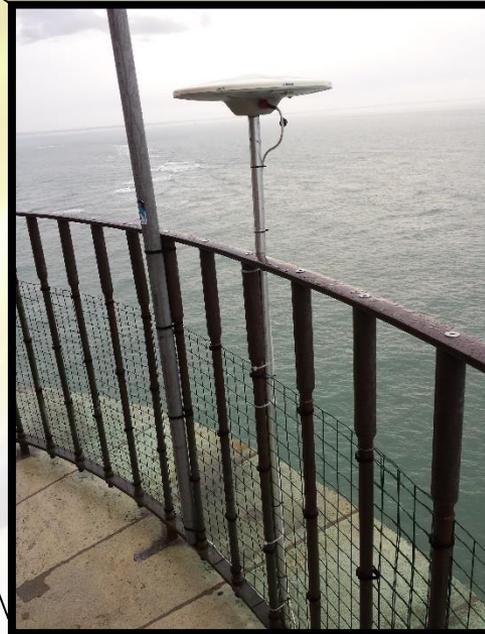


# Utilisation d'une antenne GNSS pour mesurer les variations du niveau marin par réflectométrie

## ➤ Etude de cas : le phare de Cordouan

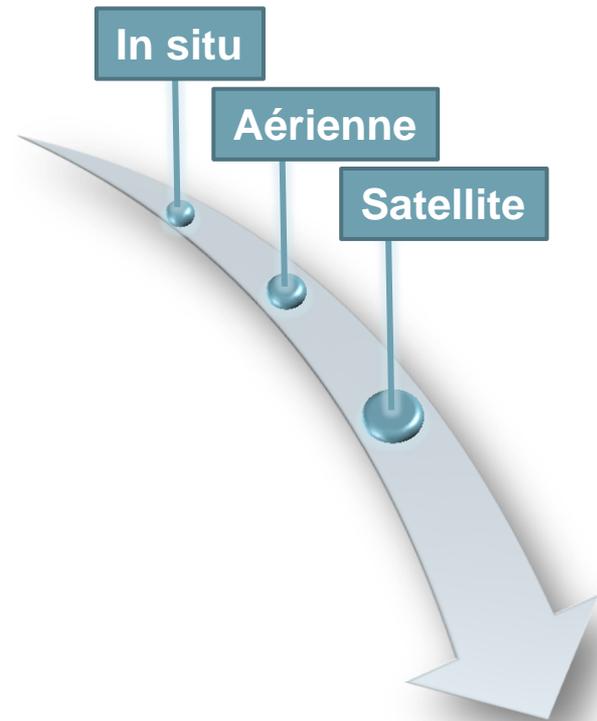
N. Roussel  
F. FRAPPART  
G. RAMILLIEN  
J. DARROZES  
R. BIANCALE  
L. LESTARQUIT

2 février 2016



# Observation du niveau de la mer

	In Situ (marégraphes)	Satellite (e.g., Altika)
Couverture	+	+++ (offshore)
Résolution spatiale	+++	++ (174 m)
Résolution temporelle	+++	+ (35 jours)
Précision	+++	+++ (1 cm)

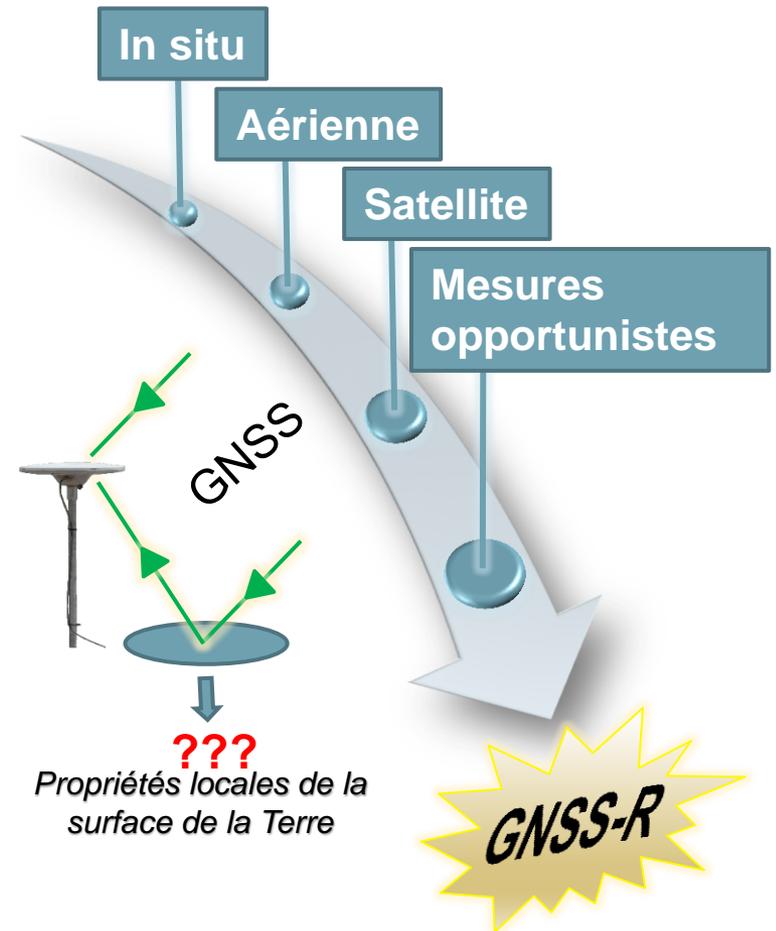


→ Besoin d'un nouvel outil *complémentaire*

# Observation du niveau de la mer

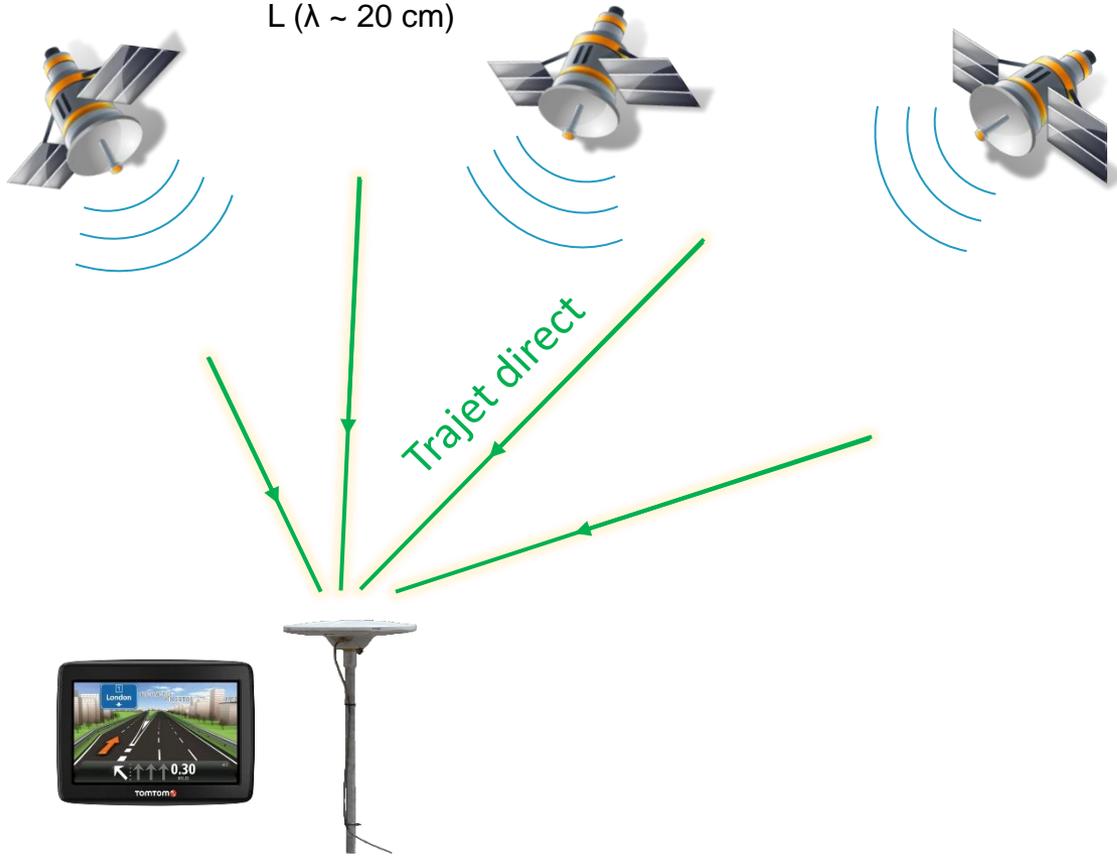
	In Situ (marégraphes)	Satellite (e.g., AltiKa)
Couverture	+	+++ (offshore)
Résolution spatiale	+++	++ (174 m)
Résolution temporelle	+++	+ (35 jours)
Précision	+++	+++ (1 cm)

→ Besoin d'un nouvel outil *complémentaire*



# “GPS” → GNSS

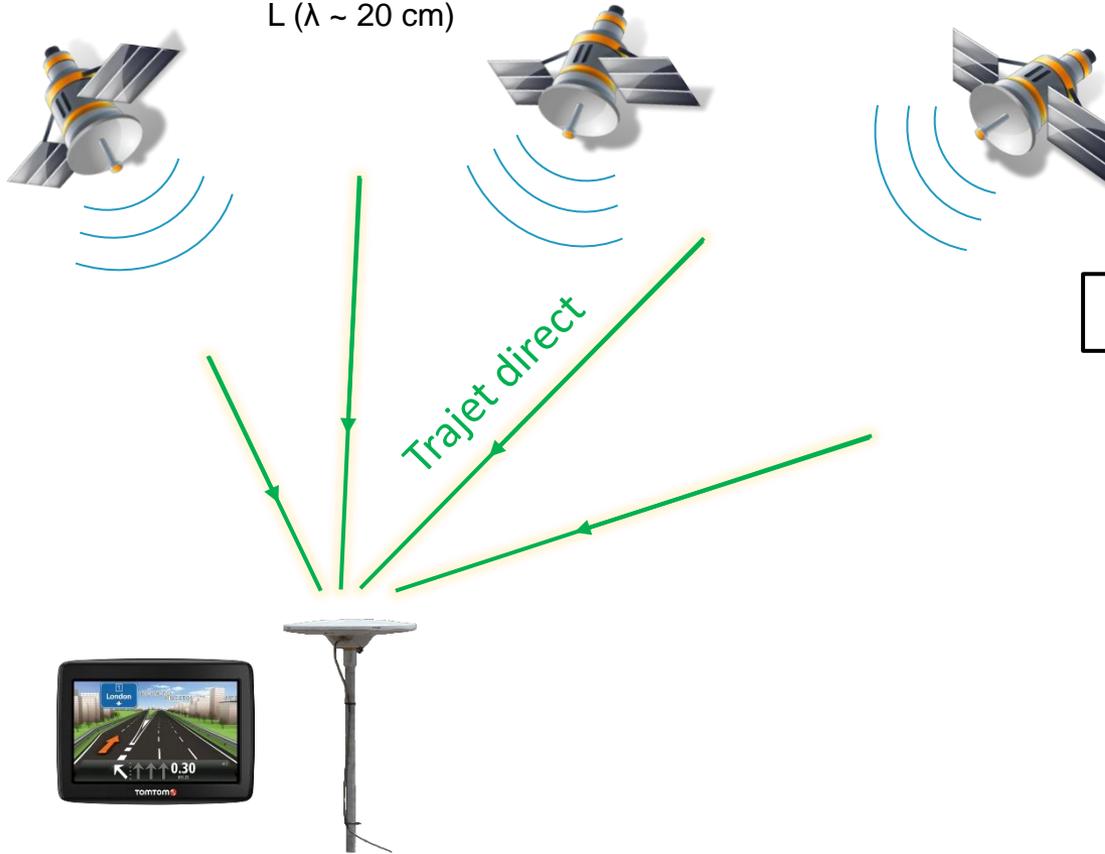
L ( $\lambda \sim 20$  cm)



Satellites GNSS =  
GPS (~30) + GLONASS (~25) + Galileo (~5) + ...

# “GPS” → GNSS

L ( $\lambda \sim 20$  cm)



Satellites GNSS =  
GPS (~30) + GLONASS (~25) + Galileo (~5) + ...

