

Principes de base de la technique réflectométrie GNSS



Alvaro Santamaría

Géosciences Environnement Toulouse
Université Paul Sabatier, CNRS, CNES, IRD, UPS

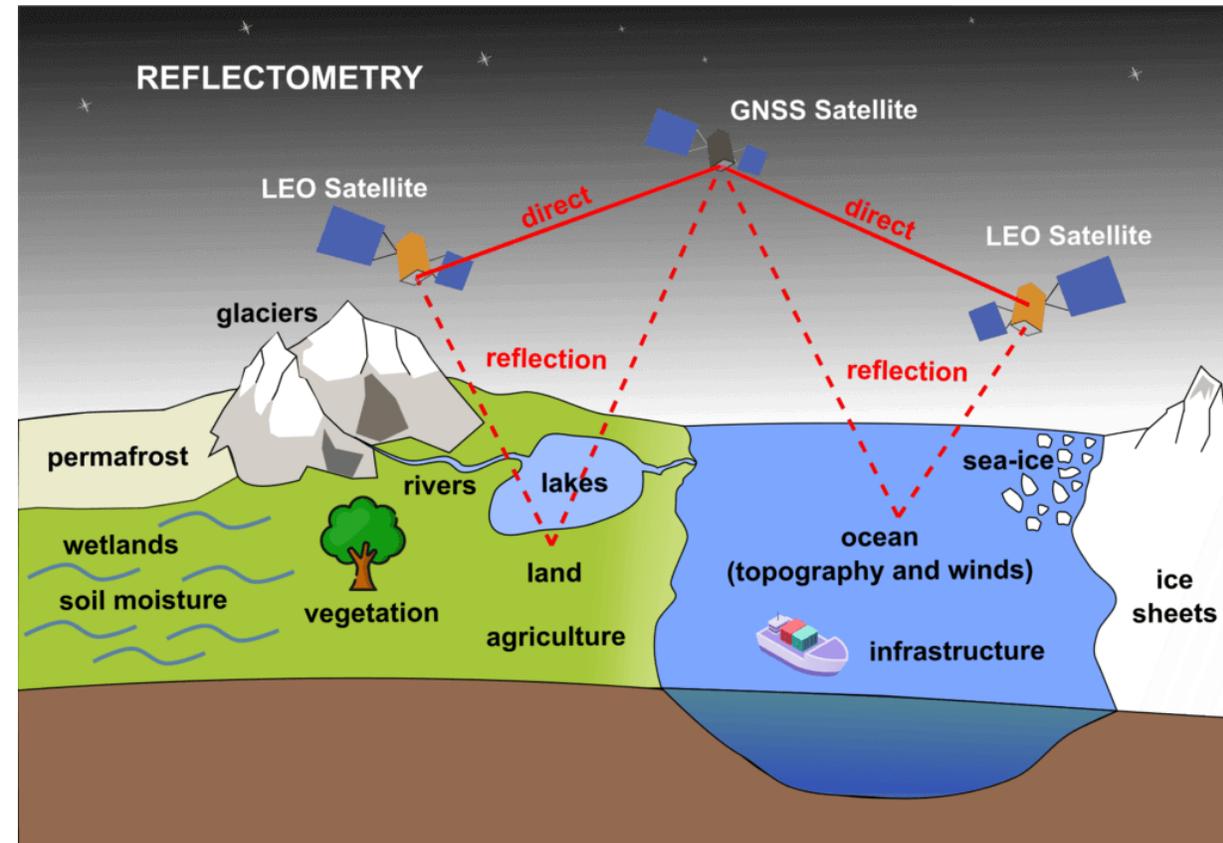
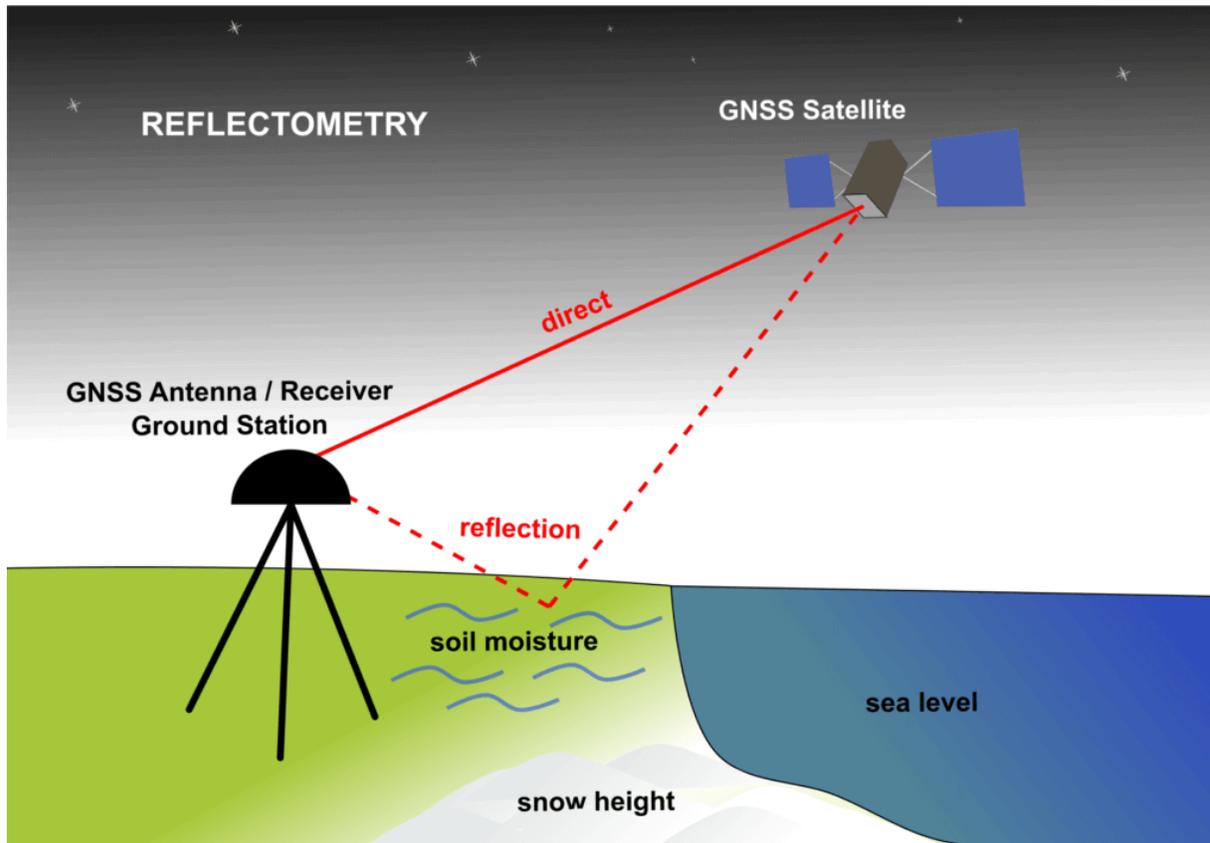
Groupe de travail GNSS & positionnement
Commission Géopositionnement du CNIG

