

# Principes de base de la technique réflectométrie GNSS



Alvaro Santamaría

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

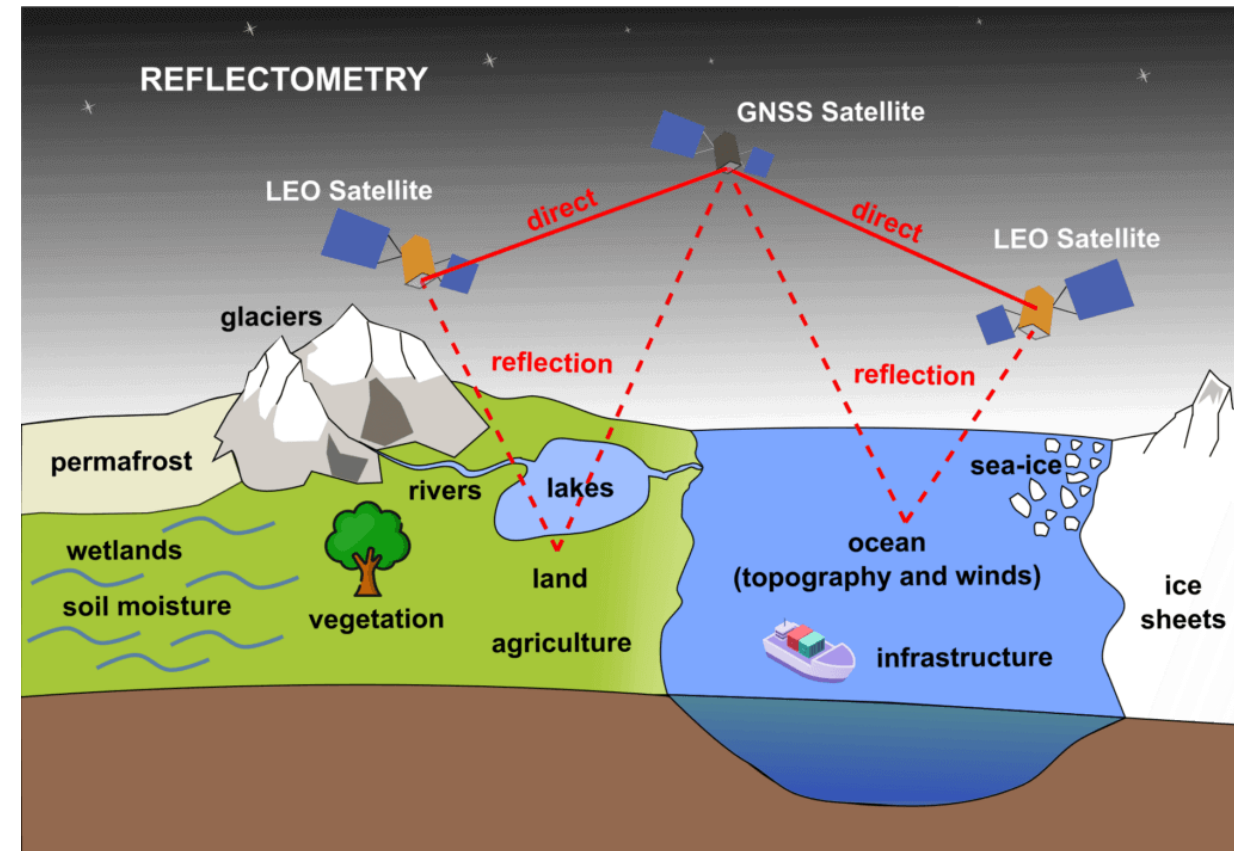
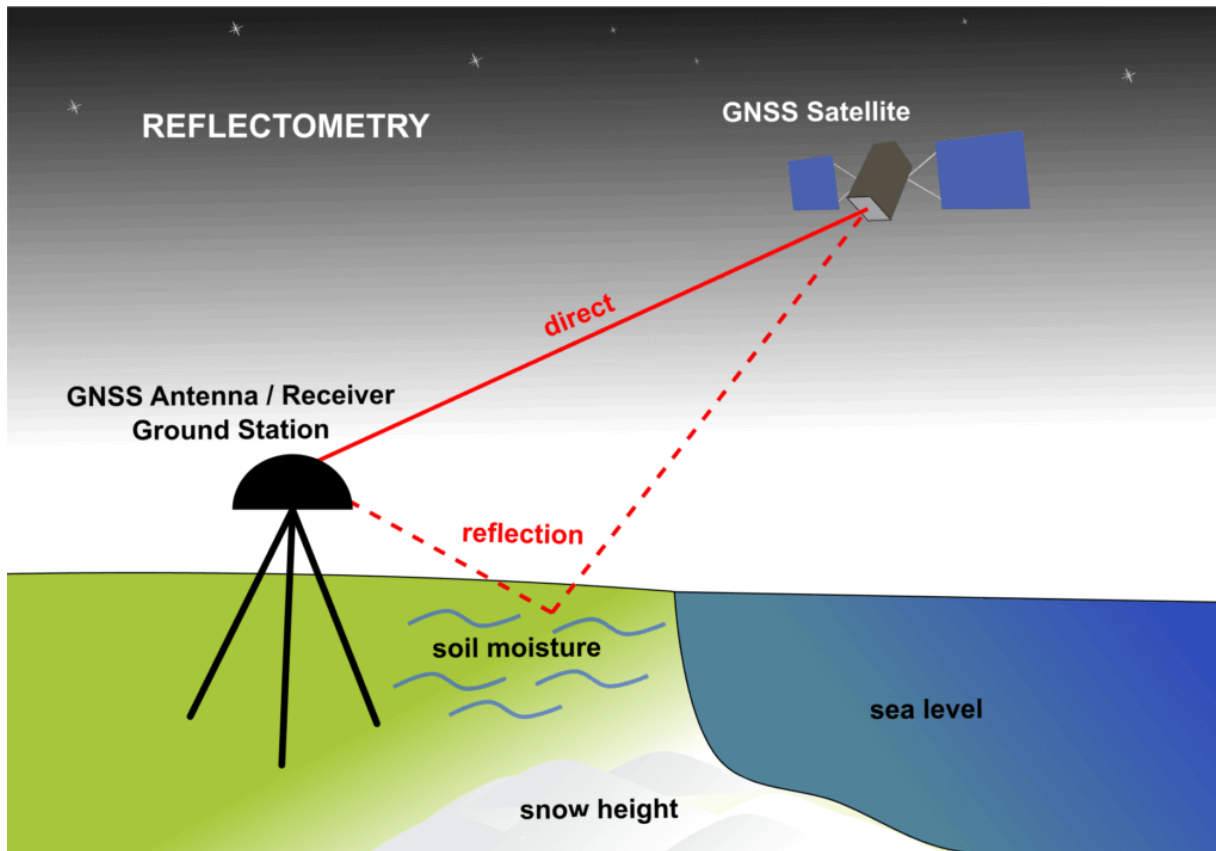
Groupe de travail GNSS & positionnement  
Commission Géopositionnement du CNIG