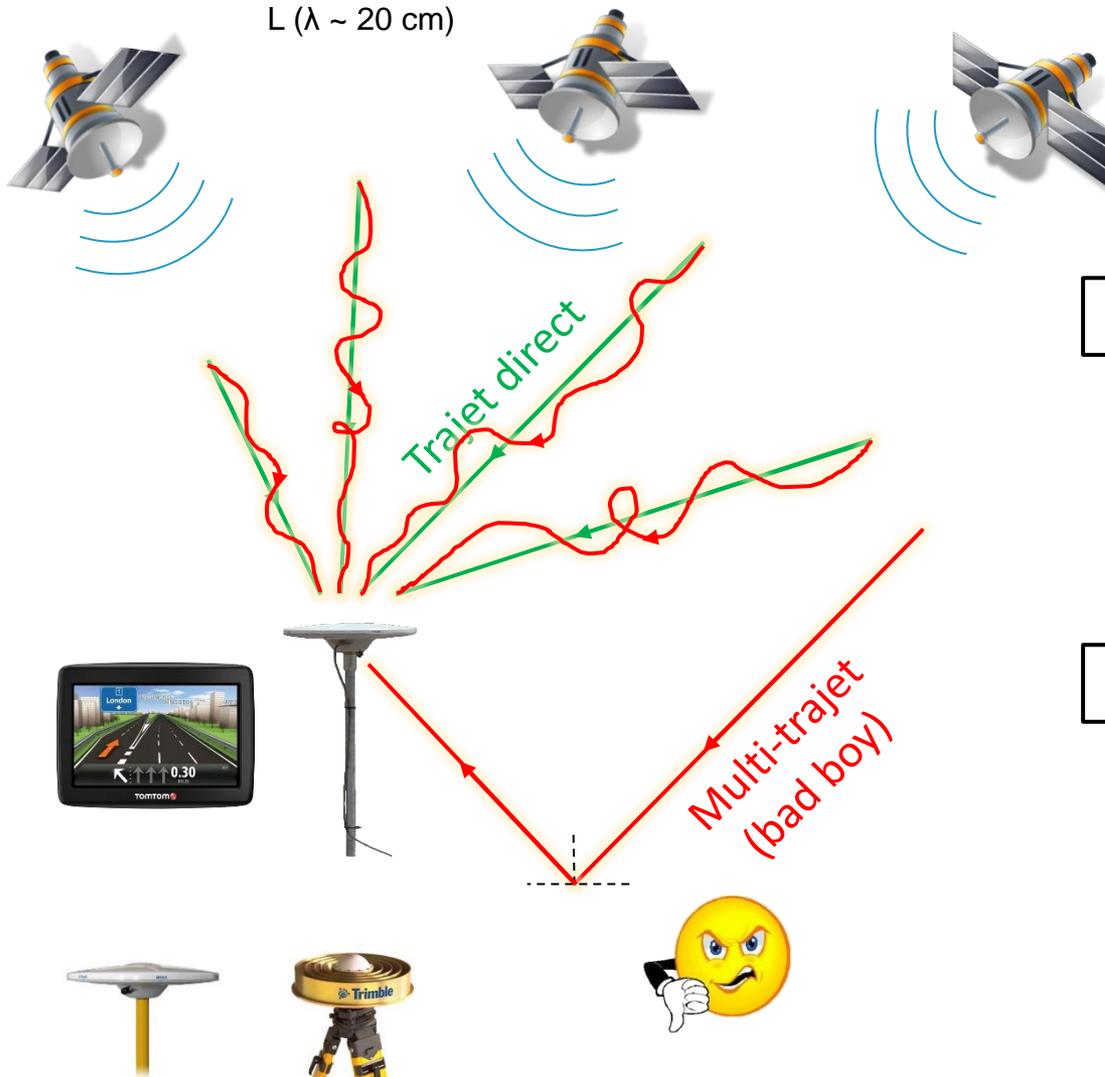
Positionnement

En théorie

4 inconnues :  $(X, Y, Z)_{\text{récepteur}}$  +  
biais d'horloge  
→ 4 satellites minimum

# “GPS” → GNSS

L ( $\lambda \sim 20$  cm)



Satellites GNSS =

GPS (~30) + GLONASS (~25) + Galileo (~5) + ...

Positionnement

En théorie

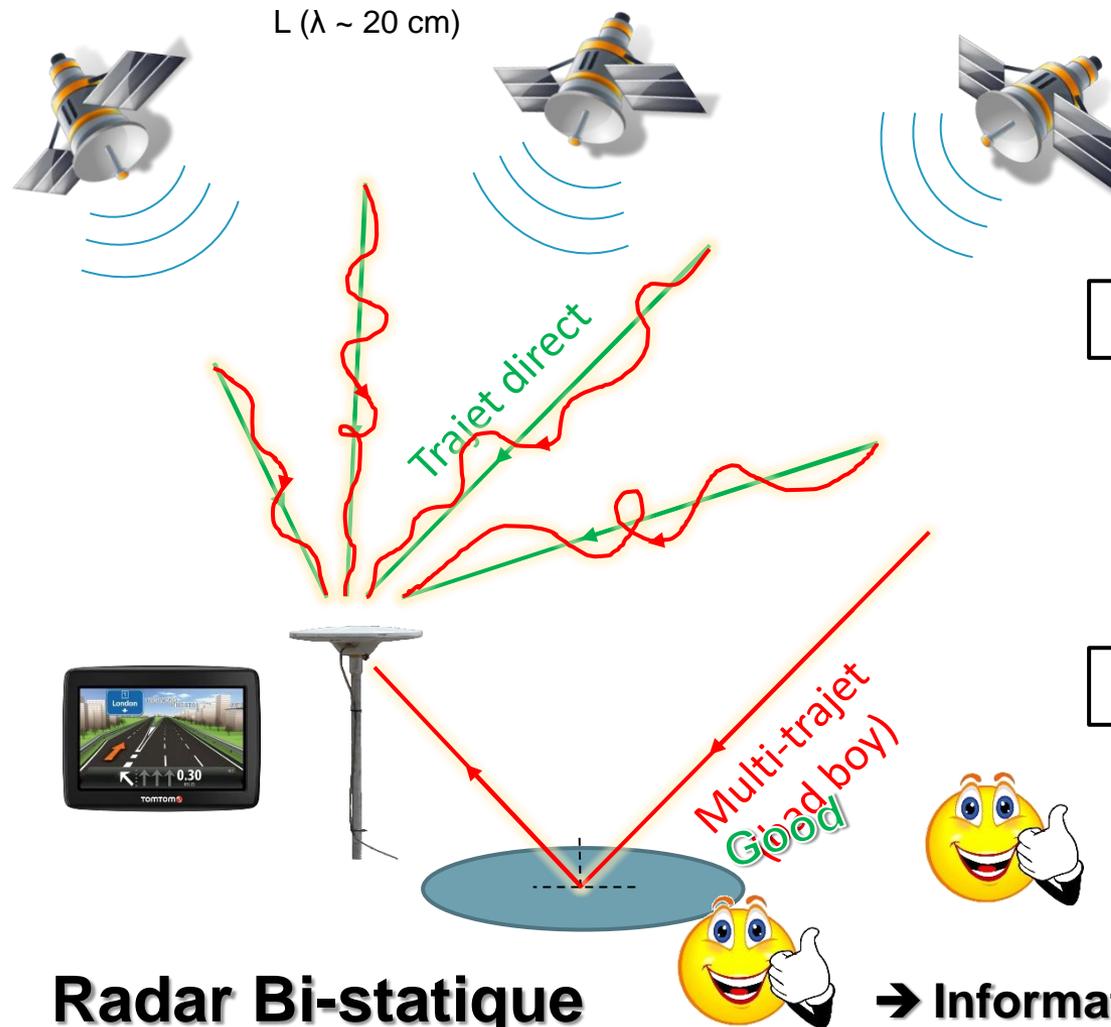
4 inconnues :  $(X, Y, Z)_{\text{récepteur}}$  +  
biais d'horloge

→ 4 satellites minimum

Real life

$\epsilon_{\text{tropo}} + \epsilon_{\text{iono}} + \epsilon_{\text{pos\_sat}} +$   
 $\epsilon_{\text{multitrajet}} + \dots$

# GNSS-R



Satellites GNSS =  
GPS (~30) + GLONASS (~25) + Galileo (~5) + ...

Positionnement

En théorie

4 inconnues :  $(X, Y, Z)_{\text{récepteur}}$  +  
biais d'horloge  
→ 4 satellites minimum

Real life

$\epsilon_{\text{tropo}} + \epsilon_{\text{iono}} + \epsilon_{\text{pos\_sat}} +$   
 $\epsilon_{\text{multitrajet}} + \dots$

**Radar Bi-statique**

→ Informations sur la surface de réflexion

# GNSS-R : pour quoi?

Modifié de Zavorotny et al. (2015)

Applications	Au sol	Aéroportée	Satellites	Rérérences
Altimétrie océanique	Oui	Oui	Oui	Phase: [1], [2], [3] Code: [4], [5], [6]
Rugosité/ Diffusiométrie	Oui	Oui	Oui	[7], [8], [9]
Permittivité océan (salinité/température)	?	?	?	[10], [11]
Humidité / Végétation	Oui	Oui	?	[12], [13], [14]
Neige	Oui	?	?	[15], [16], [17]
Glace	Oui	Oui	Oui	[18], [19], [20]
Troposphere/ionosphere	Non	Non	?	[21], [22]

[1] Martin-Neira et al. (2002), [2] Semmling et al. (2012), [3] Treuhaft et al.. (2001), [4] Carreno-Luengo et al. (2014), [5] Ruffini et al. (2004), [6] Cardellach et al. (2014) [7] Garrison et Katsberg (1998), [8] Cardellach et al. (2003), [9] Germain et al. (2004), [10] Zavorotny et Voronovitch (1999), [11] Cardellach et al. (2006), [12] Katzberg et al. (2005), [13] Larson et al. (2010), [14] Ferrazzoli et I. (1995), [15] Larson et al. (2009), [16] Gutmann et al. (2012), [17] Jacobson (2010), [18] Semmling et al. (2011), [19] Fabra et al. (2012), [20] Fabra (2013), [21] Boniface et Cardellach (2011), [22] Pallares et al. (2005)

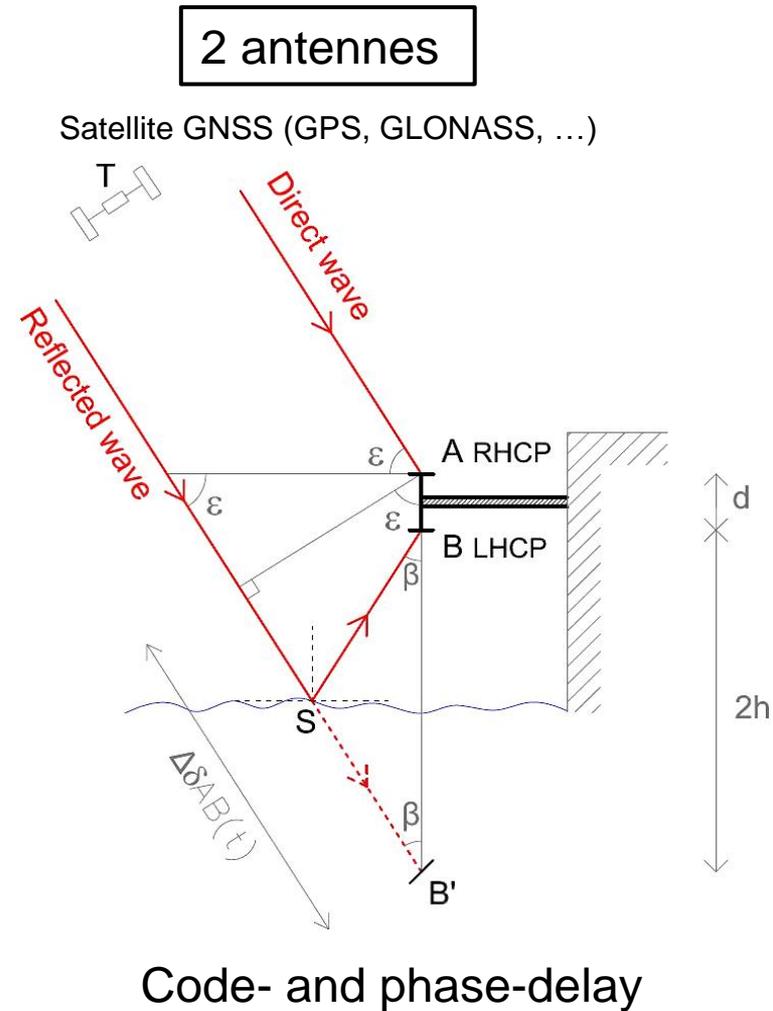
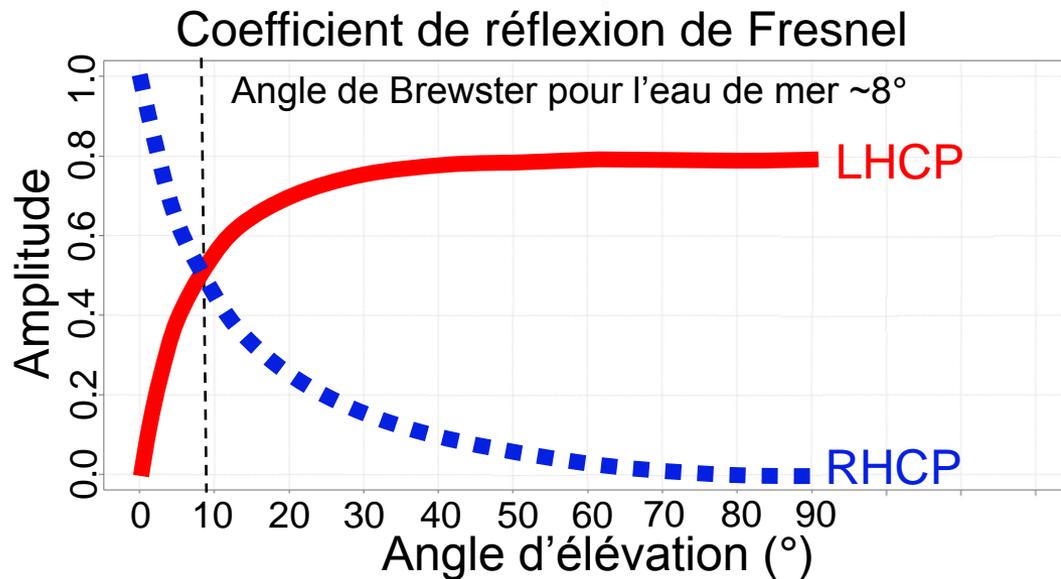
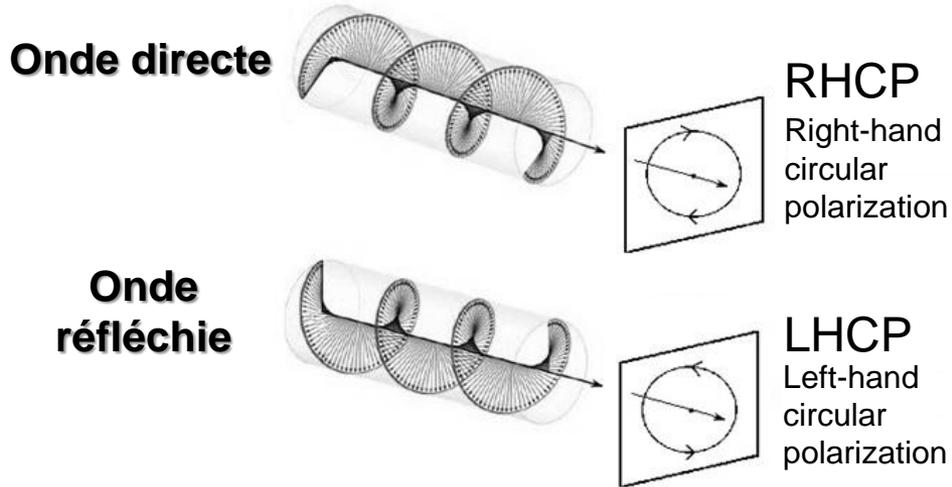
# GNSS-R : pour quoi?

