{-3} \text{ } ^\circ.s^{-1}$



Expérimentation sur données réelles

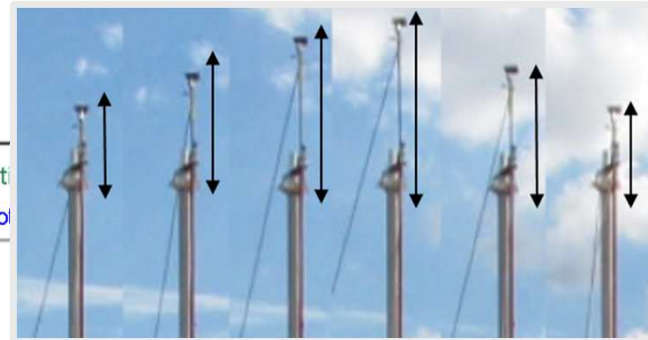
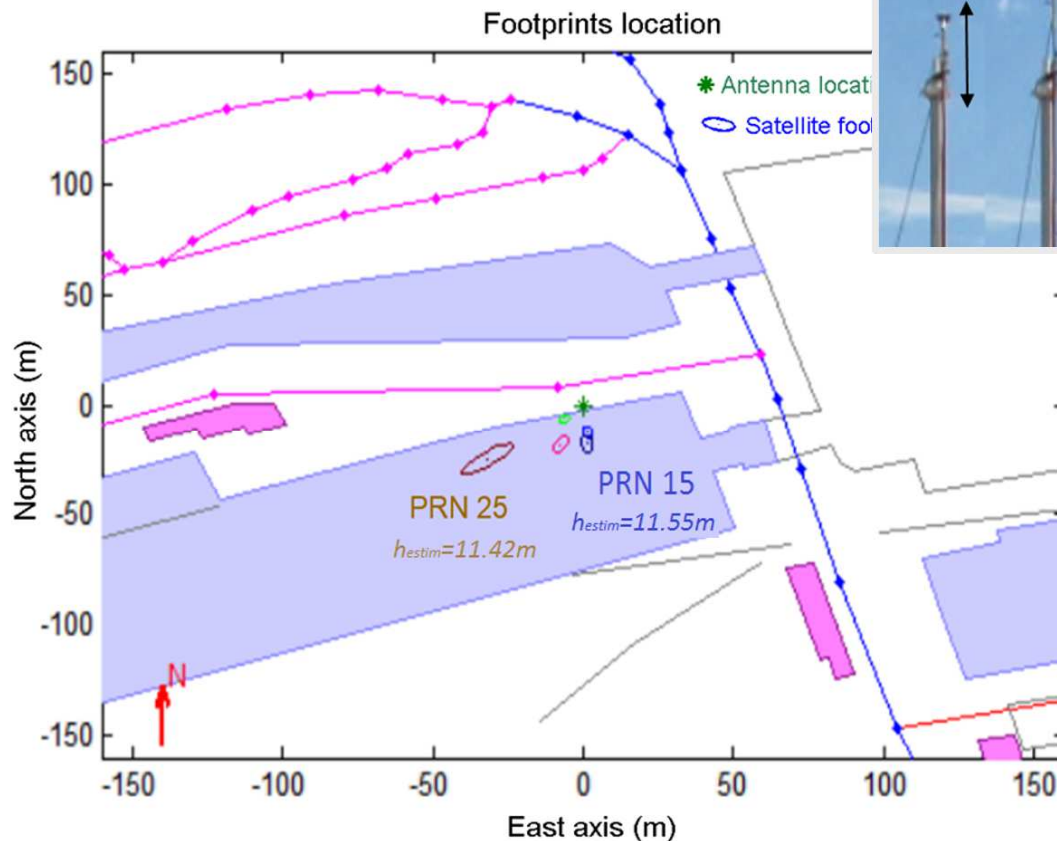
Les expérimentations sont menées dans le bassin Ouest de Calais (Quai Vermelem).

- La différence de hauteur entre la surface du bassin artificiel et les antennes est $h_{vraie} = 11,45 \text{ m}$.

- Seulement deux signaux GPS sont exploitables :

PRN 15, hauteur estimée $h_{estim,sat 15} = 11,42 \text{ m}$

PRN 25, hauteur estimée $h_{estim,sat 25} = 11,55 \text{ m}$

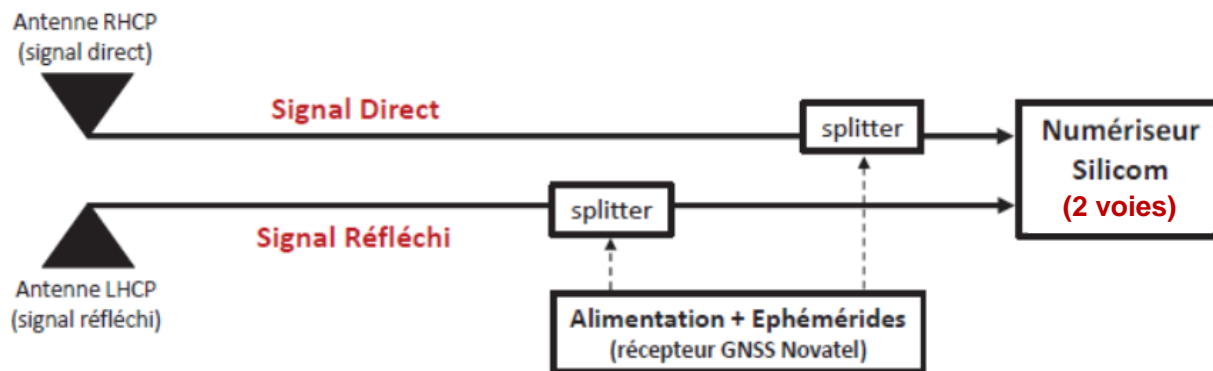


Plan

- Introduction
- Altimétrie par le SNR
- Altimétrie par le code
- Altimétrie par la phase
- Conclusion