16 octobre 2024

# Fonctionnement de la réflectométrie GNSS

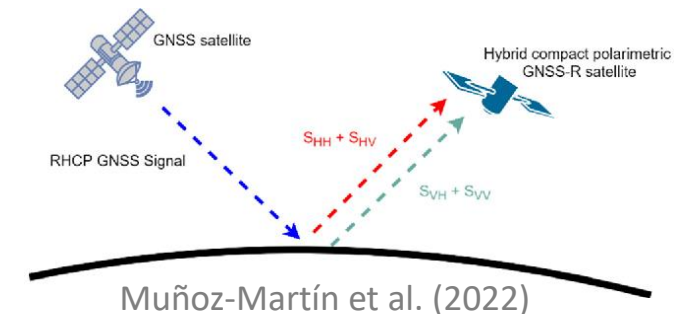
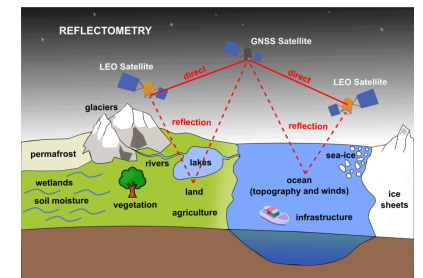
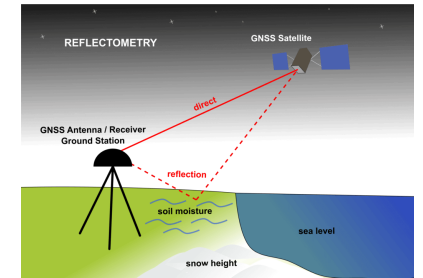
Multi-radar bistatique passif à haute résolution spatiotemporelle et à moindre cout.

<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 rugueuse<sup>1</sup>.
2. Cartes doppler, forme d'onde ou diffusométrie/scatterométrie : réflexion incohérente avec angle d'incidence haut ou surface très rugueuse<sup>1</sup>.
3. Polarimétrie : interférence entre les deux polarisations présentes dans l'onde réfléchie