Modifié de Zavorotny et al. (2015)

Applications	Au sol	Aéroportée	Satellites	Références
Altimétrie océanique	Oui	Oui	Oui	Phase: [1], [2], [3] Code: [4], [5], [6]
Rugosité/ Diffusiométrie	Oui	Oui	Oui	[7], [8], [9]
Permittivité océan (salinité/température)	?	?	?	[10], [11]
Humidité / Végétation	Oui	Oui	?	[12], [13], [14]
Neige	Oui	?	?	[15], [16], [17]
Glace	Oui	Oui	Oui	[18], [19], [20]
Troposphere/ionosphere	Non	Non	?	[21], [22]

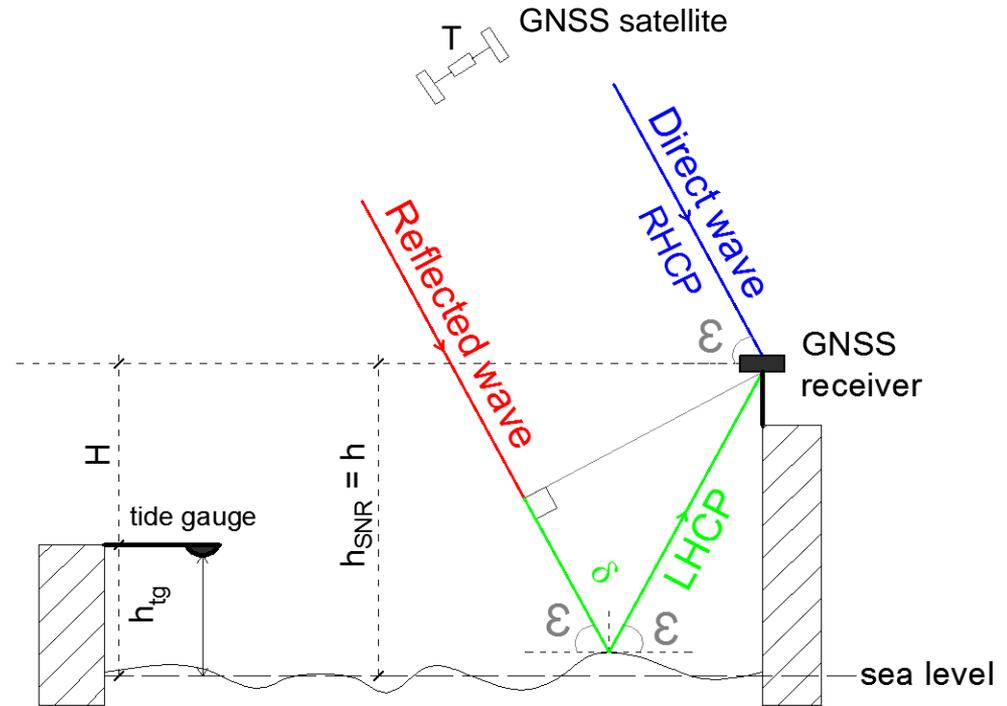
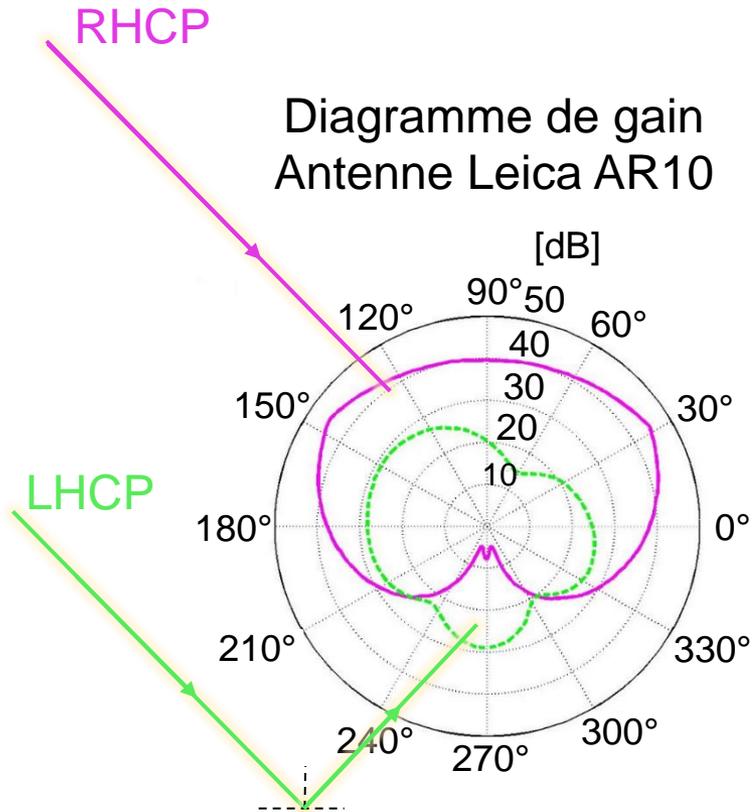
[1] Martin-Neira et al. (2002), [2] Semmling et al. (2012), [3] Treuhaft et al.. (2001), [4] Carreno-Luengo et al. (2014), [5] Ruffini et al. (2004), [6] Cardellach et al. (2014) [7] Garrison et Katsberg (1998), [8] Cardellach et al. (2003), [9] Germain et al. (2004), [10] Zavorotny et Voronovitch (1999), [11] Cardellach et al. (2006), [12] Katzberg et al. (2005), [13] Larson et al. (2010), [14] Ferrazzoli et I. (1995), [15] Larson et al. (2009), [16] Gutmann et al. (2012), [17] Jacobson (2010), [18] Semmling et al. (2011), [19] Fabra et al. (2012), [20] Fabra (2013), [21] Boniface et Cardellach (2011), [22] Pallares et al. (2005)

# GNSS-R : 1<sup>ère</sup> technique



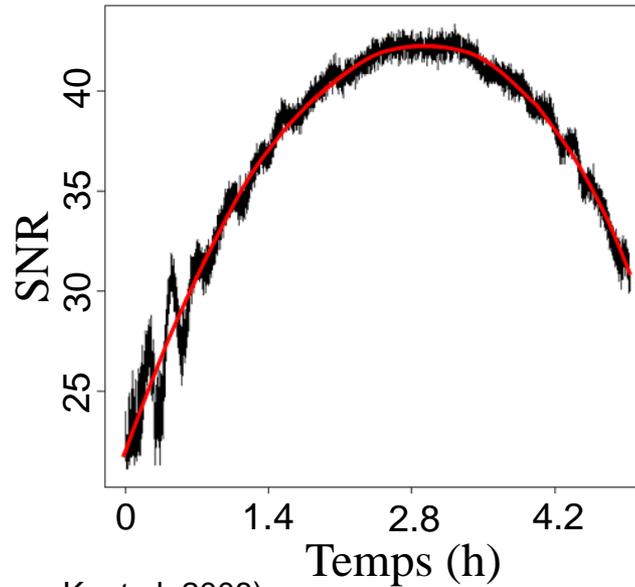
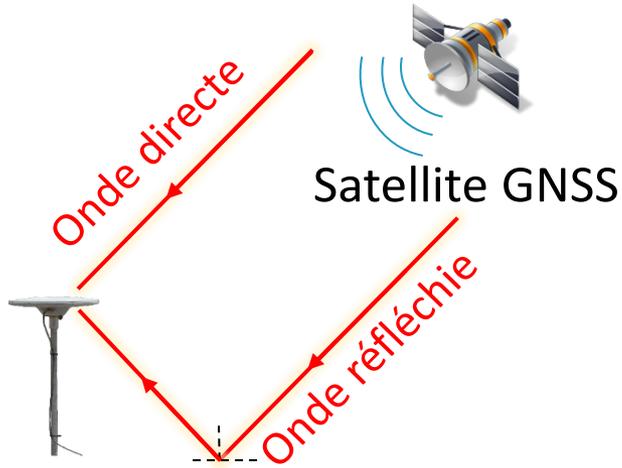
# GNSS-R : 2<sup>ème</sup> technique

1 antenne



$$SNR = \frac{\text{signal}}{\text{bruit}}$$

# Comment ça marche ?



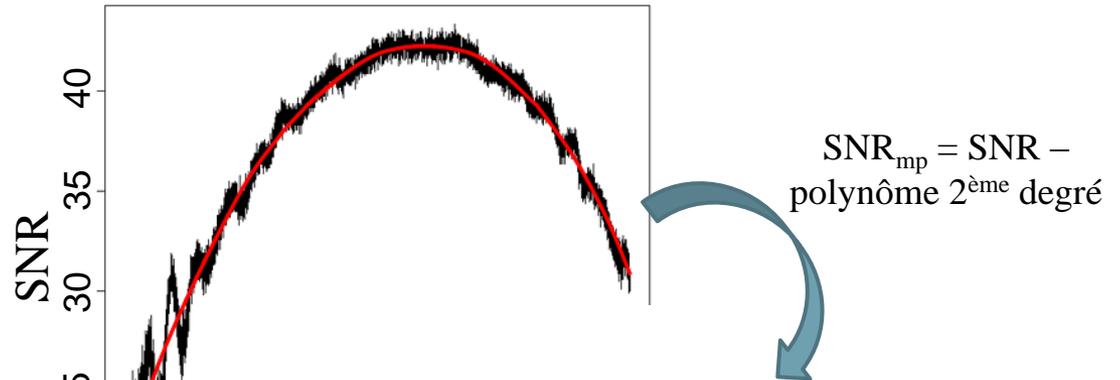
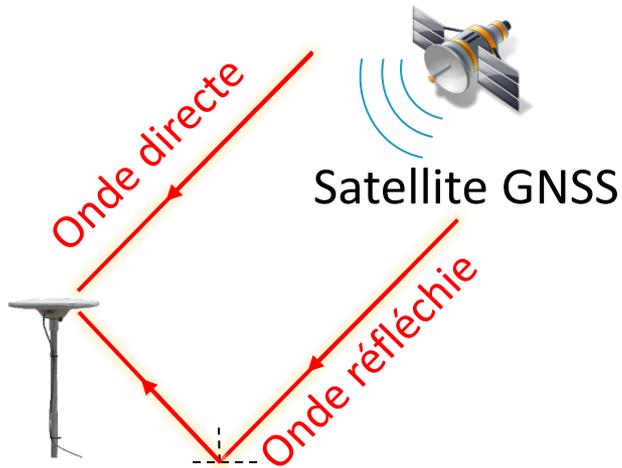
(Larson K. et al. 2008)