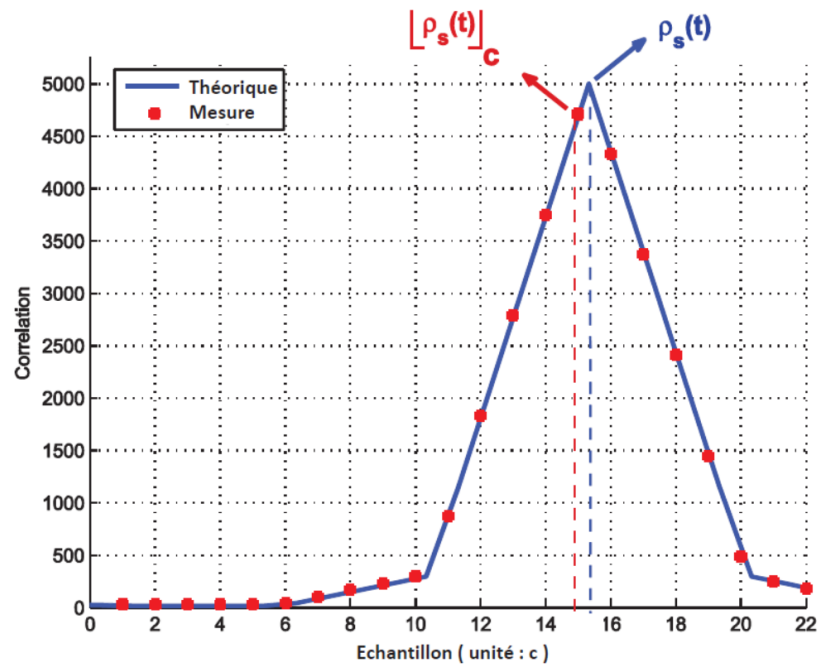
Estimateur sub-résolution de délai de code

Dispositif expérimental



(fréquence d'échantillonnage 25 MHz)

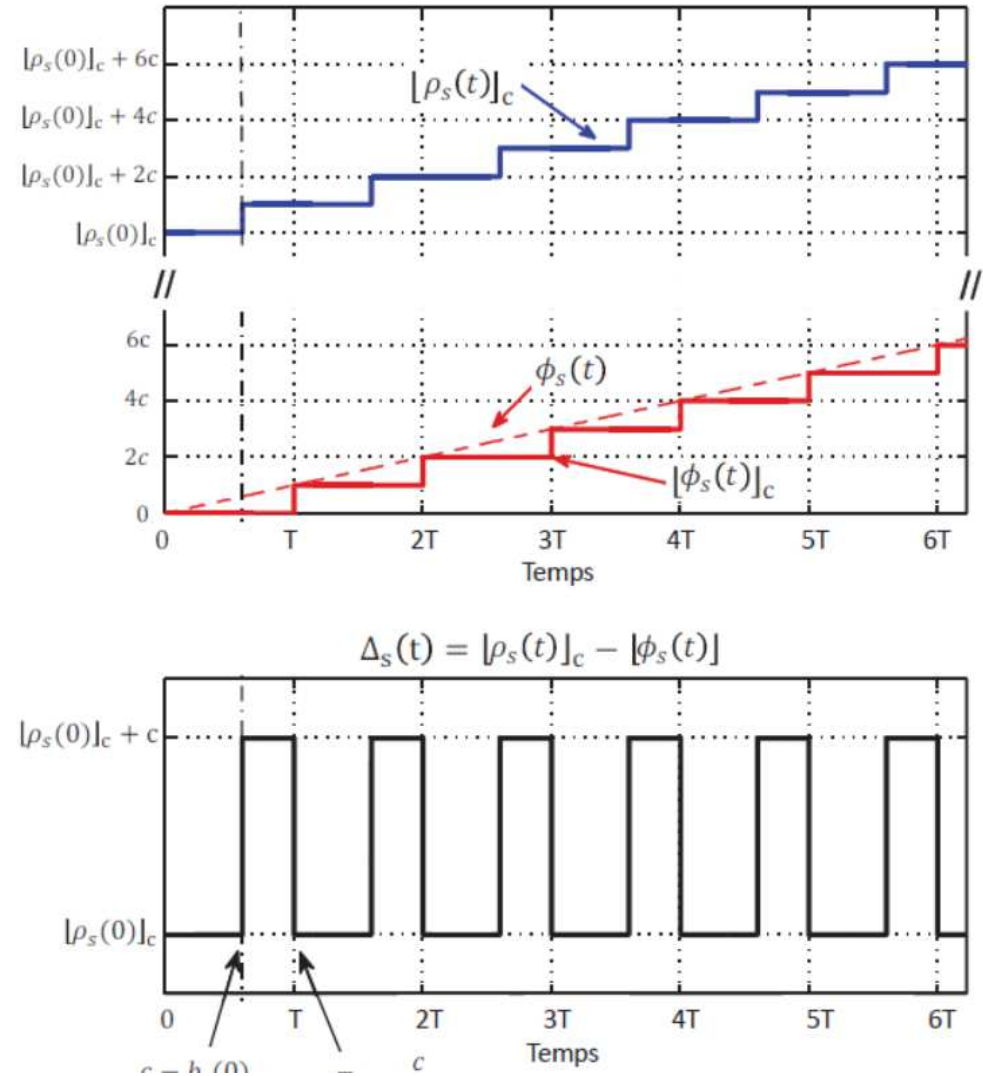
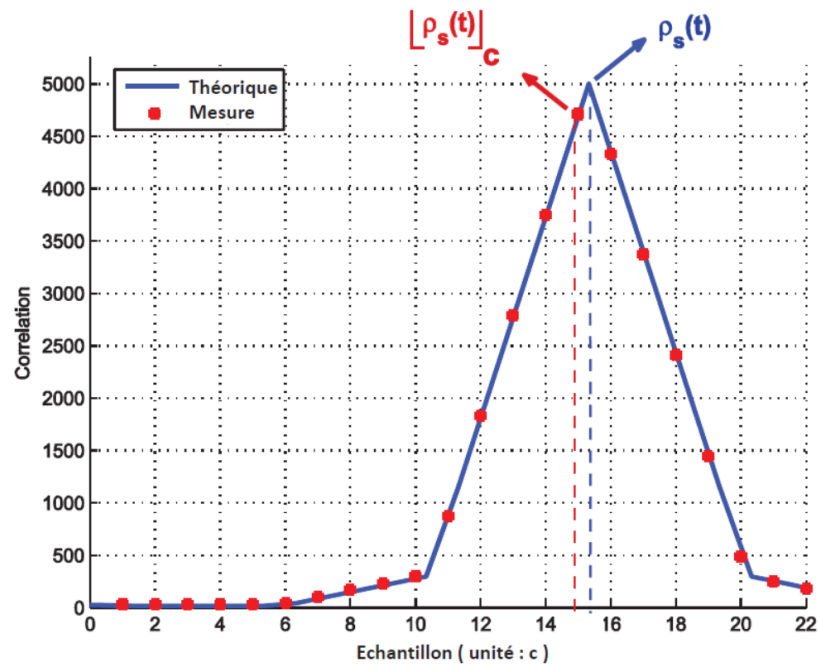
Estimateur sub-résolution de délai de code