16 octobre 2024

Fonctionnement de la réflectométrie GNSS

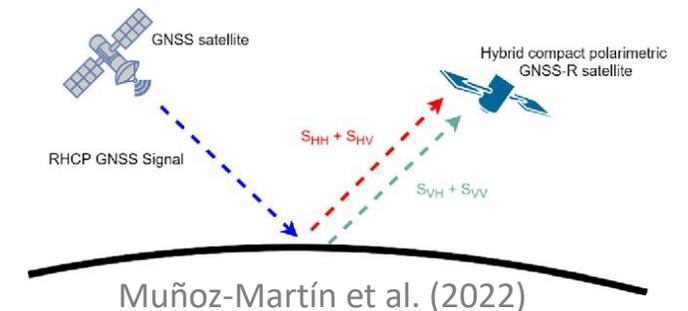
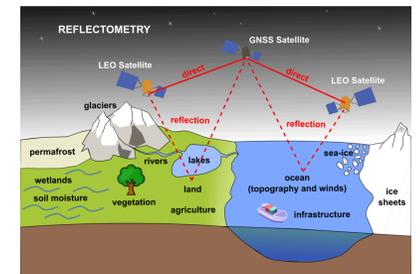
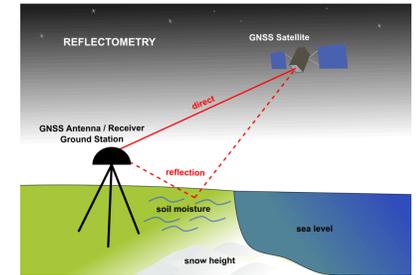
Multi-radar bistatique passif à haute résolution spatiotemporelle et à moindre cout.

<https://ggos.org/item/gnss-reflectometry>



Types de réflectométrie GNSS

1. Suivi de phase ou interférométrie: réflexion cohérente avec angle d'incidence bas ou surface peu rugueuse¹.
2. Cartes doppler, forme d'onde ou diffusométrie/scatterométrie : réflexion incohérente avec angle d'incidence haut ou surface très rugueuse¹.
3. Polarimétrie : interférence entre les deux polarisations présentes dans l'onde réfléchie



¹ La rugosité dépend de la longueur d'onde du signal GNSS et de l'angle d'incidence.

Aperçu historique de la réflectométrie GNSS

McCready et al. 1947 “*Solar radiation at radio frequencies and its relation to sunspots*”. Royal Society → **l’interféromètre océanique inventé**

Martín-Neira, 1993 “*A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry*”. ESA → **développement spatial théorique**

Garrison et al. 1998 “*Effect of sea roughness on bistatically scattered range coded signals from the Global Positioning System*”. GRL → **expérience aéroportée**

Zavorotny and Voronovich, 2000 “*Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application*”. IEEE TGRS → **réflectométrie diffuse et forme d’onde**

Larson et al. 2008 “*Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies*”. GRL → **réflectométrie interférométrique pour tous**