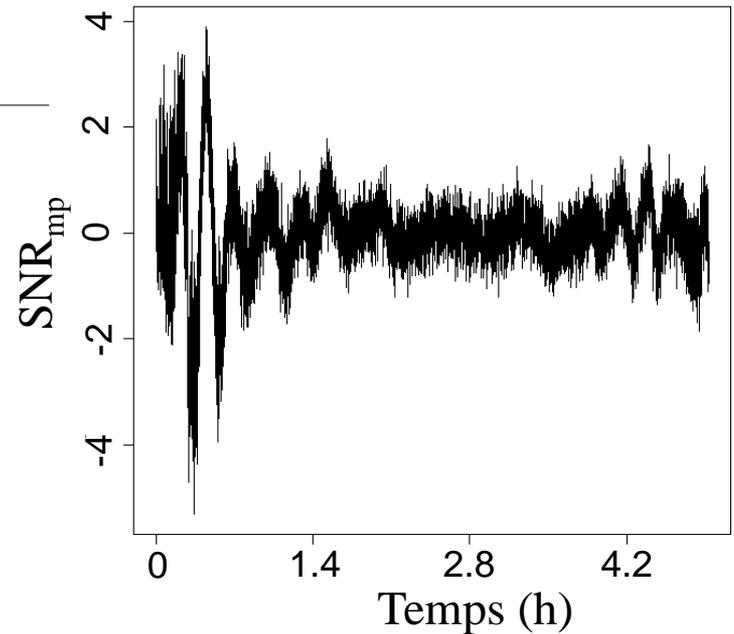
→ SNR (signal-to-noise ratio)

$$SNR = \frac{\text{signal}}{\text{bruit}}$$

# Comment ça marche ?



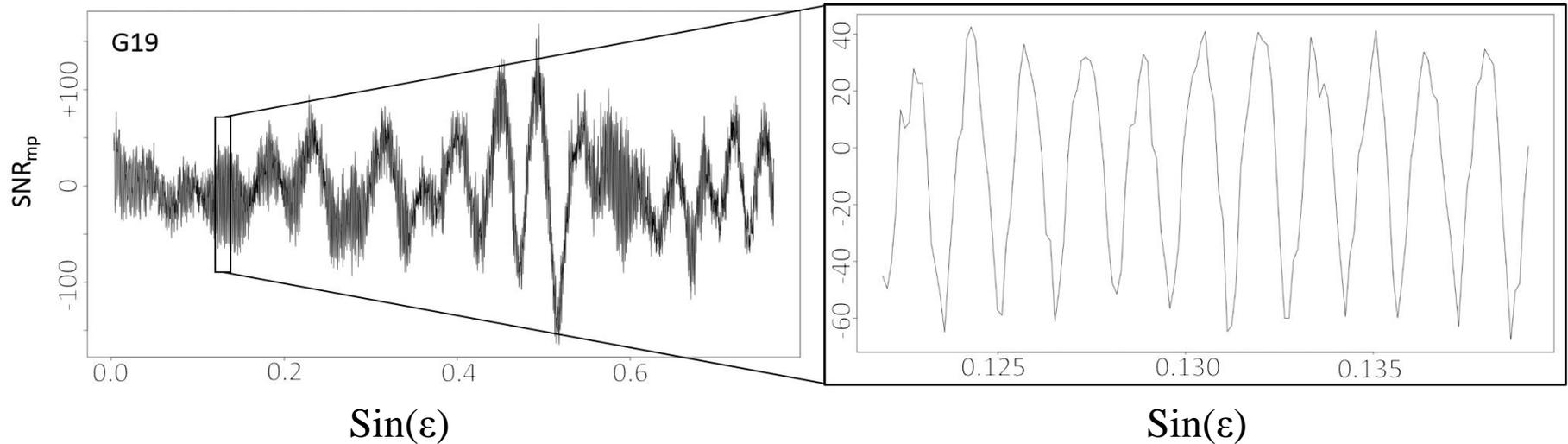
(Larson K. et al. 2008)



→ SNR (signal-to-noise ratio)

$$SNR = \frac{\text{signal}}{\text{bruit}}$$

# Comment ça marche ?

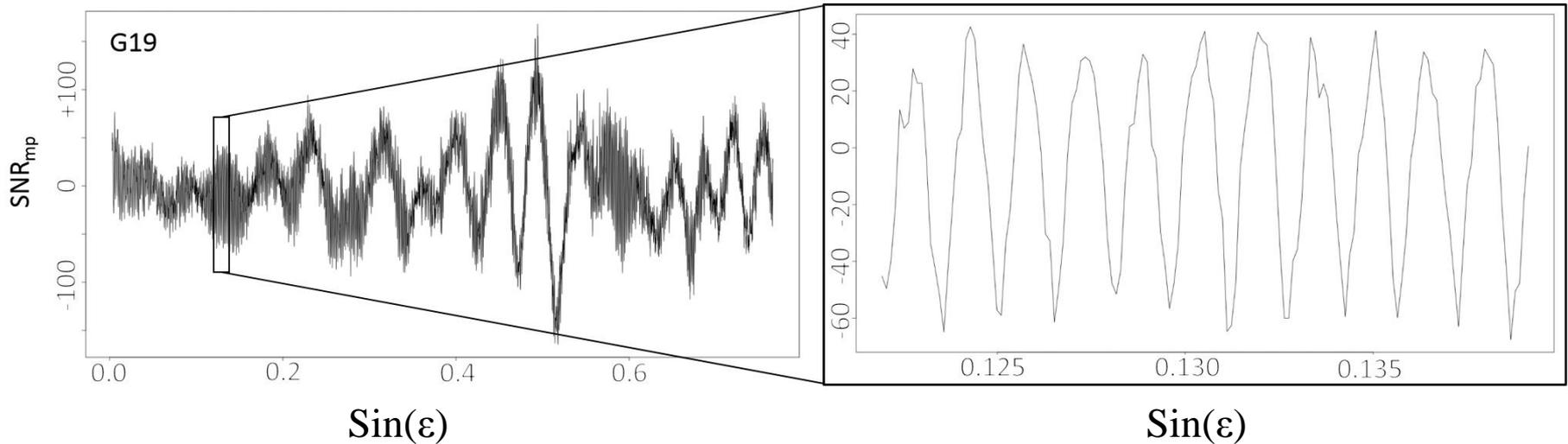


$$f_{SNR_{mp}} = \frac{4\pi}{\lambda} \left( h + \dot{h} \frac{\tan(\epsilon)}{\dot{\epsilon}} \right) \sim \frac{4\pi}{\lambda} h$$

(Larson K. et al. 2008 ; Bishop and Klobuchar. 1985)

- ε : angle d'élévation du satellite
- h : hauteur d'antenne par rapport à la surface de réflexion (mer)
- $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$  : vitesse verticale de la surface de réflexion due aux marées et vagues
- $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$  : vitesse de variation de l'angle d'élévation
- λ : longueur d'onde

# Comment ça marche ?



Ne peut pas être négligé avec marées/vagues à forte amplitude

???

$$f_{SNR_{mp}} = \frac{4\pi}{\lambda} \left( h + \dot{h} \frac{\tan(\epsilon)}{\dot{\epsilon}} \right) \sim \frac{4\pi}{\lambda} h$$

(Larson K. et al. 2008 ; Bishop and Klobuchar. 1985)

- $\epsilon$  : angle d'élévation du satellite
- $h$  : hauteur d'antenne par rapport à la surface de réflexion (mer)
- $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$  : vitesse verticale de la surface de réflexion due aux marées et vagues
- $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$  : vitesse de variation de l'angle d'élévation
- $\lambda$  : longueur d'onde

# Comment ça marche ? NOUVEAU!

$$f_{SNRmp} = \frac{4\pi}{\lambda} \left( h + \dot{h} \frac{\tan(\varepsilon)}{\dot{\varepsilon}} \right)$$

(Larson K. et al. 2008 ; Bishop and Klobuchar. 1985)

Pour un satellite  $i$  à un instant  $t$  :

$$f_i(t) = U_i \dot{h}(t) + V_i h(t)$$

# Comment ça marche ? NOUVEAU!

$$f_{SNRmp} = \frac{4\pi}{\lambda} \left( h + \dot{h} \frac{\tan(\varepsilon)}{\dot{\varepsilon}} \right)$$

(Larson K. et al. 2008 ; Bishop and Klobuchar. 1985)

Pour un satellite  $i$  à un instant  $t$ :

$$f_i(t) = U_i \dot{h}(t) + V_i h(t)$$

En combinant tous les satellites visibles :

$$\begin{bmatrix} f_1(t) = U_1 \dot{h}(t) + V_1 h(t) \\ f_2(t) = U_2 \dot{h}(t) + V_2 h(t) \\ f_3(t) = U_3 \dot{h}(t) + V_3 h(t) \\ \dots \end{bmatrix}$$

# Comment ça marche ? NOUVEAU!

$$f_{SNRmp} = \frac{4\pi}{\lambda} \left( h + \dot{h} \frac{\tan(\varepsilon)}{\dot{\varepsilon}} \right)$$

(Larson K. et al. 2008 ; Bishop and Klobuchar. 1985)

Pour un satellite  $i$  à un instant  $t$ :

$$f_i(t) = U_i \dot{h}(t) + V_i h(t)$$

En combinant tous les satellites visibles :

$$\begin{bmatrix} f_1(t) = U_1 \dot{h}(t) + V_1 h(t) \\ f_2(t) = U_2 \dot{h}(t) + V_2 h(t) \\ f_3(t) = U_3 \dot{h}(t) + V_3 h(t) \\ \dots \end{bmatrix}$$

Ou en termes de matrices :

$$F = U \dot{h}(t) + V h(t) = AX$$

$$\rightarrow X = (A^t A)^{-1} (A^t F)$$

# Comment ça marche ? **NOUVEAU!**

$$f_{SNRmp} = \frac{4\pi}{\lambda} \left( h + \dot{h} \frac{\tan(\varepsilon)}{\dot{\varepsilon}} \right)$$

(Larson K. et al. 2008 ; Bishop and Klobuchar. 1985)

Pour un satellite  $i$  à un instant  $t$ :

$$f_i(t) = U_i \dot{h}(t) + V_i h(t)$$

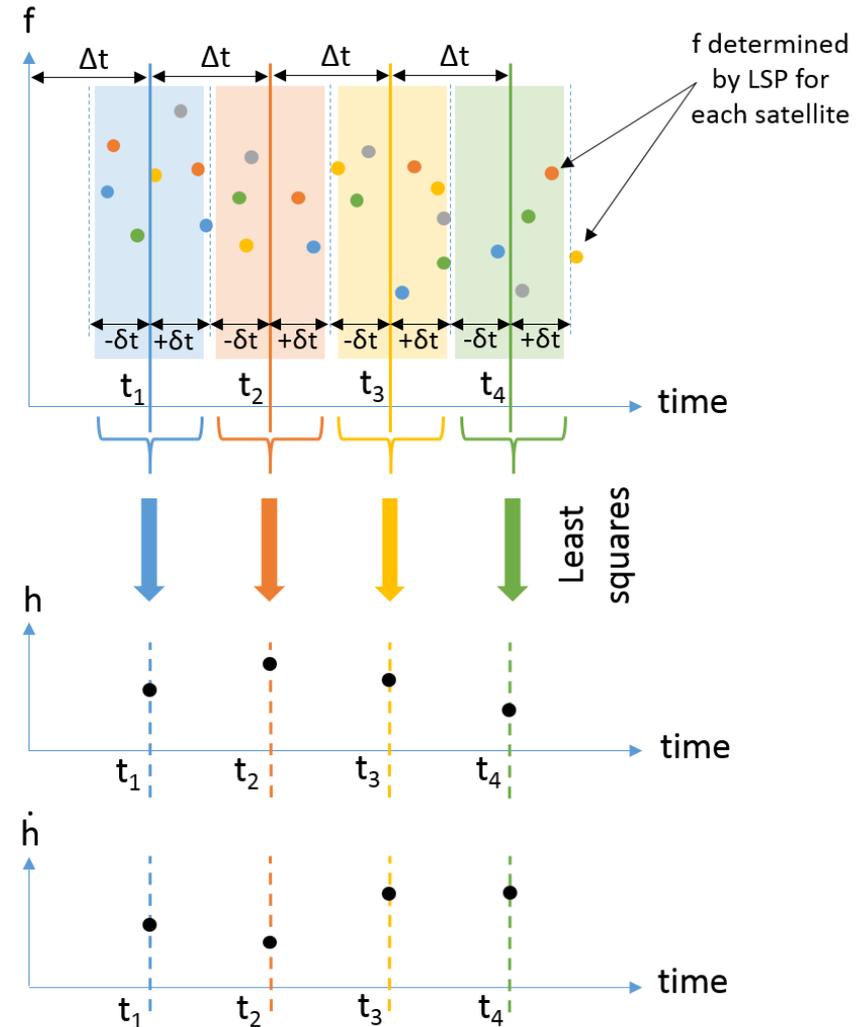
En combinant tous les satellites visibles :

$$\begin{cases} f_1(t) = U_1 \dot{h}(t) + V_1 h(t) \\ f_2(t) = U_2 \dot{h}(t) + V_2 h(t) \\ f_3(t) = U_3 \dot{h}(t) + V_3 h(t) \\ \dots \end{cases}$$