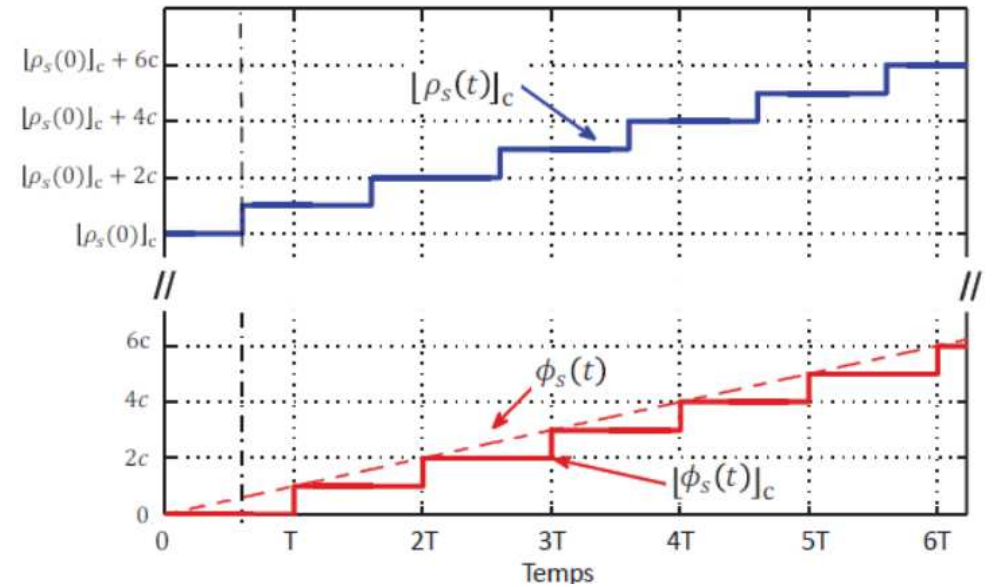
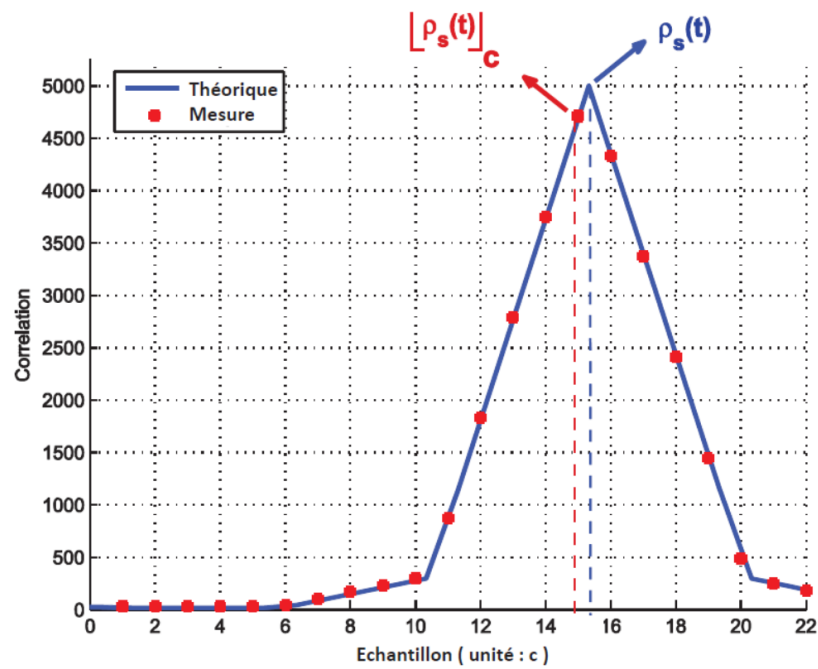
$$\Delta_s(t) = 2 h \sin(\theta_s^{el}(t)) = \rho_s^R(t) - \rho_s^D(t)$$

- *Résolution de la fonction de corrélation fixée à $c = 12$ m pour une fréquence d'échantillonnage de 25 MHz*

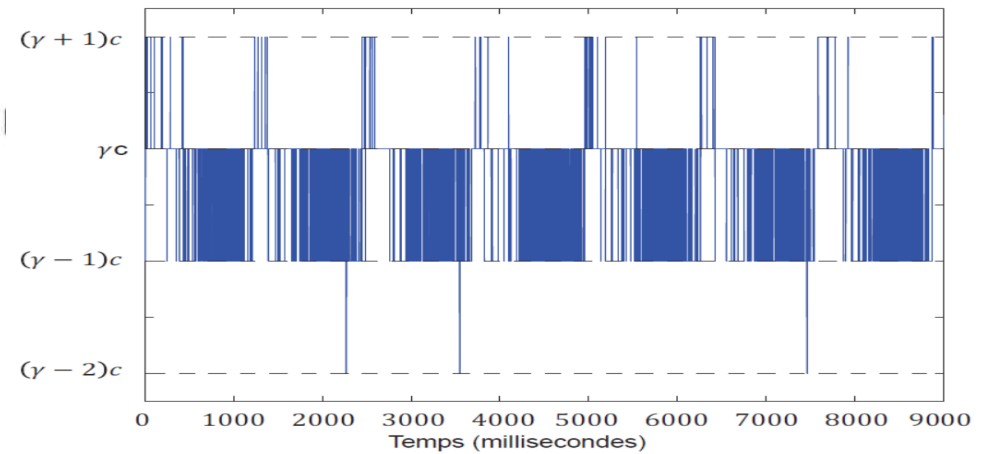
Estimateur sub-résolution de délai de code



Estimateur sub-résolution de délai de code



Fréquence Doppler $f_s^d \approx 51 \text{ Hz}$ et résolution $c = 11,99 \text{ m}$