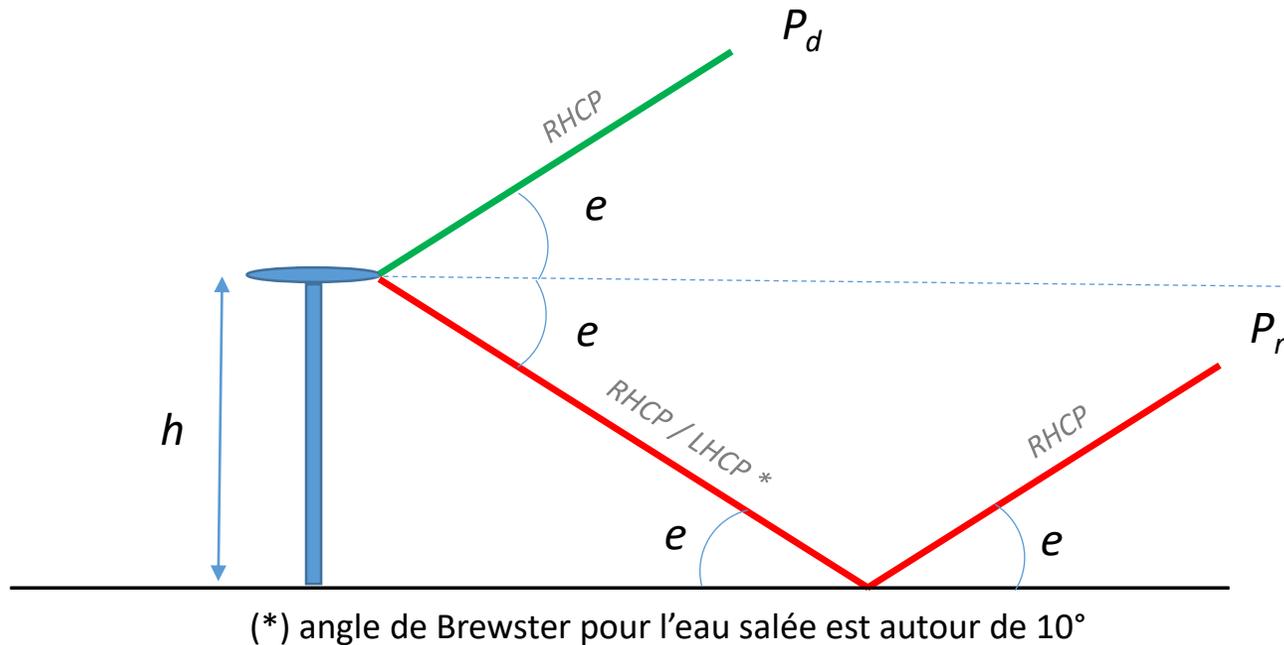
Observations GNSS-R depuis l'espace

- 1994(2002) SRL-2 (NASA)
- 2000 CHAMP (DLR)
- 2003 UK-DMC (SSTL)
- 2014 TechDemoSat-1 (ESA/UKSA)
- 2016 CYGNSS (NASA)
- 2017 WNISAT-1R (Weathernews)
- 2019 Spire (Spire/ESA)
- 2019 BuFeng-1 (CAST)
- 2019 DoT-1 (SSTL/Airbus)
- 2020 FSSCat (ESA)
- 2021 Jilin-01B (Chang Guang)
- 2021 FengYun-3E (CAST)
- 2023 Triton (TASA)
- 2023 PRETTY (ESA)
- 2025 HydroGNSS (ESA)

Applications scientifiques: topographie et télédétection

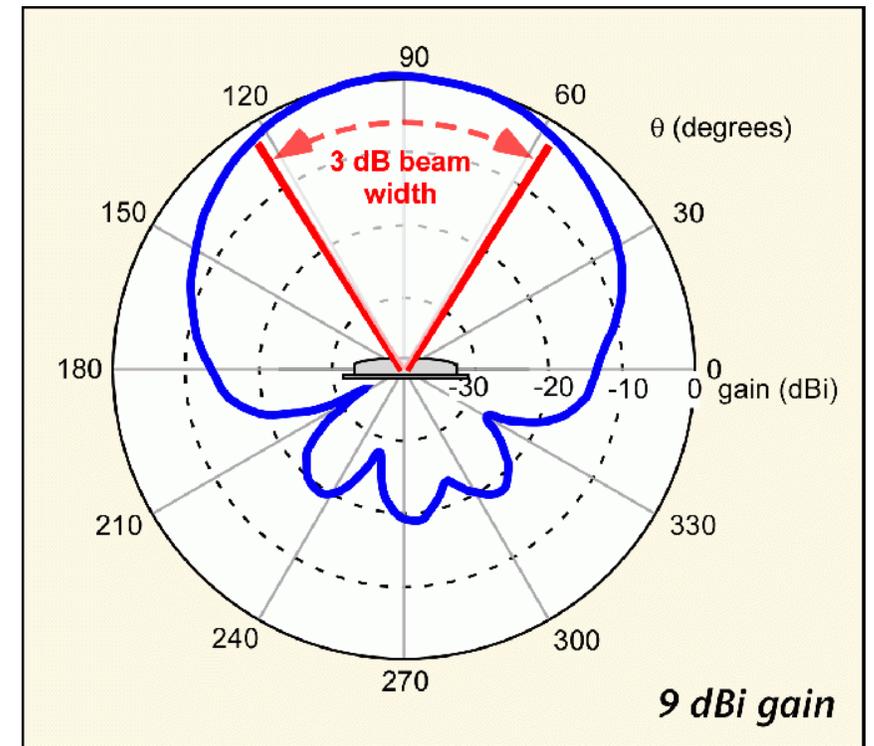
- Altimétrie des surfaces d'eau
- Rugosité des surfaces d'eau (vitesse et direction du vent en surface)
- Hauteur des vagues, courants et tsunامي
- Salinité et température de l'eau marine
- Localisation et épaisseur de la glace de mer
- Epaisseur de l'enneigement
- Humidité du sol et végétation
- Etalonnage de marégraphe