Ou en termes de matrices :

$$F = U \dot{h}(t) + V h(t) = AX$$

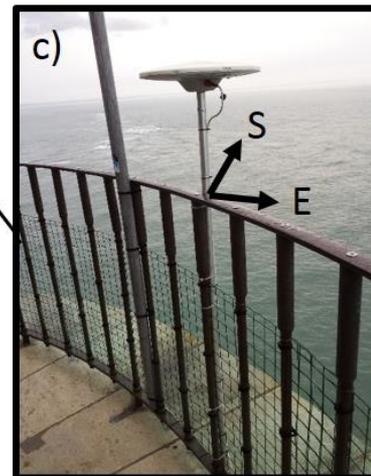
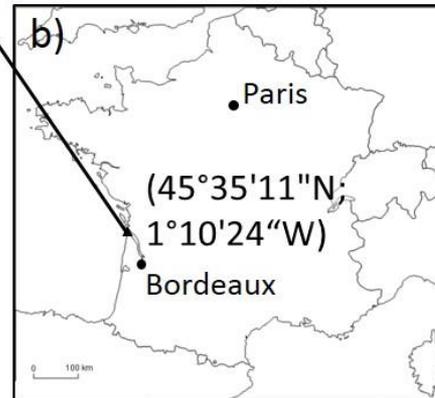
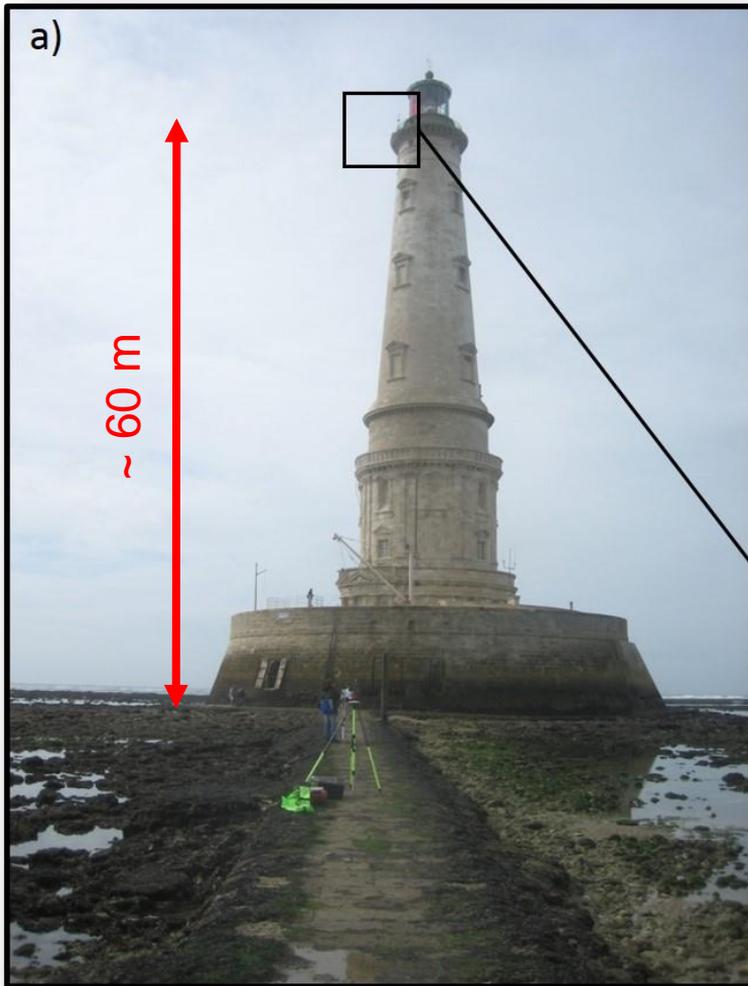
$$\rightarrow X = (A^t A)^{-1} (A^t F)$$



**$\rightarrow$  Possibilité de combiner toutes les constellations**

# Phare de Cordouan

S1C (SNR sur L1 C/A) mesuré du 3 mars au 31 mai 2013



Amplitude marée :  $\pm 3$  m  
Variations SSH :  $\sim 0.2$  mm/s  
+ **vagues (qq mètres)!**

→  $\dot{h}$  ne peut pas être négligé !

# Phare de Cordouan

Points de réflexion spéculaires du 2 au 8 mai 2013

Angle d'élévation satellites :  $[1^\circ; 90^\circ]$

Fréquence d'échantillonnage : 15 minutes

Lighthouse masking  
(estimate)

Cordouan tide gauge  
(colocated)

Royan tide gauge

Port-Bloc tide gauge

Receiver

● GLONASS

● GPS

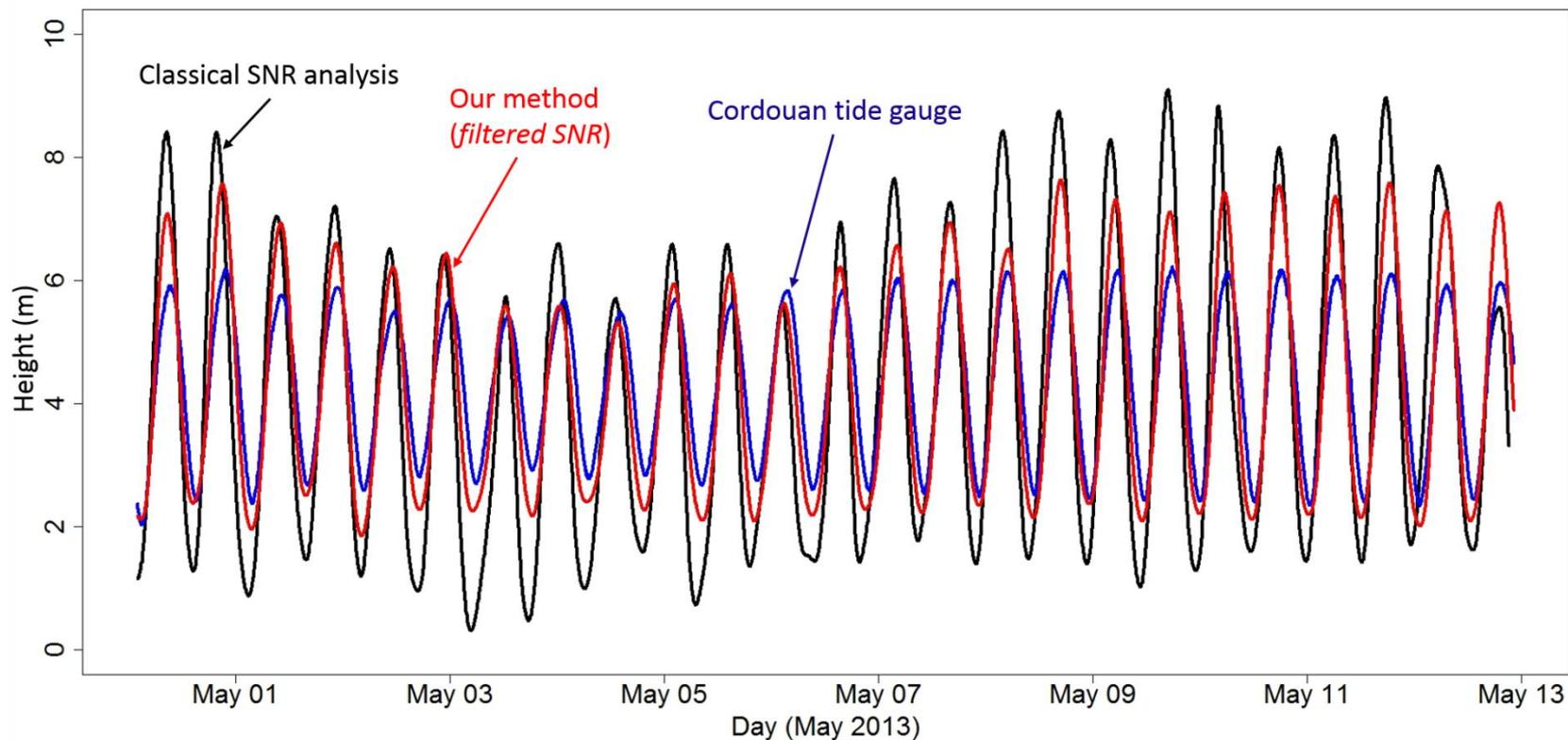
7 km

Le Verdon-sur-Mer

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO  
© 2015 Google  
Image © 2015 DigitalGlobe  
Image © 2015 TerraMetrics

Google earth

# Comparaison avec l'analyse SNR classique



Cordouan	Corrélation linéaire	R <sup>2</sup>	EQM (m)	Biais (m)
Analyse SNR classique	0.82	0.67	1.52	0.22
Notre méthode	0.97	0.95	0.63	0.06

# Results

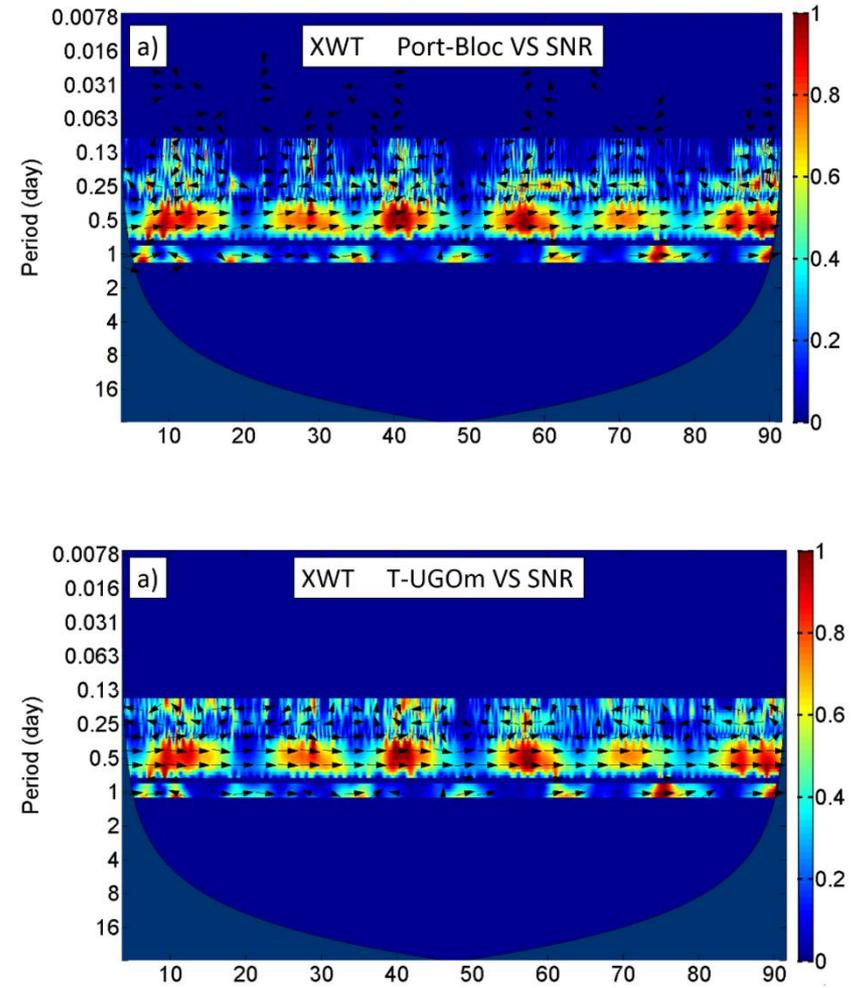
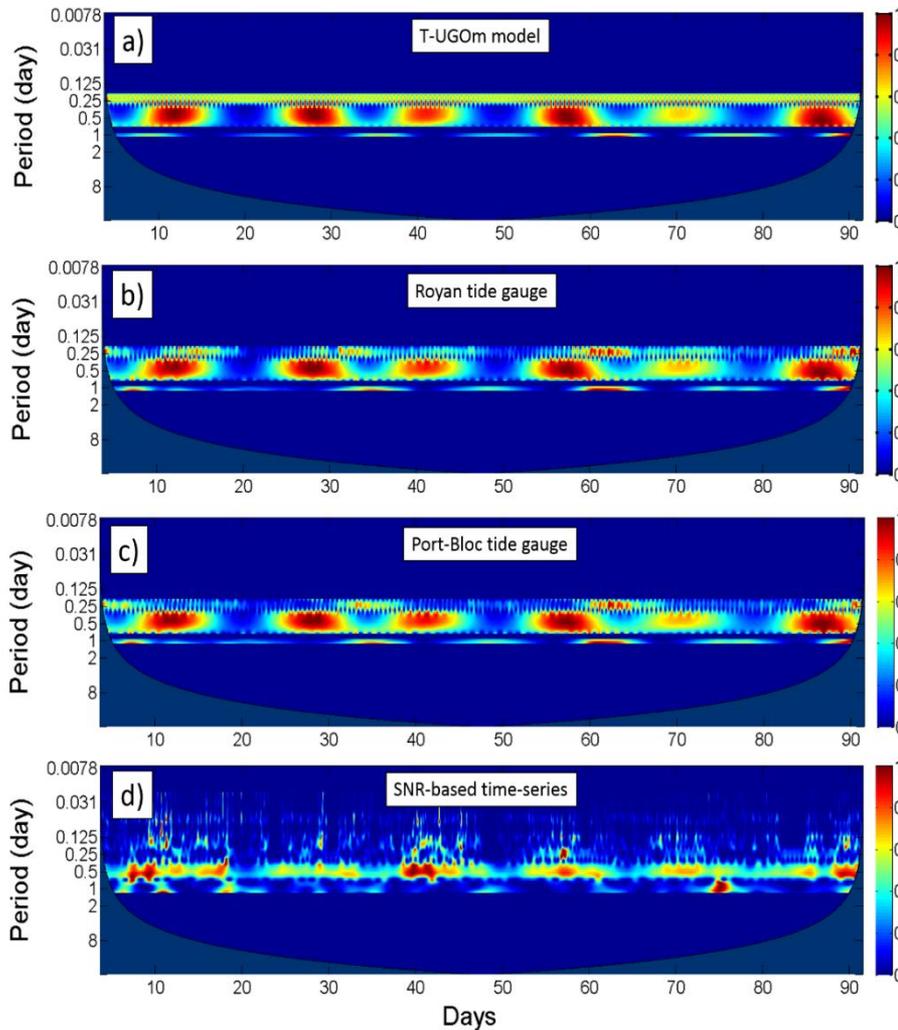
Nos estimations comparées à	Biais (m)	Corrélation linéaire	R <sup>2</sup>	EQM (m)	Déphasage (min)
FES2012* (model)	-0.23	0.94	0.89	0.71	-4.3
Port-Bloc* (marégraphe, 9 km)	0.02	0.96	0.92	0.68	29.0
Royan* (marégraphe, 12 km)	0.00	0.95	0.91	0.71	25.0
<b>Cordouan** (marégraphe colocalisé)</b>	<b>0.01</b>	<b>0.97</b>	<b>0.95</b>	<b>0.63</b>	<b>0.0</b>