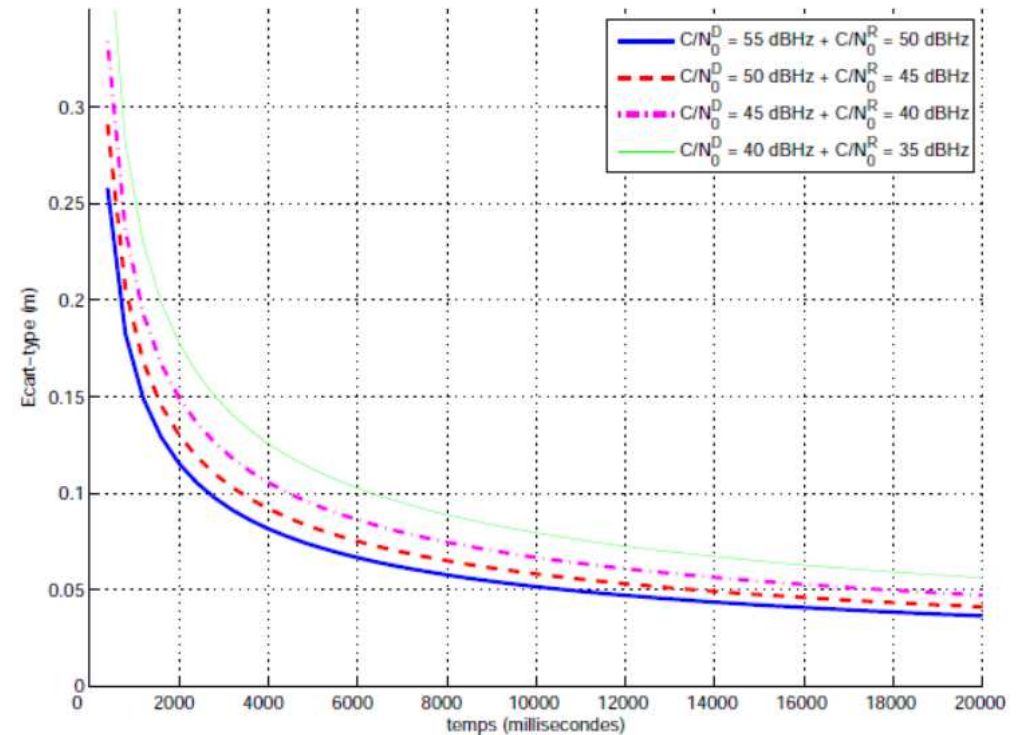
Estimateur sub-résolution de délai de code

Evaluation théorique :

$$h = \frac{\Delta_s(t)}{2 \sin(\theta_s^{el}(t))}$$

Une durée d'observation de 12 secondes est suffisante pour obtenir une estimation de δ_s avec une précision de l'ordre du centimètre

avec $c = 12 \text{ m}$



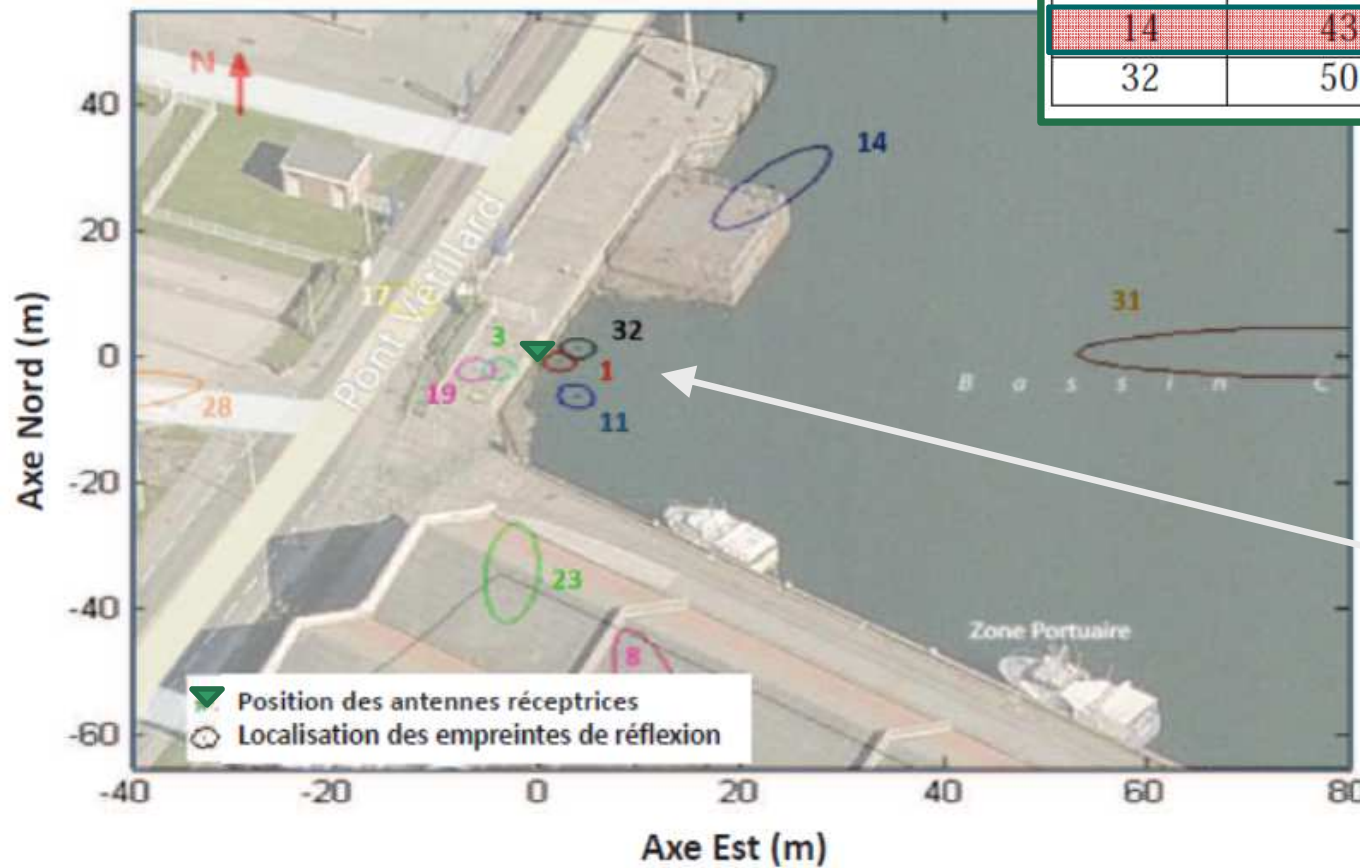
Temps de mesure (s)	4 s	8 s	12 s	16 s	20 s
Direct 55 dB-Hz et Réfléchi 50 dB-Hz	8.16 cm	5.77 cm	4.71 cm	4.08 cm	3.65 cm
Direct 50 dB-Hz et Réfléchi 45 dB-Hz	9.20 cm	6.51 cm	5.31 cm	4.6 cm	4.11 cm
Direct 45 dB-Hz et Réfléchi 40 dB-Hz	10.55 cm	7.46 cm	6.09 cm	5.28 cm	4.72 cm
Direct 40 dB-Hz et Réfléchi 35 dB-Hz	12.57 cm	8.88 cm	7.26 cm	6.28 cm	5.62 cm