Application: altimétrie par interférométrie SNR

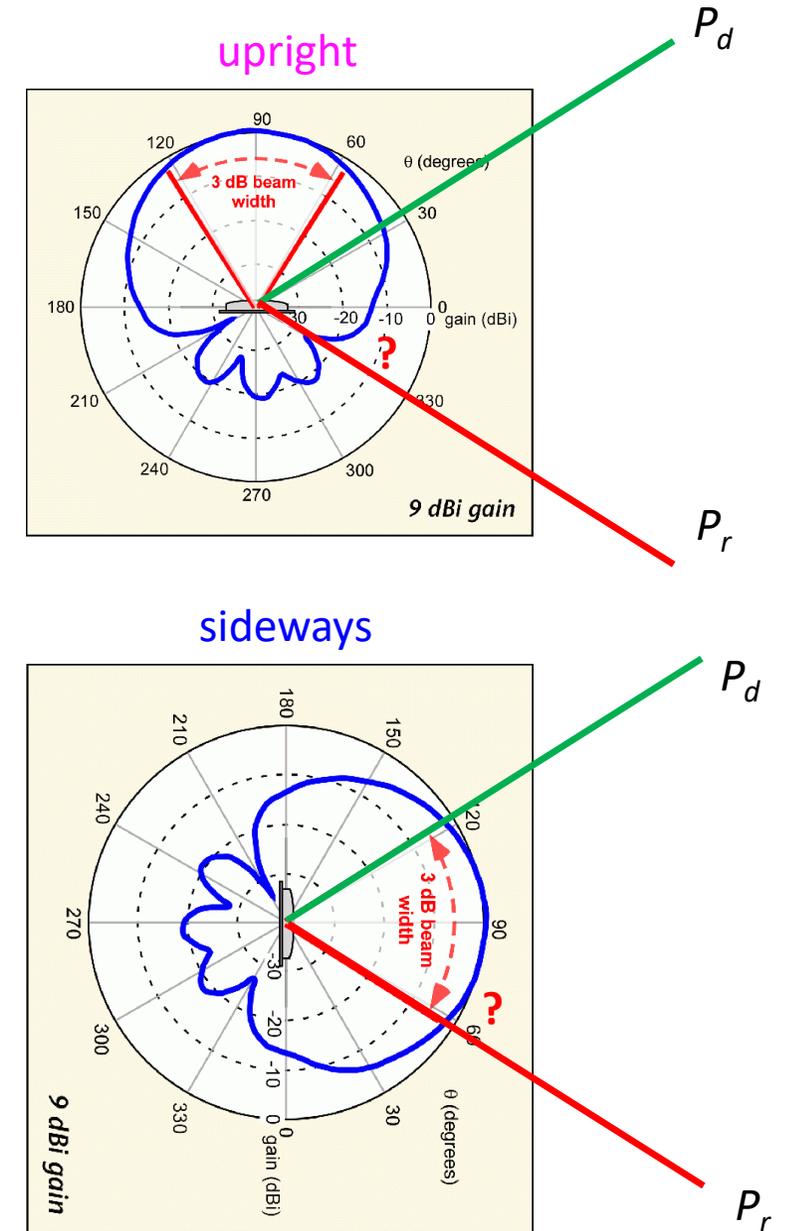
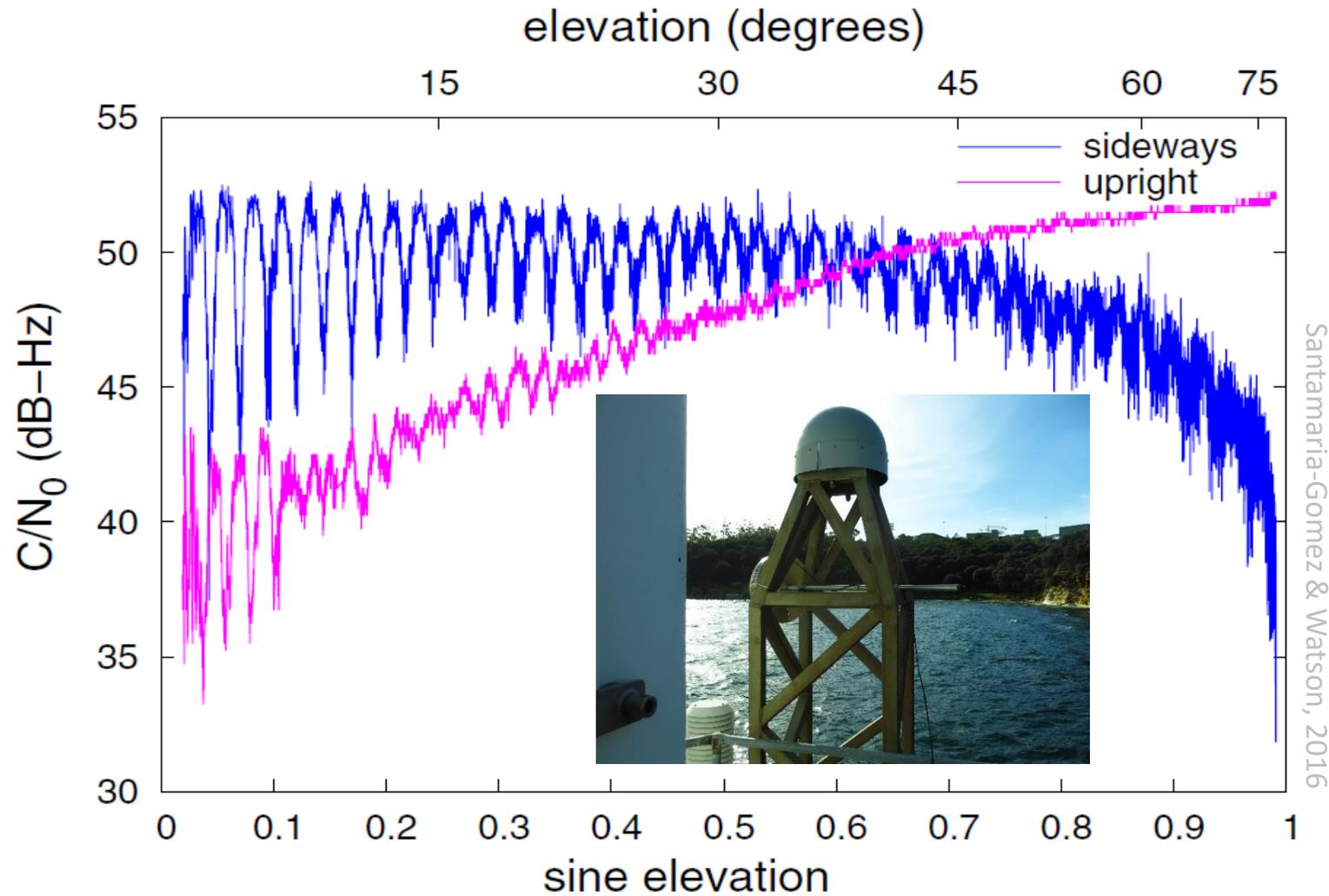


$$SNR = P_d + P_r + 2\sqrt{P_d P_r} \cos \theta$$

Patch antenna pattern (<https://gssc.esa.int/navipedia>)