\* Période de 3 mois

\*\* période de 2 semaines

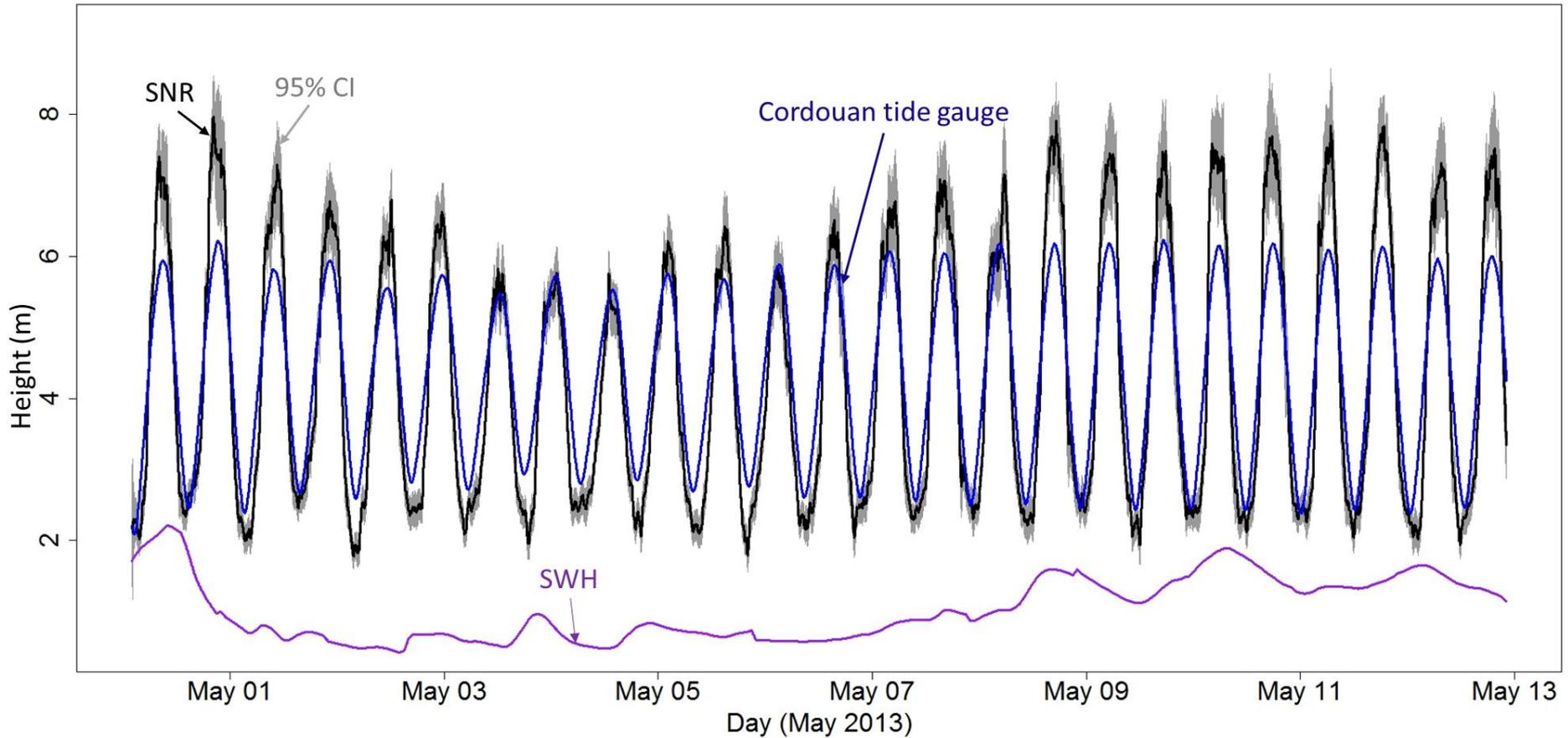
→ **Roussel N.**, Ramillien G., Frappart F., Darrozes J., Gay A., Biancale R., Striebig N., Hanquiez V., Bertin X., Allain D.: *Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver*. Remote Sensing of Environment 171 (2015) 261-277

# Analyse en ondelettes

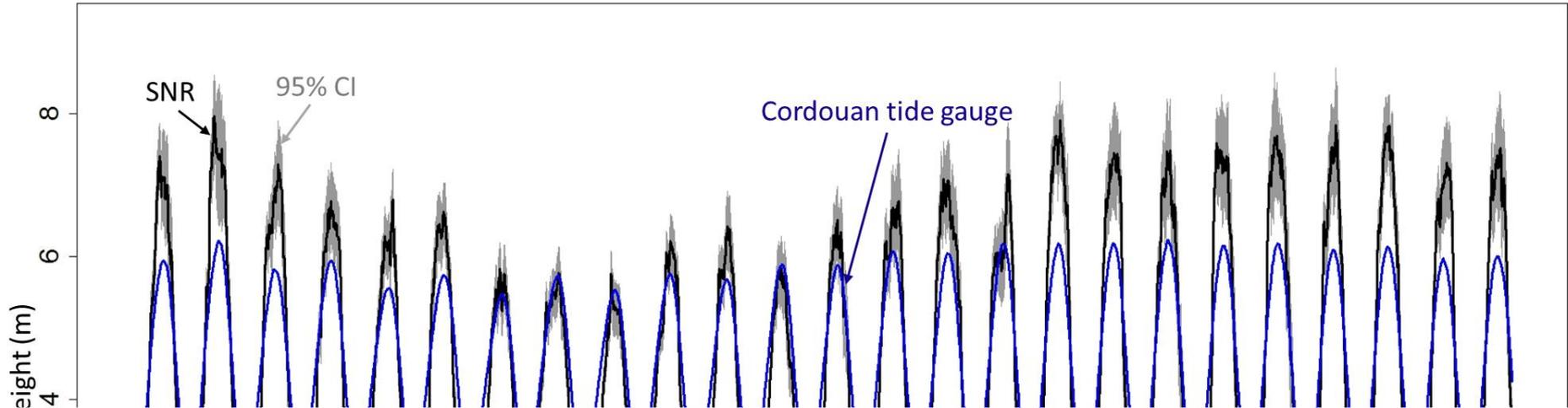


(Roussel et al, 2015)

# Résultats



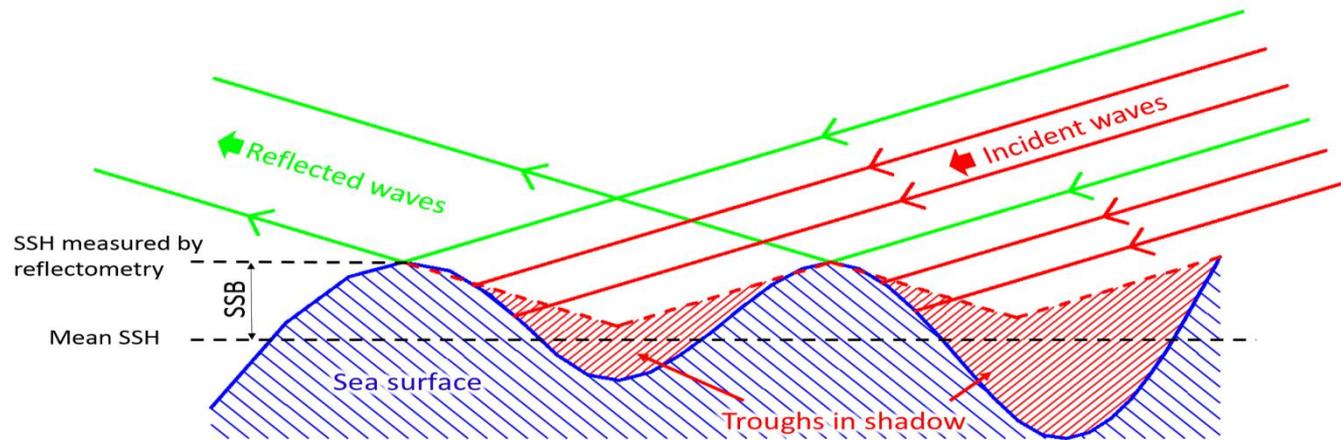
# Marées hautes



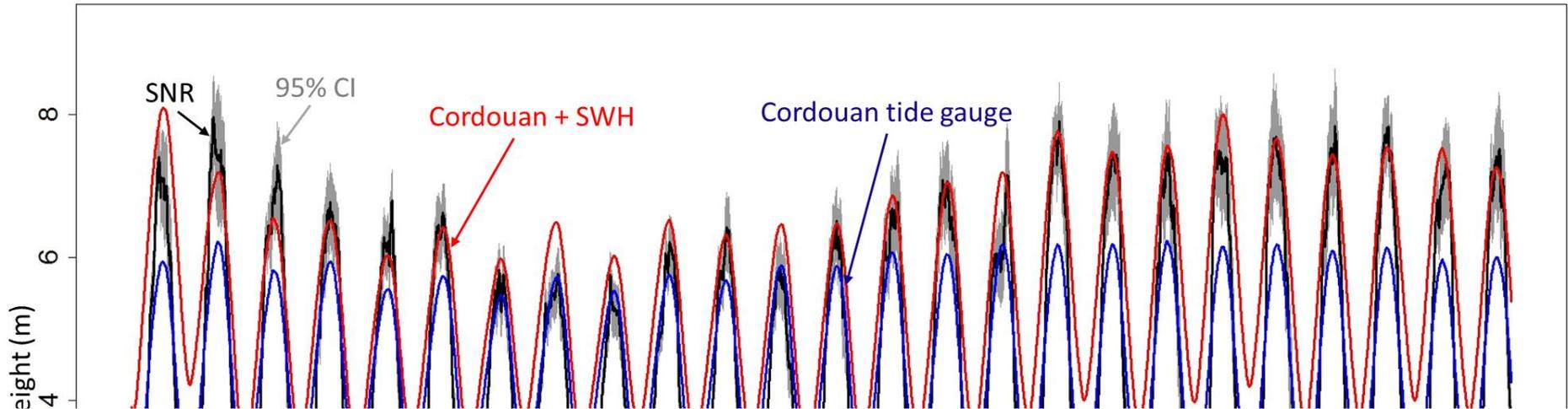
[theudericus.free.fr/Mer\\_Ocean/Phares/Phares.htm](http://theudericus.free.fr/Mer_Ocean/Phares/Phares.htm)



a) Marée haute



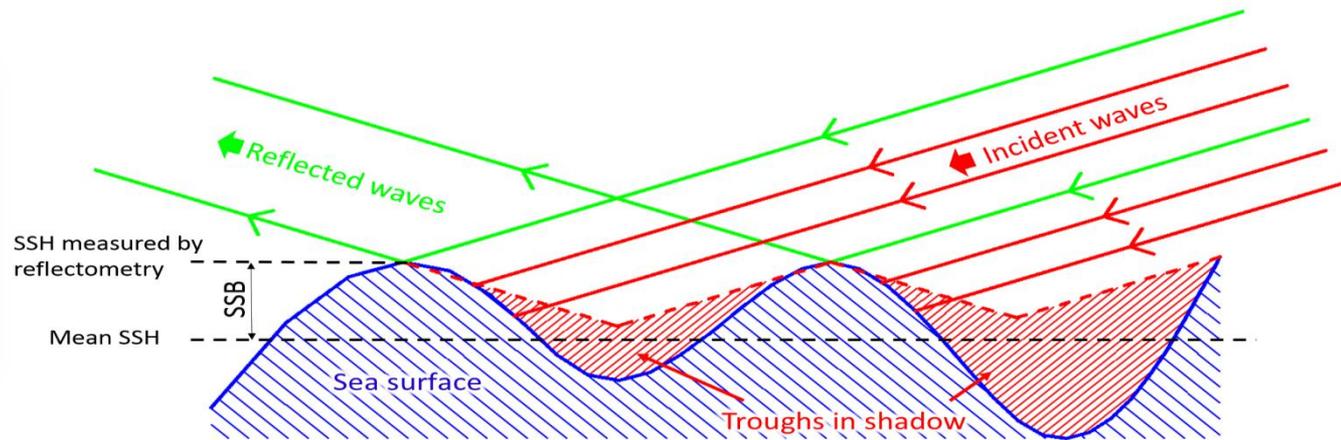
# Marées hautes



[theudericus.free.fr/Mer\\_Ocean/Phares/Phares.htm](http://theudericus.free.fr/Mer_Ocean/Phares/Phares.htm)



a) Marée haute



# Conclusions

Une antenne GNSS classique a été utilisée pour mesurer les variations du niveau de la mer ( $h = 60$  m)