Estimateur sub-résolution de délai de code

Expérimentation menée le 26 Octobre 2015
Au Bassin Carnot (Calais)

Satellites visibles et conditions d'expérimentation :

Satellite PRN	C/N_0 Direct (dB-Hz)	C/N_0 Réfléchi (dB-Hz)
1	51.2	46.9
11	50.2	45.2
14	43.5	35
32	50.9	47.3



Empreintes de réflexion exploitables

Estimateur sub-résolution de délai de code

Expérimentation menée le 26 Octobre 2015
Au Bassin Carnot (Calais)

Résultats

Satellite PRN	11h34m $h_{ref} = \underline{11,34 m}$		11h41m $h_{ref} = \underline{7,91 m}$		11h45m $h_{ref} = \underline{6,34 m}$	
	Hauteur estimée (m)	Elevation θ_s^e (°)	Hauteur estimée (m)	Elevation θ_s^e (°)	Hauteur estimée (m)	Elevation θ_s^e (°)
1	11.51	81.31	7.87	77.96	6.28	76.30
11	11.40	60.93	7.82	57.34	6.27	55.59
32	11.42	71.05	7.91	67.72	6.48	66.08

11.44 mètres avec
un écart de 6 à 17 cm

7.91 mètres avec un
écart de 0 à -9 cm

6.36 mètres avec un
écart de -7 à 14 cm

- Temps d'intégration 13,9 secondes
- Résolution de la fonction de corrélation fixée $c = 12 m$

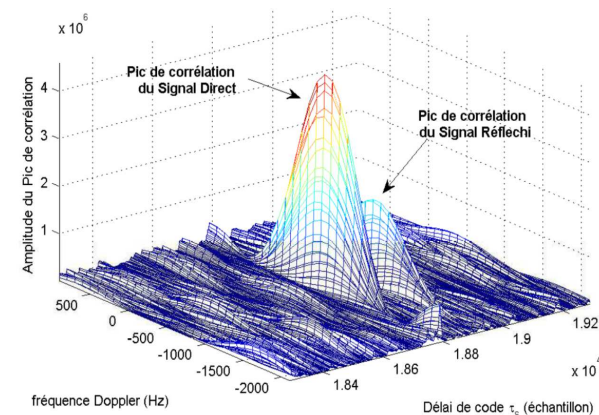
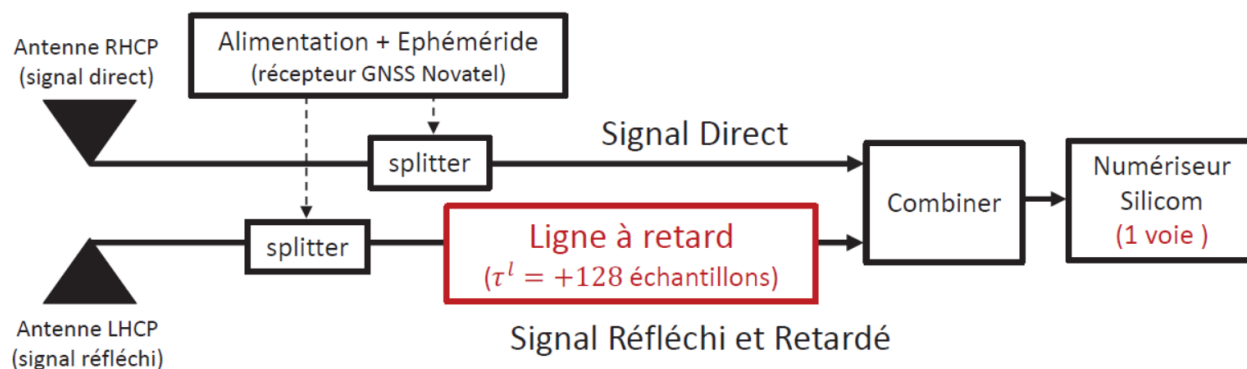
Plan

- Introduction
- Altimétrie par le SNR
- Altimétrie par le code
- Altimétrie par la phase
- Conclusion

Altimétrie par la phase

Dispositif expérimental

- Une seule voie de numérisation (pas de synchronisation)
- Utilisation d'une ligne à retard pour séparer les pics de corrélation des signaux direct et réfléchi (Bobine de fibre optique de 1 Km)
- Récepteur bas coût et léger (500g-400g)



Régression linéaire-circulaire : maximum de vraisemblance

On observe la différence de phase entre les signaux réfléchi et direct :

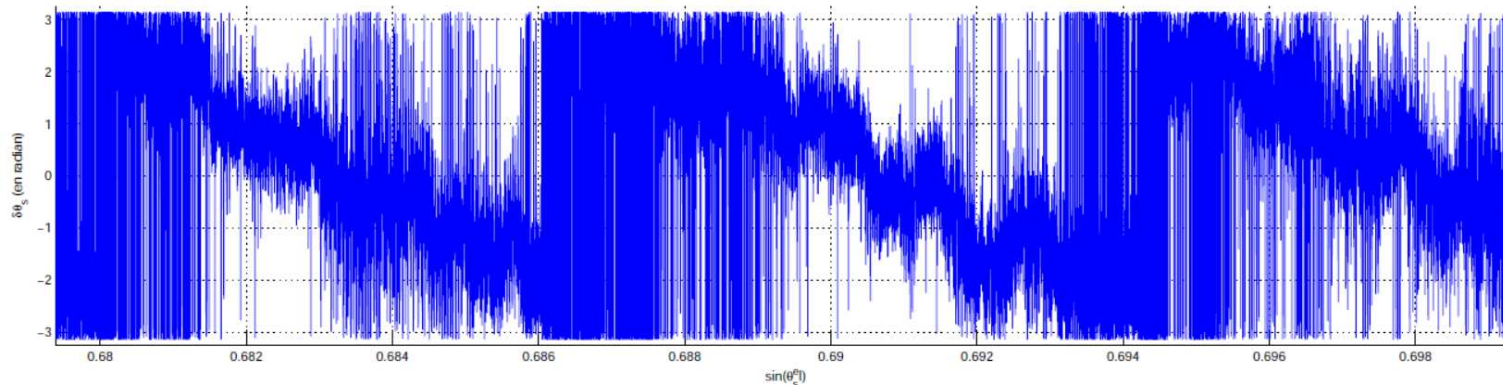
$$\psi_s(t) = \left(\frac{4\pi}{\lambda} h \sin(\theta_s^{el}(t)) \right) \text{mod}(2\pi)$$