L'effet d'une bonne antenne géodésique



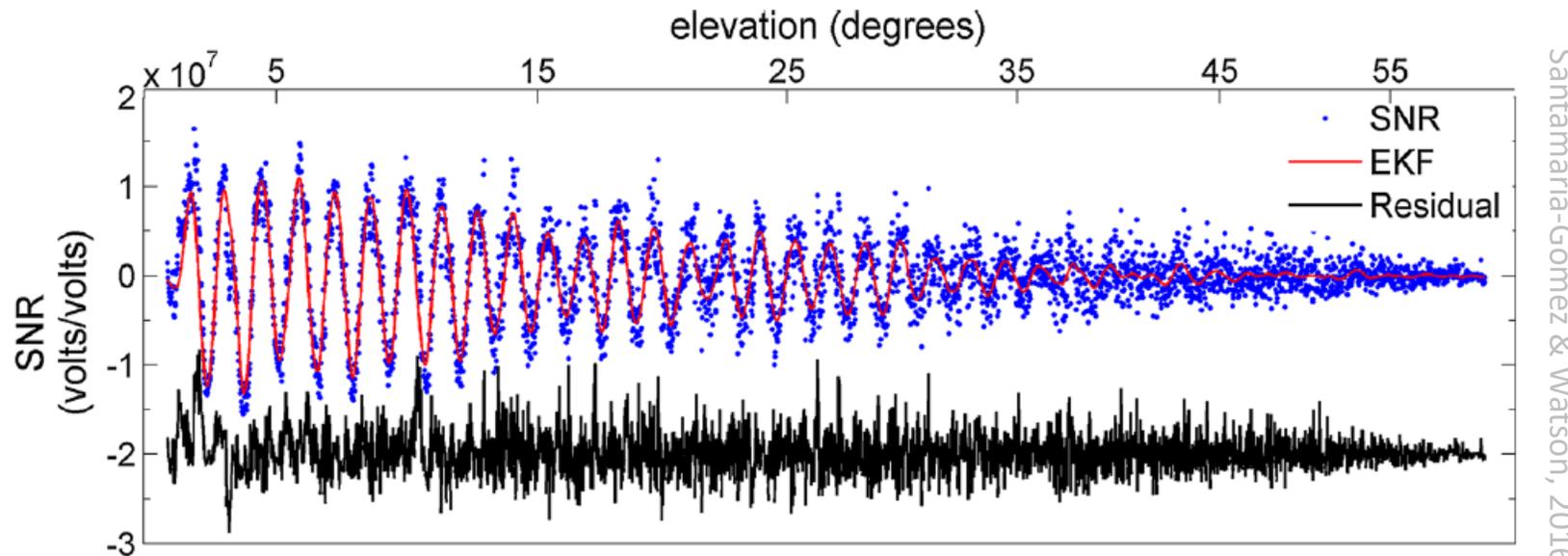
Prétraitement du « SNR »

On récupère les mesures C/N_0 du récepteur dans le fichier RINEX et on enlève la tendance à l'aide d'un polynôme.

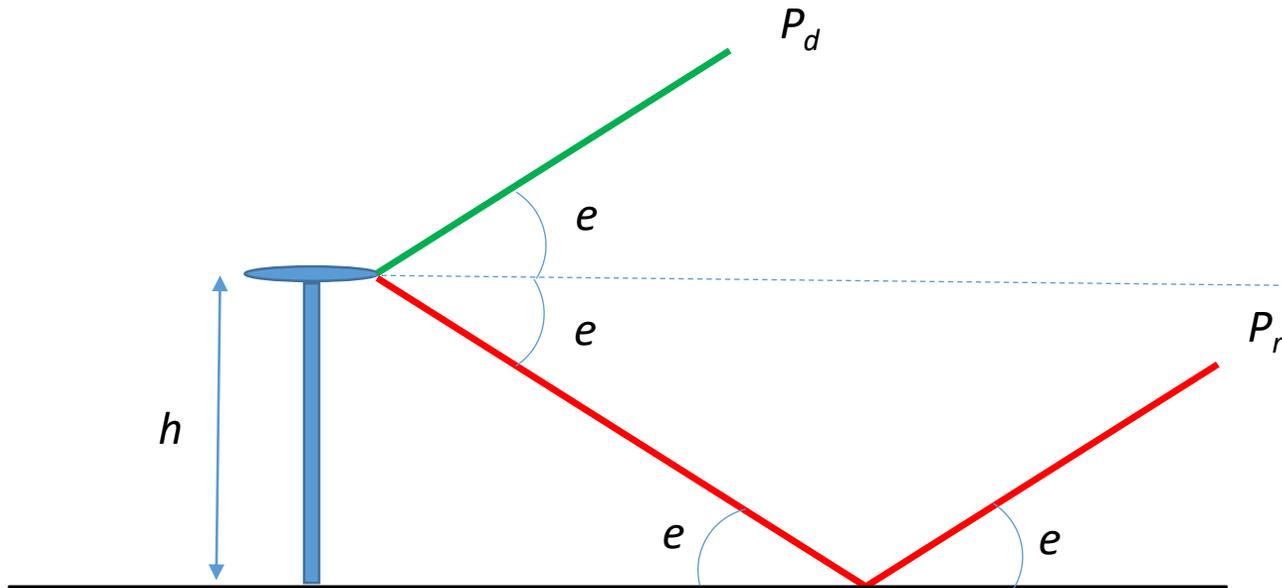
$$C/N_0(dB - Hz) = \cancel{P_d + P_r} + 2\sqrt{P_d P_r} \cos \theta$$

Pour simplifier, on assume une valeur de bande passante du front-end de 1 Hz, ce qui nous donne :

$$SNR(dB) = C/N_0(dB - Hz) \quad \text{et en unités linéaires} \quad SNR(v/v) = 10^{\frac{SNR(dB)}{20}}$$