✓ Précision : cm sur hauteur individuelle

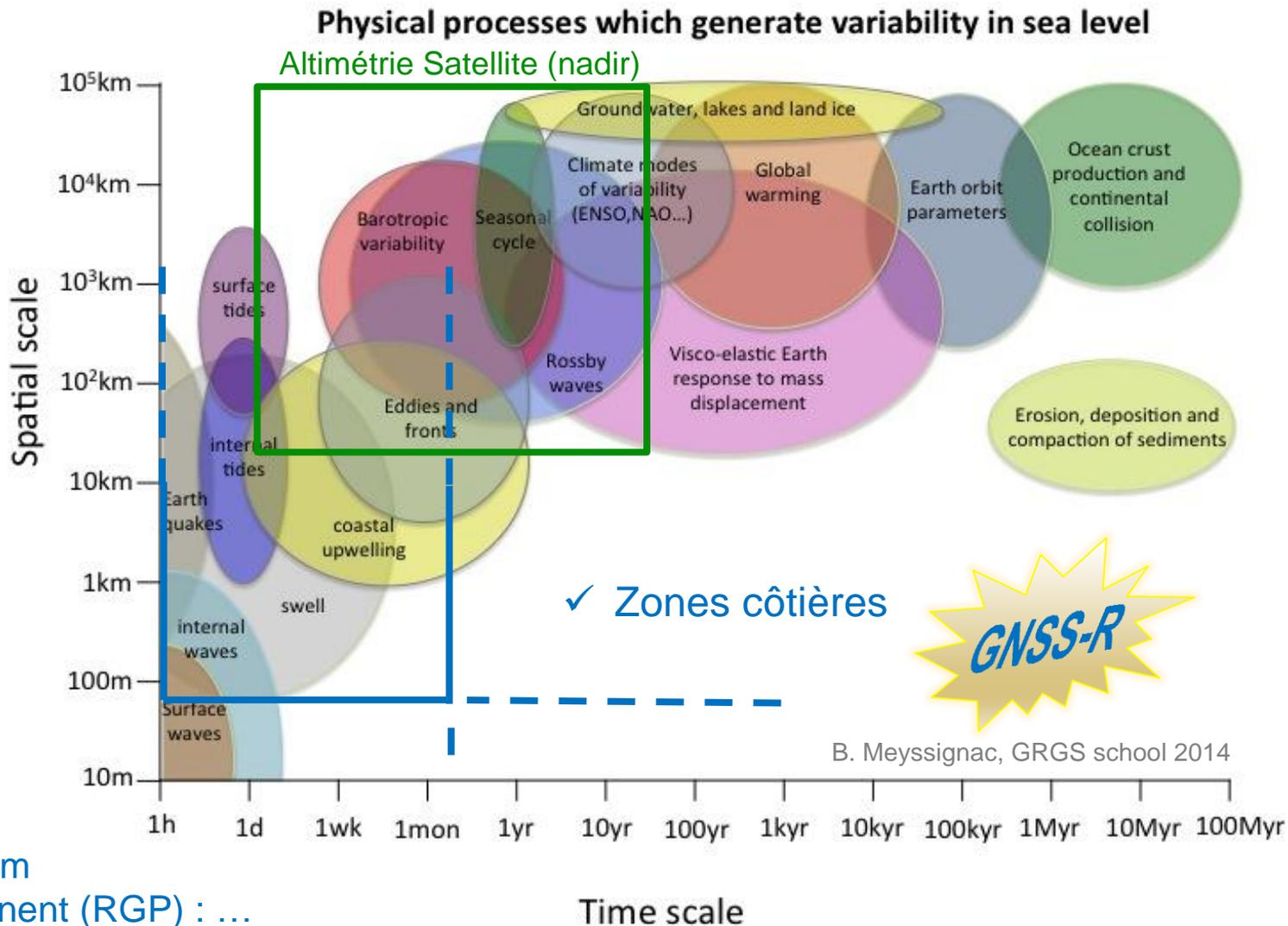
✓ Résolution temporelle : 5 min

✓ Zone mesurée : 7 km

✓ Couverture :

→ 1 antenne : 7 km

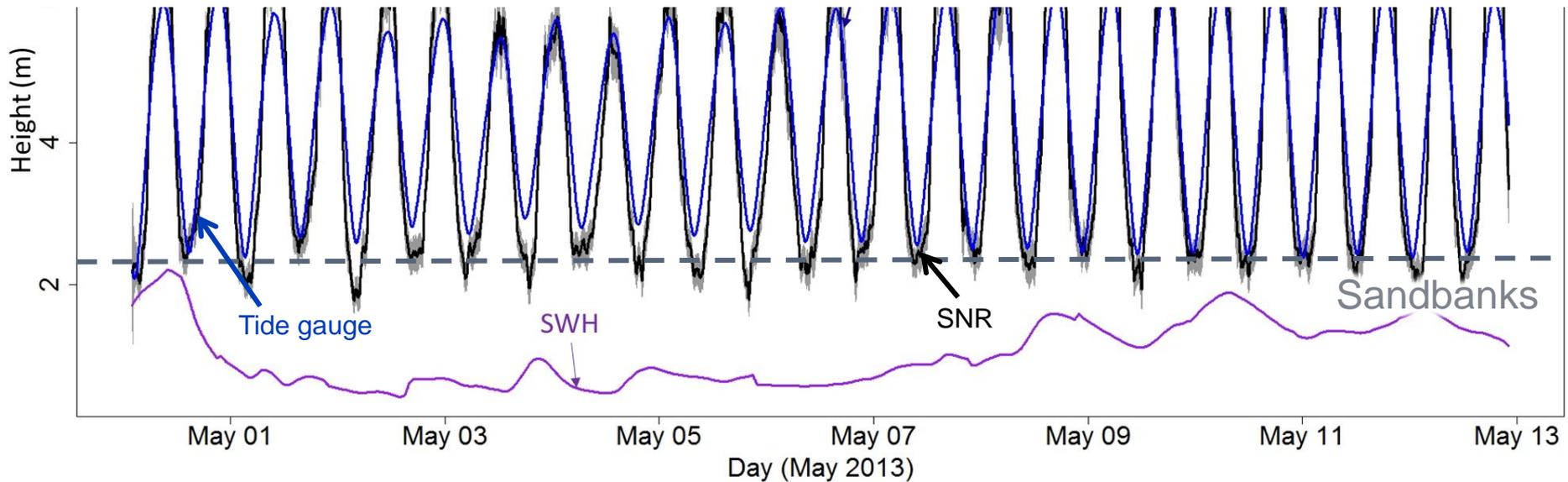
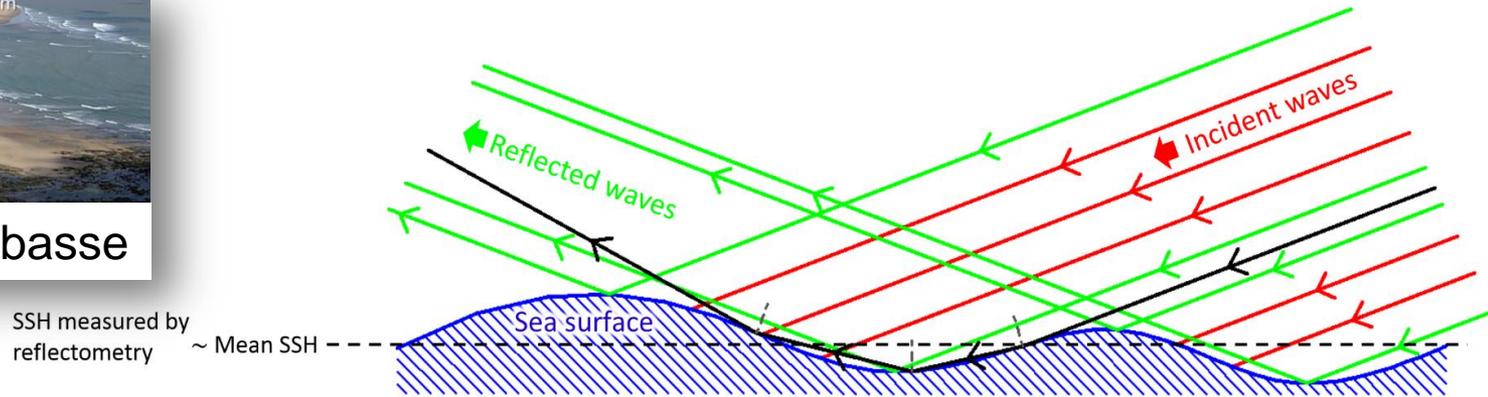
→ Réseau permanent (RGP) : ...



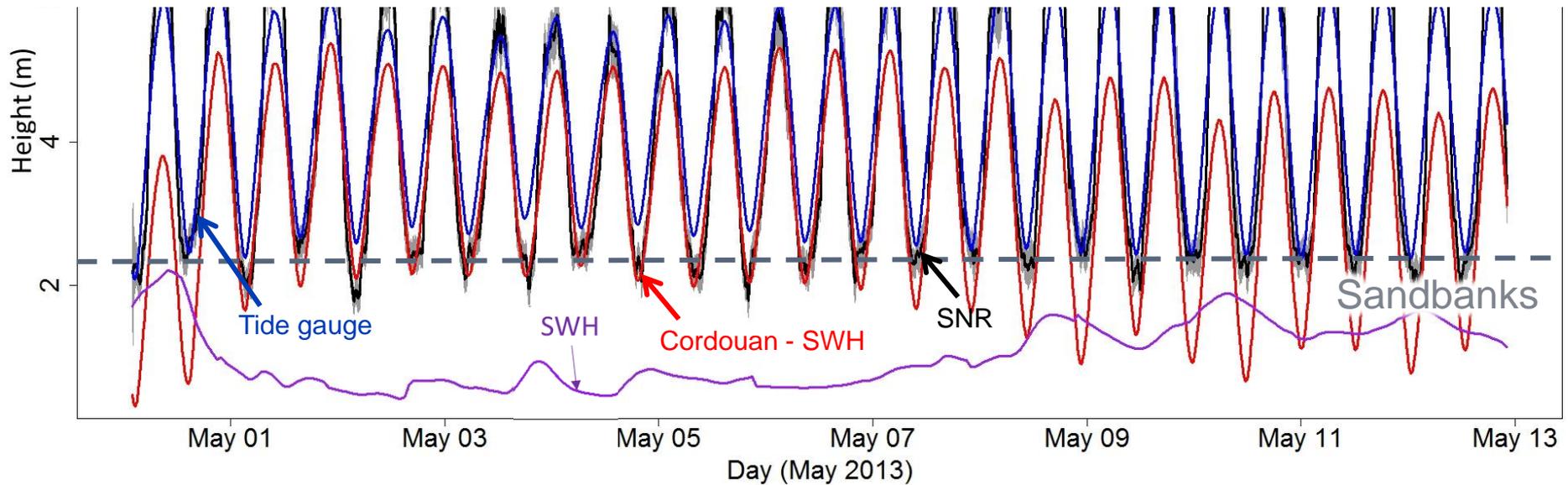
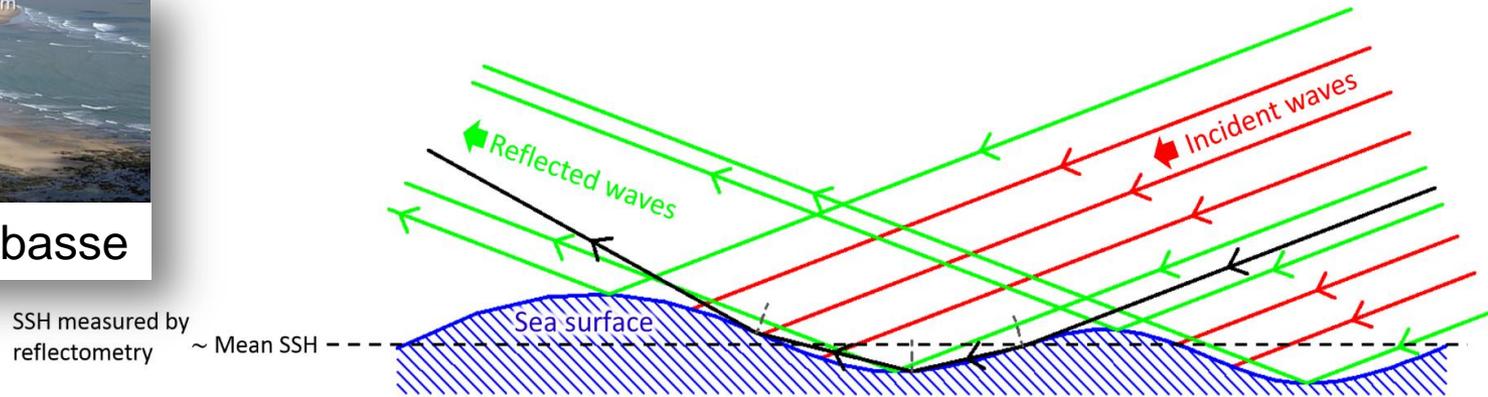