On considère des mesures linéaires-circulaires affectées d'un bruit de von Mises :

$$y_k = \alpha + \beta x_k + \epsilon_k \pmod{2\pi}$$

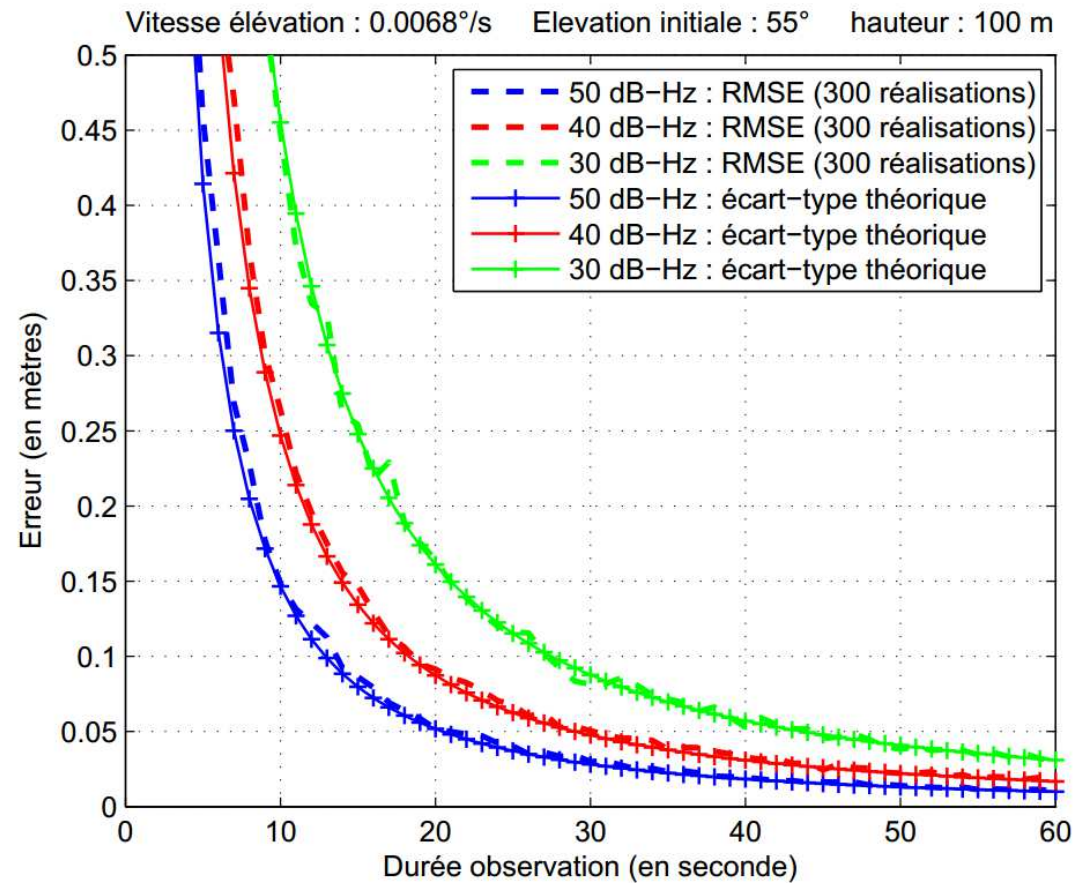
On cherche à estimer α et β , les paramètres de régression, de manière optimale au sens du maximum de vraisemblance. Vraisemblance pour n mesures :

$$\begin{aligned} L(y_1, \dots, y_n) &= f(y_1/\alpha, \beta, \kappa) \dots f(y_n/\alpha, \beta, \kappa) \\ &= \frac{1}{(2\pi I_0(\kappa))^n} \exp\left(\kappa \sum_{k=1}^n \cos(y_k - (\alpha + \beta x_k))\right) \end{aligned}$$



Régression linéaire-circulaire : évaluation

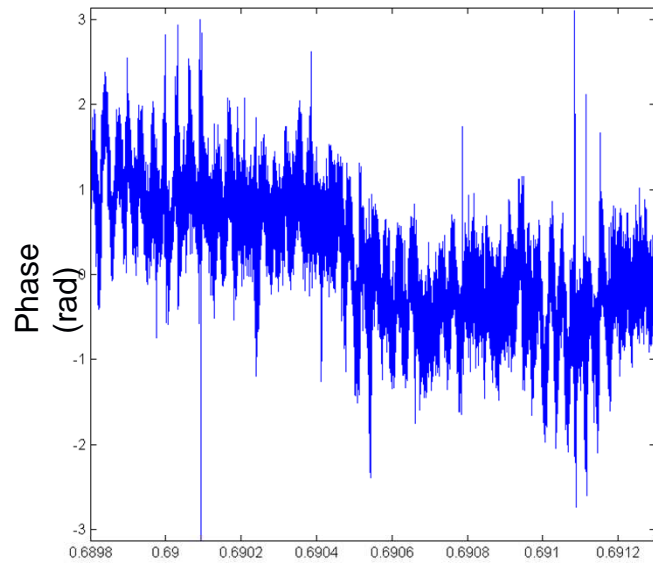
$$\text{Variance théorique : } \text{var}(\hat{h}) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sigma_y^2}{\sum_{n=0}^{N-1} \left(\sin(\theta_s^{el}[n]) - \overline{\sin(\theta_s^{el})} \right)^2}$$