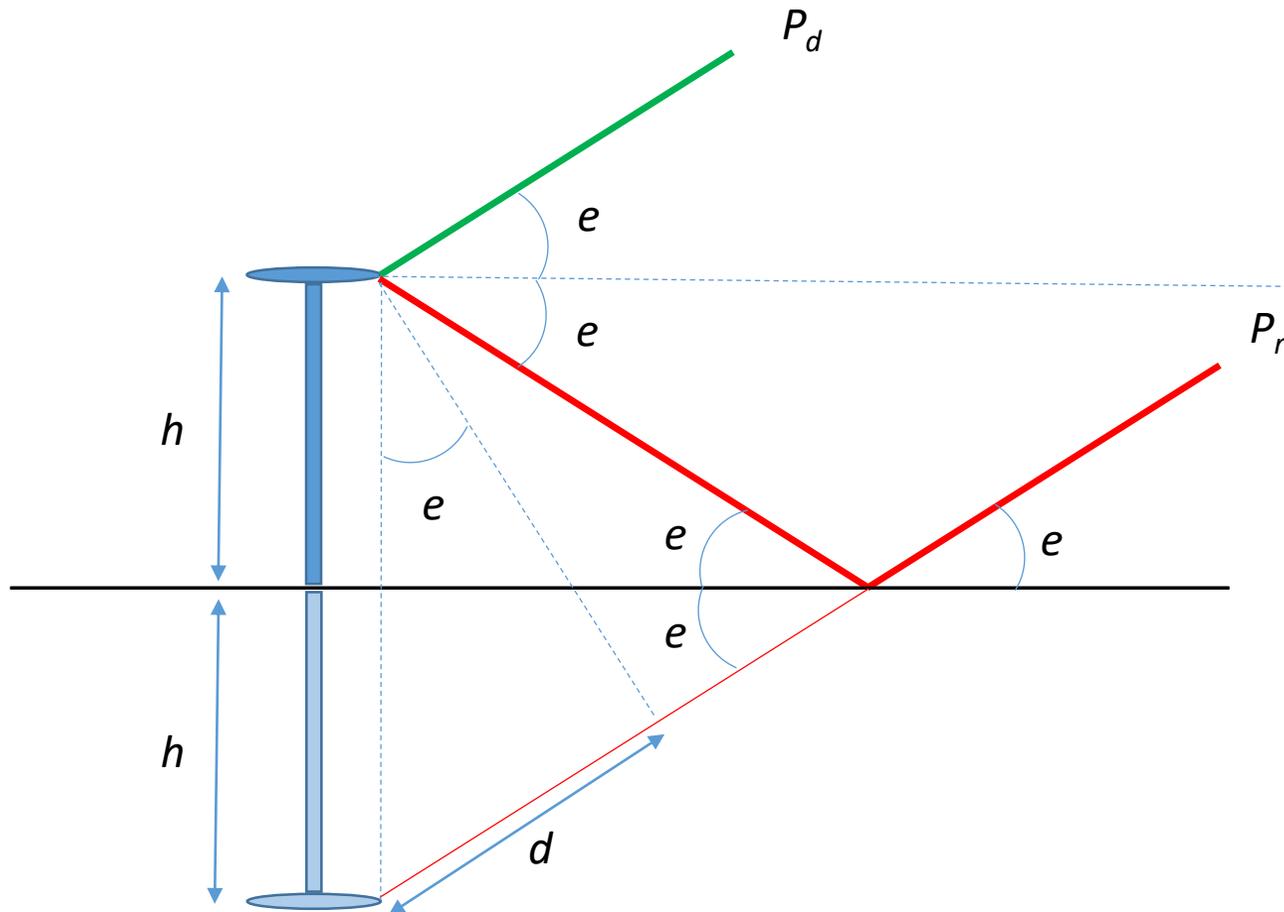
Equation d'observation SNR



$$SNR = A \cos \theta$$

$$SNR = A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} d + \varphi_0 \right)$$

Equation d'observation SNR



$$SNR = A \cos \theta$$

$$SNR = A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} d + \varphi_0 \right)$$