**Merci pour votre  
attention !**

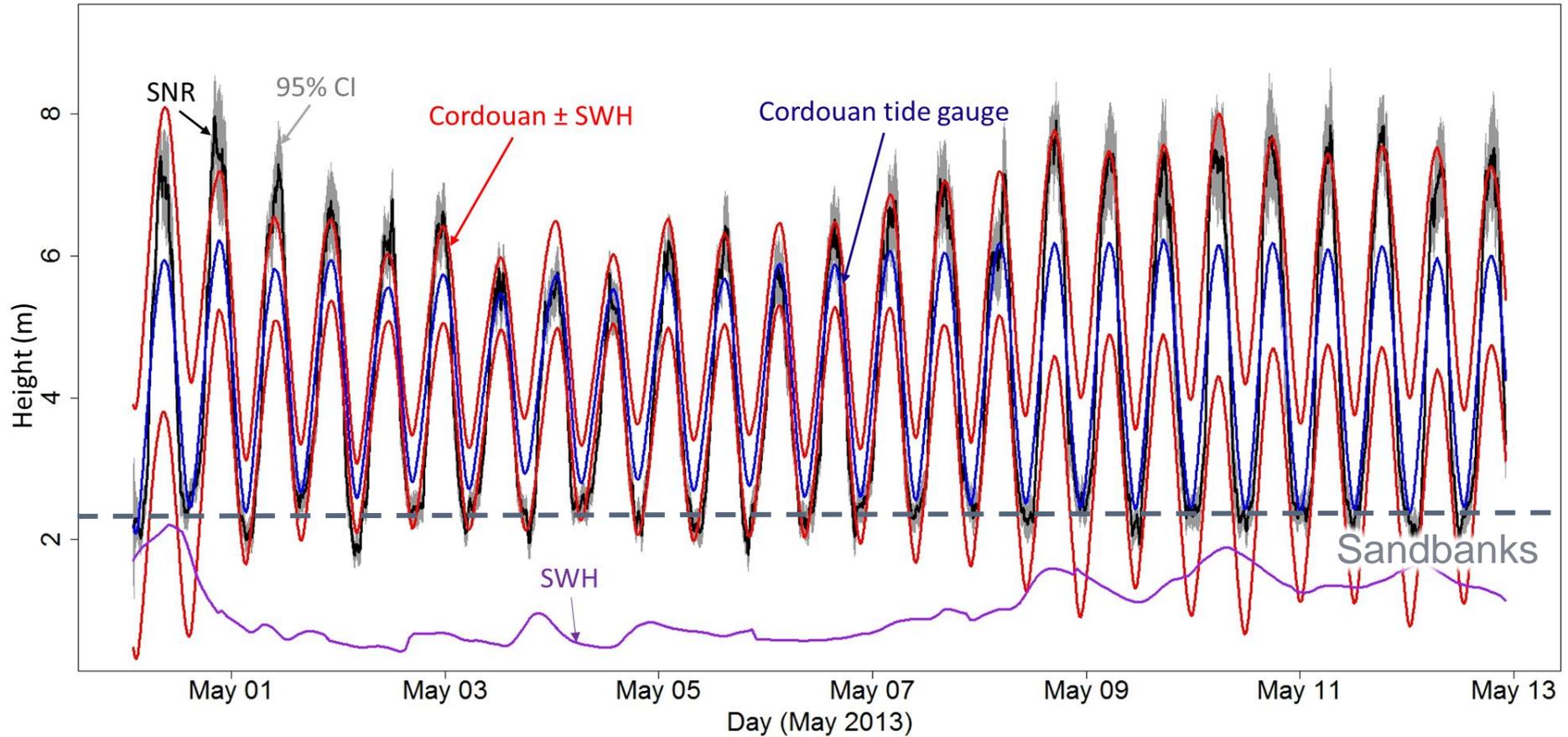
# Marées basses



# Marées basses



# Résultats

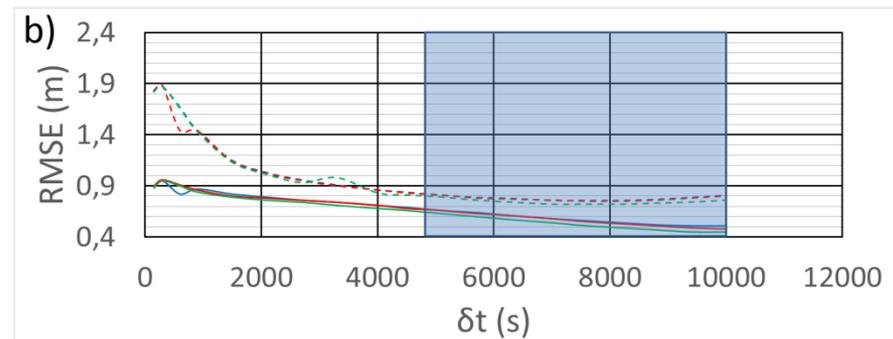
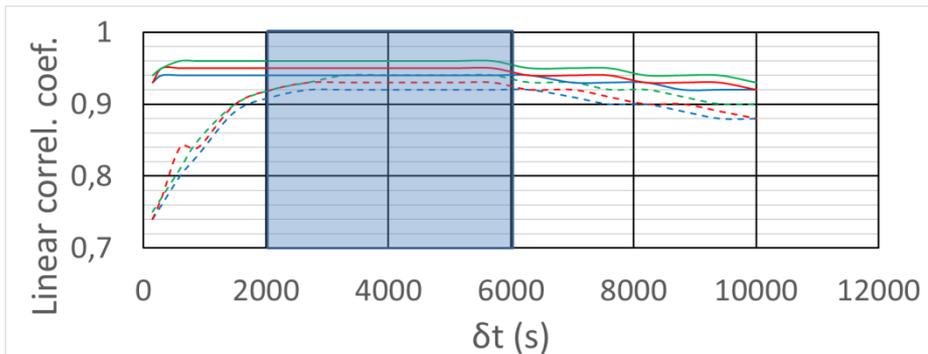
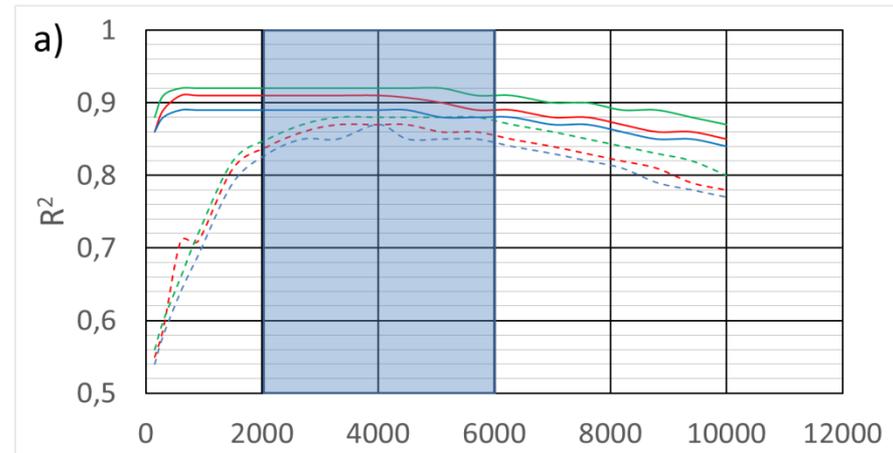
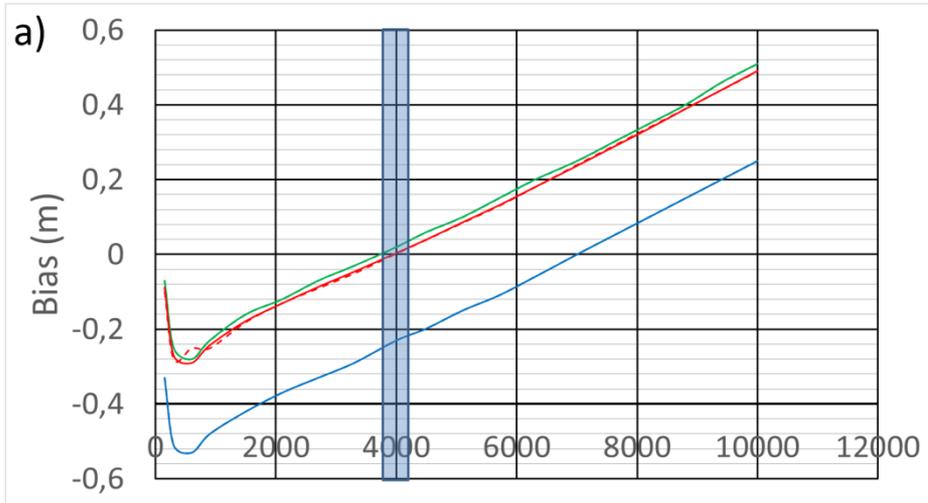


# Influence de la constellation GNSS

SNR comparé à	Biais (m)	Corrélation linéaire	R <sup>2</sup>	EQM (m)	Déphasage (min)
T-UGOm	-0.19/-0.46/ <b>-0.23</b>	0.94/0.93/ <b>0.94</b>	0.88/0.86/ <b>0.89</b>	0.76/0.81/ <b>0.71</b>	-1.5/5.0/ <b>-4.3</b>
Port-Bloc	0.06/-0.21/ <b>0.02</b>	0.96/0.95/ <b>0.96</b>	0.92/0.89/ <b>0.92</b>	0.72/0.78/ <b>0.68</b>	31.8/27.4/ <b>29.0</b>
Royan	0.04/-0.23/ <b>0.00</b>	0.95/0.94/ <b>0.95</b>	0.90/0.88/ <b>0.91</b>	0.74/0.80/ <b>0.71</b>	27.8/23.2/ <b>25.0</b>

GPS / GLONASS / **GPS+GLONASS**

# Taille de la fenêtre glissante



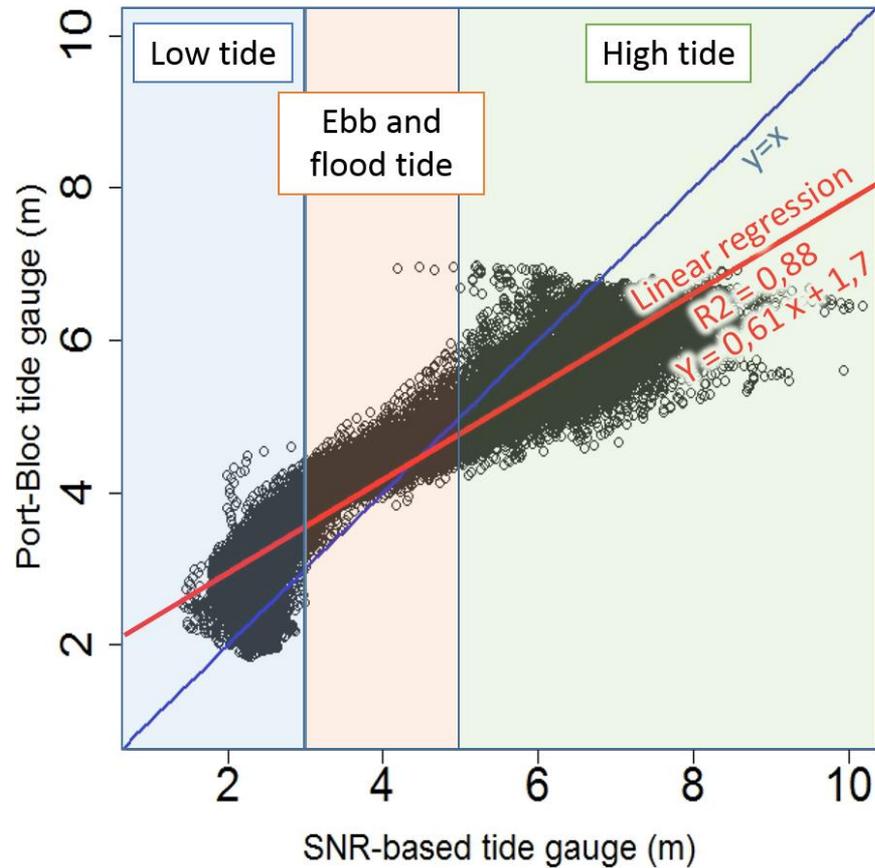
--- SNR versus T-UGOm    - - - SNR versus Royan    - - - SNR versus Port-Bloc\*  
 — SNR versus T-UGOm\*    — SNR versus Royan\*    — SNR versus Port-Bloc\*

--- SNR versus T-UGOm    - - - SNR versus Royan    - - - SNR versus Port-Bloc  
 — SNR versus T-UGOm\*    — SNR versus Royan\*    — SNR versus Port-Bloc\*

b) \*Filtered SNR-based time series, i.e. high-frequency signal (period < 6 h) removed

\*Filtered SNR-based time series, i.e. high-frequency signal (period < 6 h) removed

# Scatter plot



# Méthodologie

a)