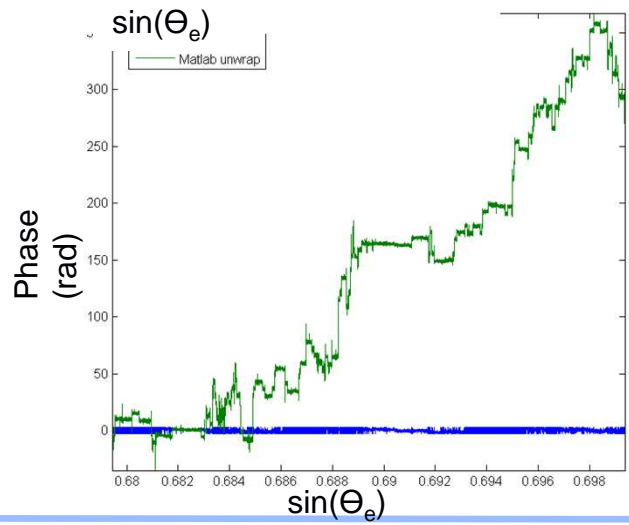
(sans biais)

Estimateur sub-résolution de délai de code

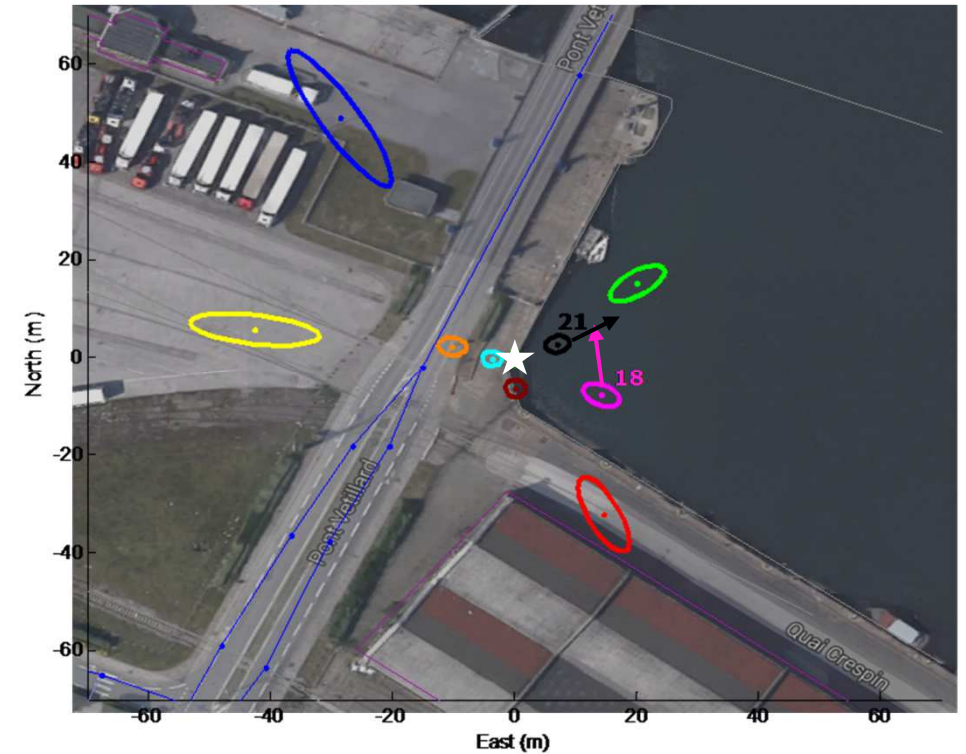
2016/06/30 – de 15h25 à 15h51 (UTC)



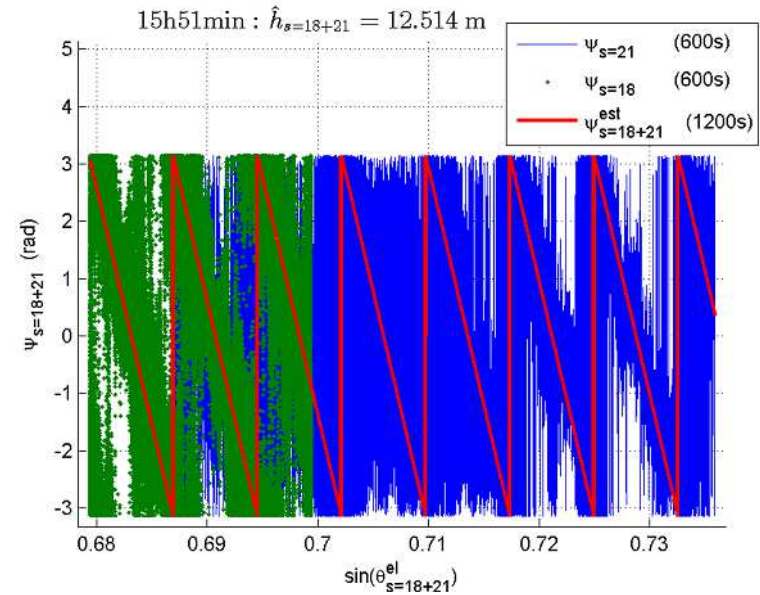
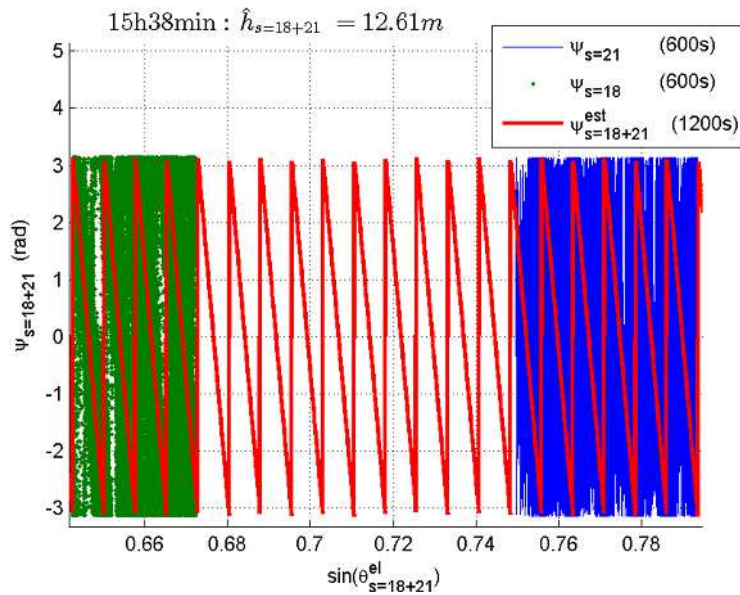
Résultats de déroulement



Position des empreintes



Expérimentation sur données réelles : résultats et fusion



Résultats bruts :