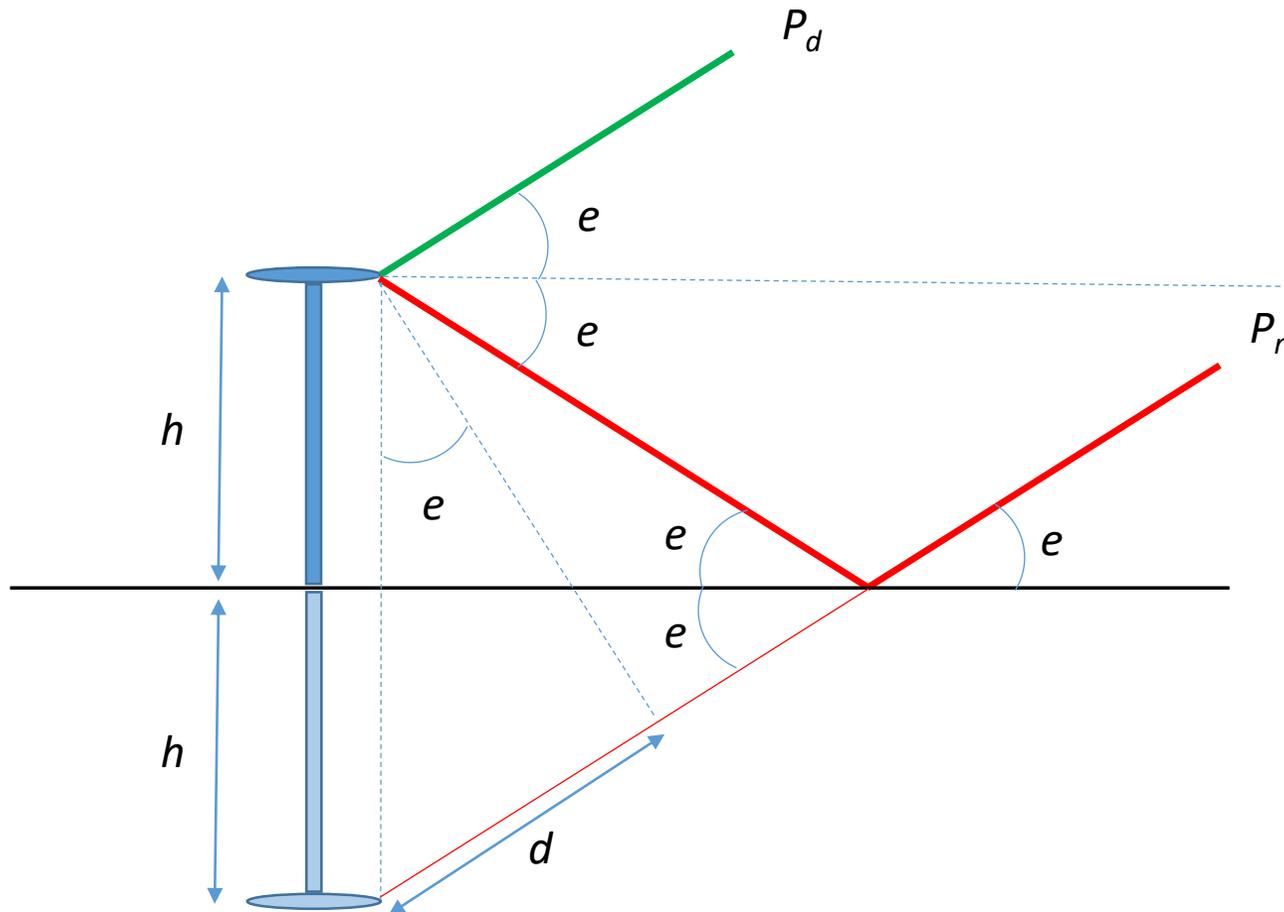
$$d = 2h \sin e$$

$$SNR = A \cos \left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin e + \varphi_0 \right)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \theta}{\partial \sin e} = \frac{2}{\lambda} h \quad \text{En cycles par sin } e$$

$$SNR = A \cos(2\pi f \sin e + \varphi_0)$$

Equation d'observation SNR



$$SNR = A \cos \theta$$

$$SNR = A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} d + \varphi_0 \right)$$

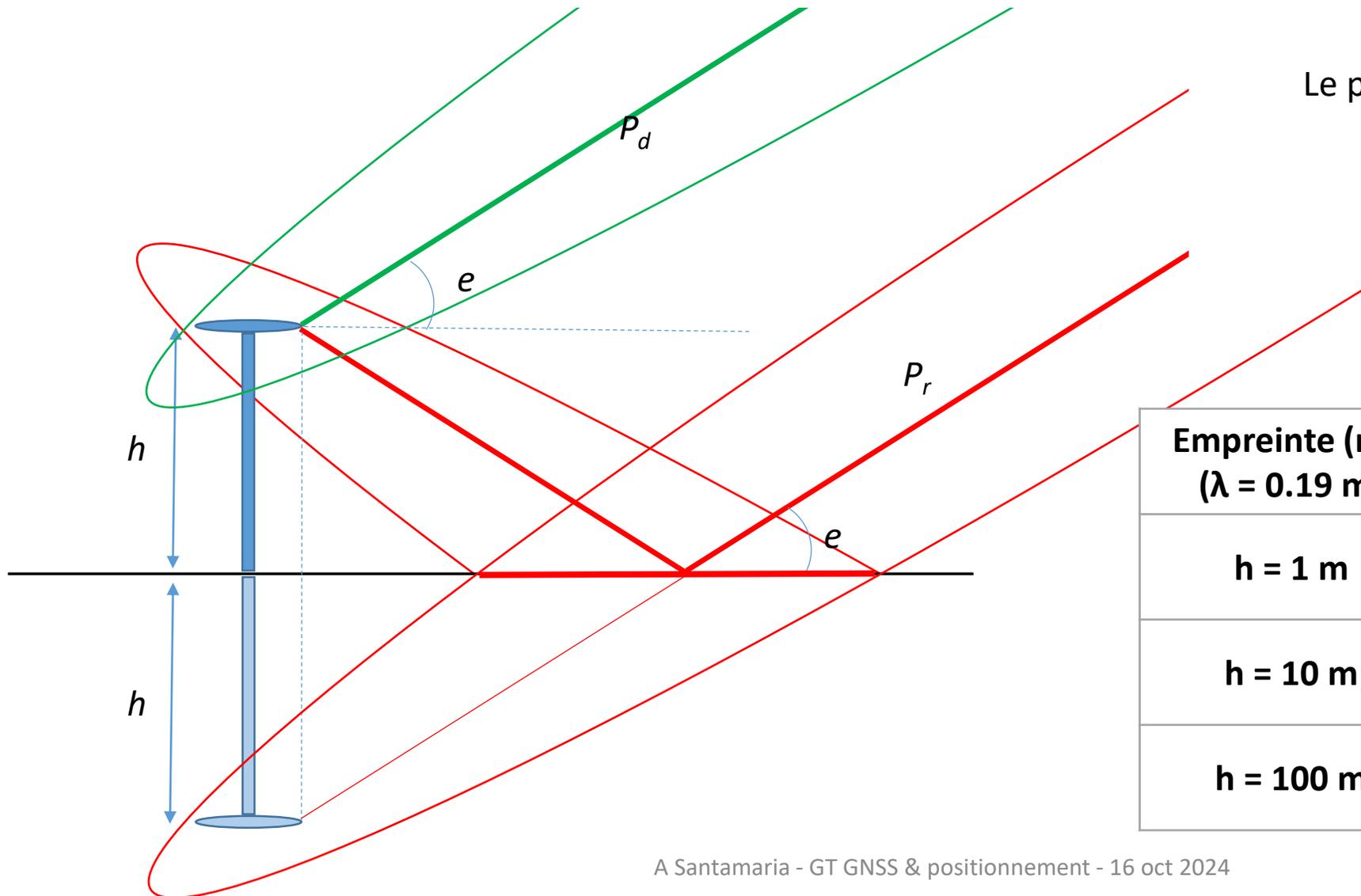
$$d = 2h \sin e - \delta tropo$$

$$SNR = A \cos \left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin e - \delta tropo + \varphi_0 \right)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \theta}{\partial \sin e} = \frac{2}{\lambda} h \quad \text{En cycles par sin } e$$