	15h25min $h_{ref} = 12.60m$	15h38min $h_{ref} = 12.60m$	15h51min $h_{ref} = 12.60m$
Satellite PRN	Estimated Height \hat{h} (m)	Estimated Height \hat{h} (m)	Estimated Height \hat{h} (m)
18	12.683	12.872	13.024
21	12.647	12.486	12.363

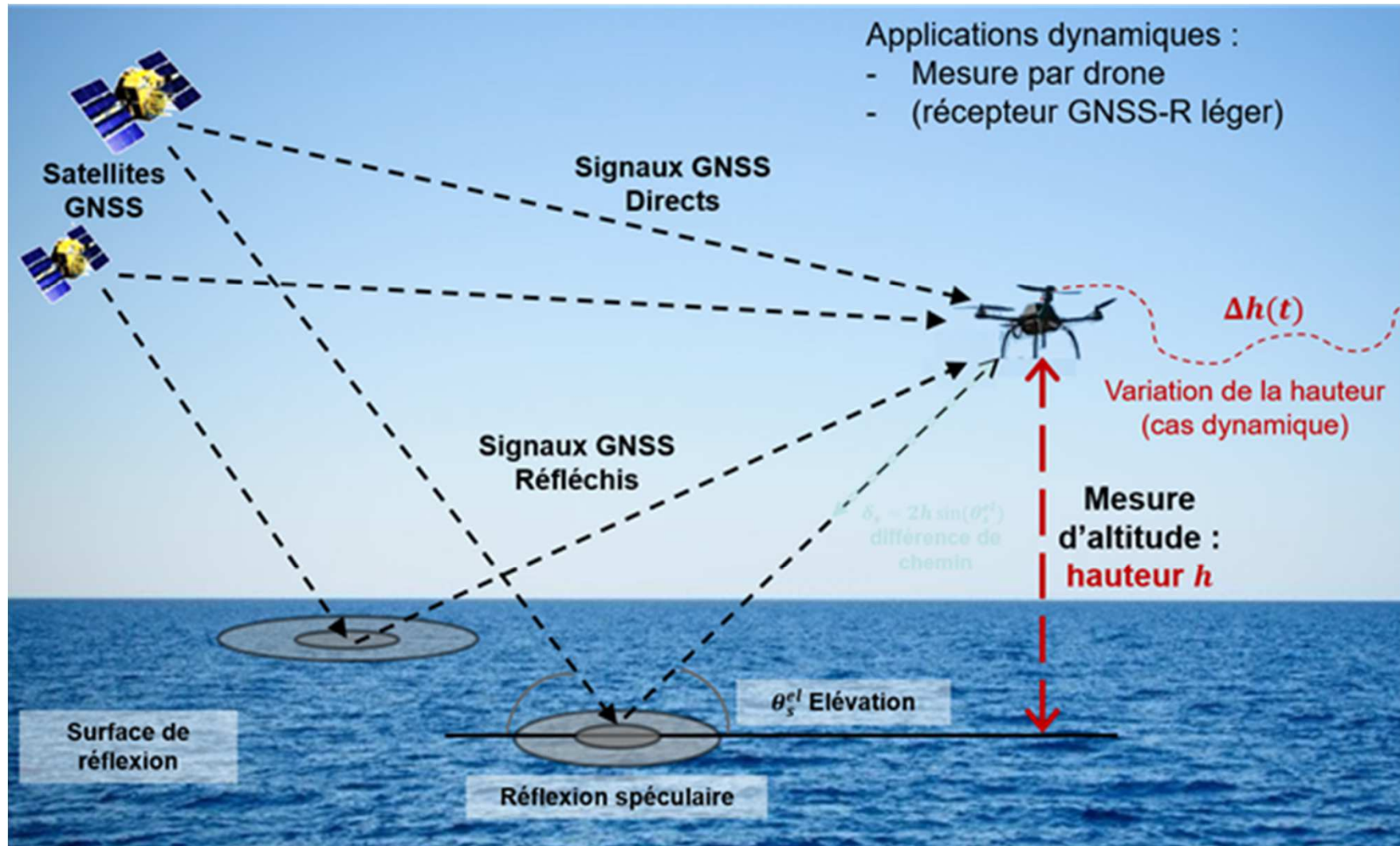
Fusion sur 2 satellites :

18 + 21	12.609	12.610	12.514
---------	--------	--------	--------

Durée d'intégration :

Sat. : 18 + 21	15 s	30 s	50 s	100 s	150 s	300 s	600 s
15h25min	8.802	12.627	12.618	12.620	12.612	12.615	12.609
15h38min	7.542	12.617	12.614	12.613	12.623	12.621	12.610
15h51min	16.014	12.559	12.534	12.536	12.549	12.551	12.514

Conclusion



Bibliographie

- [7] J-C. KUCWAJ, S. REBOUL, G. STIENNE, J-B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, Circular Regression Applied to GNSS-R Phase Altimetry, *Remote Sensing*, 9(7):651. 2017
- [6] K. EL MOKHTARI, S. REBOUL, J.B. Choquel, G. STIENNE, B. AMAMI, M. BENJELLOUN, Circular particle fusion filter applied to map matching, *IET Intelligent Transport Systems*, 2017.
- [5] J-C KUCWAJ, G. STIENNE, S. REBOUL, J. -B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, Accurate pseudo-range estimation by means of code and phase delay integration : Application to GNSS-R Altimetry, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)*, 9(10), pp. 4854-4864, 2016.
- [4] M.A. RIBOT, J-C KUCWAJ, C. BOTTERON, S. REBOUL, G. STIENNE, J. LECLERE, J. -B. CHOQUEL, P.-A. FARINE, M. BENJELLOUN, Normalized GNSS Interference Pattern Technique for Altimetry, *Sensors*, 14, pp. 10234-10257, 2014. **Article réalisé en collaboration avec l'EPFL.**
- [3] G. STIENNE, S. REBOUL, J. -B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, Cycle Slip Detection and Repair with a Circular On-Line Change-Point Detector, *Signal Processing*, 100, pp. 51-63, 2014.
- [2] G. STIENNE, S. REBOUL, J. -B. CHOQUEL, M. BENJELLOUN, Cycle Slip Detection and Repair with a Circular On-Line Change-Point Detector, *Signal Processing*, 100, pp. 51-63, 2014.
- [1] S. BOUTOILLE, S. REBOUL, M. BENJELLOUN, A hybrid fusion system applied to off-line detection and change-points estimation, *Information Fusion* 11 (4), pp. 325-337, 2010.