$$SNR = A \cos(2\pi f \sin e - \delta tropo + \varphi_0)$$

Empreinte de la réflexion GNSS



Le premier ellipsoïde de Fresnel

$$R_a \approx \sqrt{\frac{h\lambda}{(\sin e)^3}}$$

$$R_b \approx R_a \sin e$$

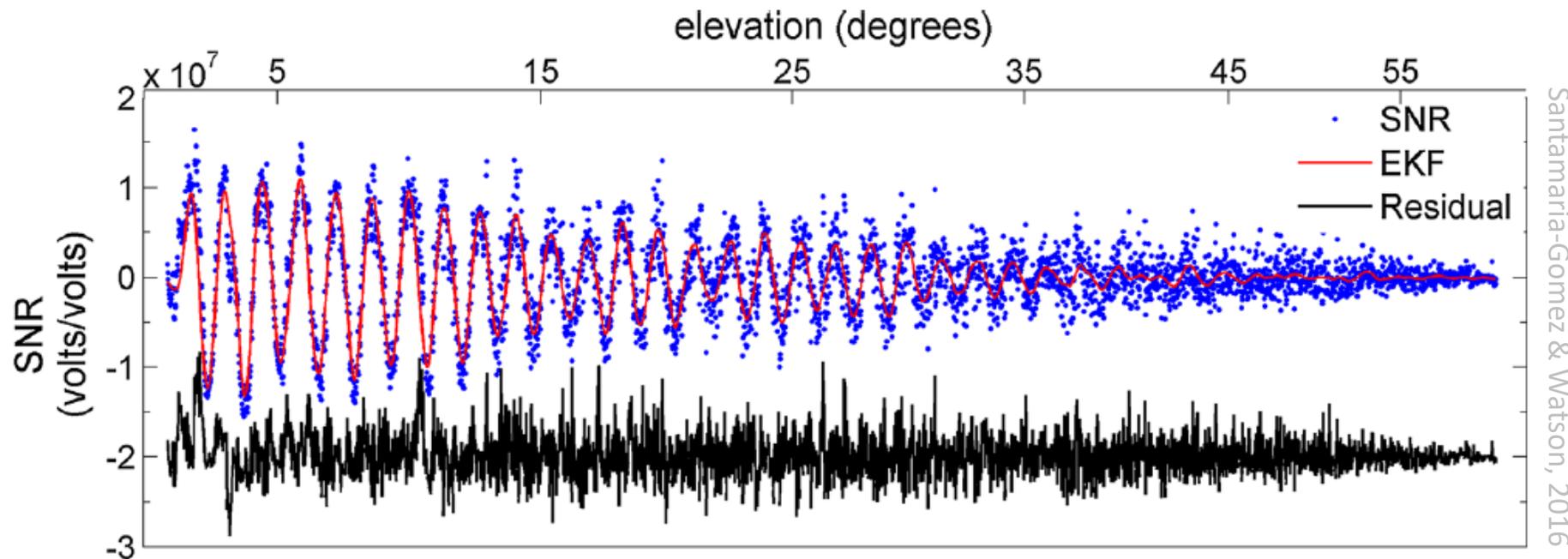
Empreinte (m ²) (λ = 0.19 m)	e = 5 °	e = 15 °	e = 90 °
h = 1 m	121.4	10.5	0.6
h = 10 m	828.6	90.7	6.0
h = 100 m	7900.8	892.7	59.7

Méthodes de traitement

Estimation de la fréquence SNR (f) par plusieurs méthodes:

$$h = \frac{\lambda}{2} f$$

- Périodogramme : facile de mettre en place et calcul rapide
 - Ondelette : carte des variations de fréquence
 - Filtre de Kalman : dynamique et instantané (temps-réel)
- signal SNR stationnaire et long
lent et peu précis (échantillonnage en sin e)
implémentation complexe et complaisante



Considérations pratiques

1) La phase (θ) du signal SNR varie plus rapidement en fonction de l'hauteur et du changement d'élévation du satellite.

$$f = \frac{2}{\lambda} h \quad \xrightarrow{L1 \lambda \approx 0.19 \text{ m}} \quad f(\text{cycles} / \sin e) \approx 10 h(m)$$

Plus l'hauteur est importante, plus d'oscillations du signal SNR, et donc meilleure résolution/précision spectrale.

Message : mettez vos antennes bien haut !!

2) Attention aux marées descendantes (15 m au Mont St Michel) car la valeur max. de f , donc de l'hauteur observable, est limitée par la fréquence d'échantillonnage des données SNR en $\sin(e)$ (théorème de Nyquist) et par la fréquence GNSS utilisée.

L'échantillonnage en $\sin(e)$ dépend de la trajectoire du satellite : constellation, latitude du site et l'azimut visé. La pire situation est donnée par la fréquence L1 d'un satellite GPS ascendant/descendant rapidement (verticalement).

Un RINEX à 30 s réduit 30 fois l'hauteur max. observable par rapport à 1 s.

Message : fichiers RINEX à 1 s plus sûr que à 30 s !!