<sup>1</sup> 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**

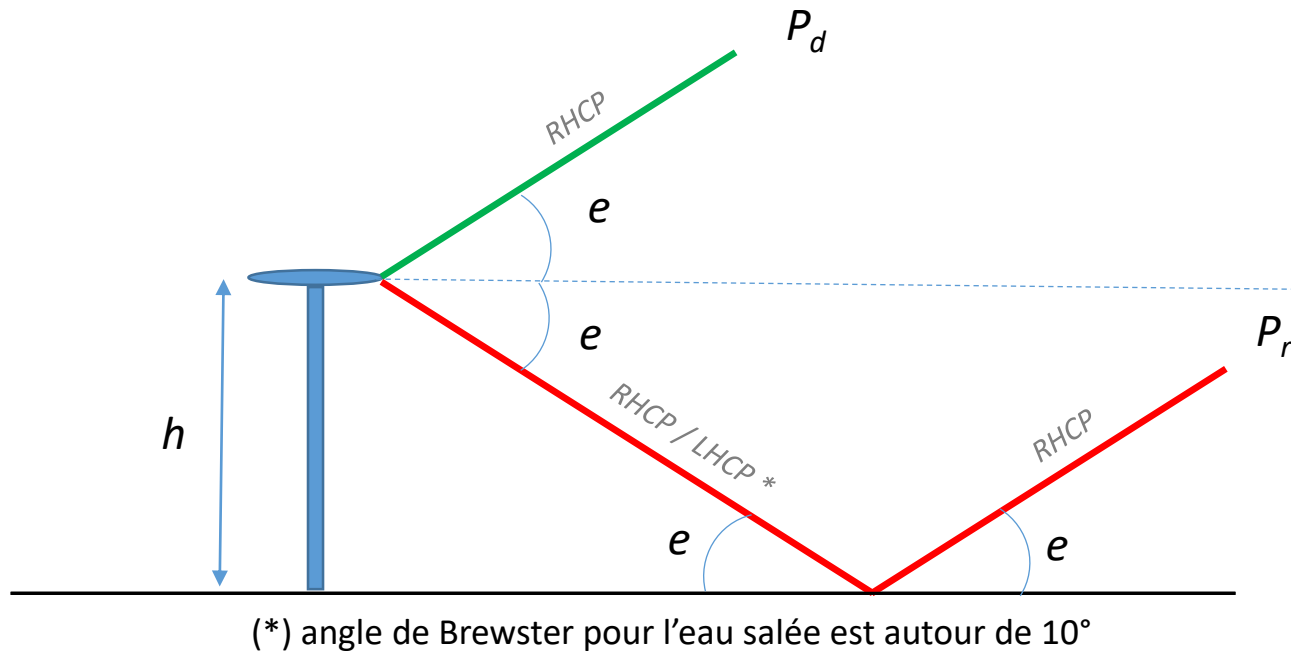
# Observations GNSS-R depuis l'espace

- 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

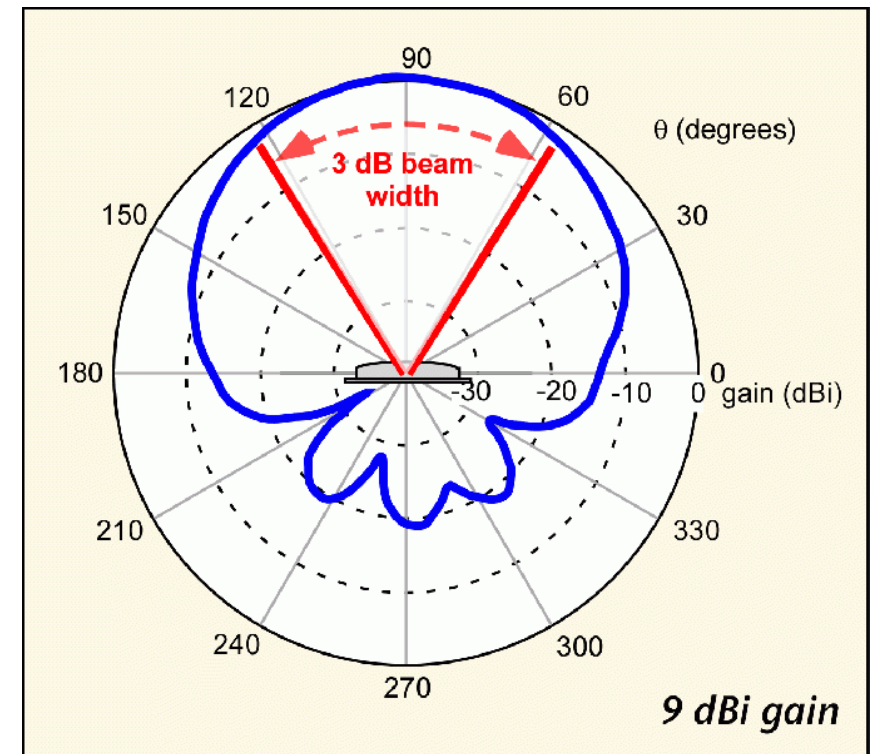
- Altimétrie des surfaces d'eau
- Rugosité des surfaces d'eau (vitesse et direction du vent en surface)
- Hauteur des vagues, courants et tsunامي
- Salinité et température de l'eau marine
- Localisation et épaisseur de la glace de mer
- Epaisseur de l'enneigement
- Humidité du sol et végétation
- Etalonnage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

# Application: altimétrie par interférométrie SNR



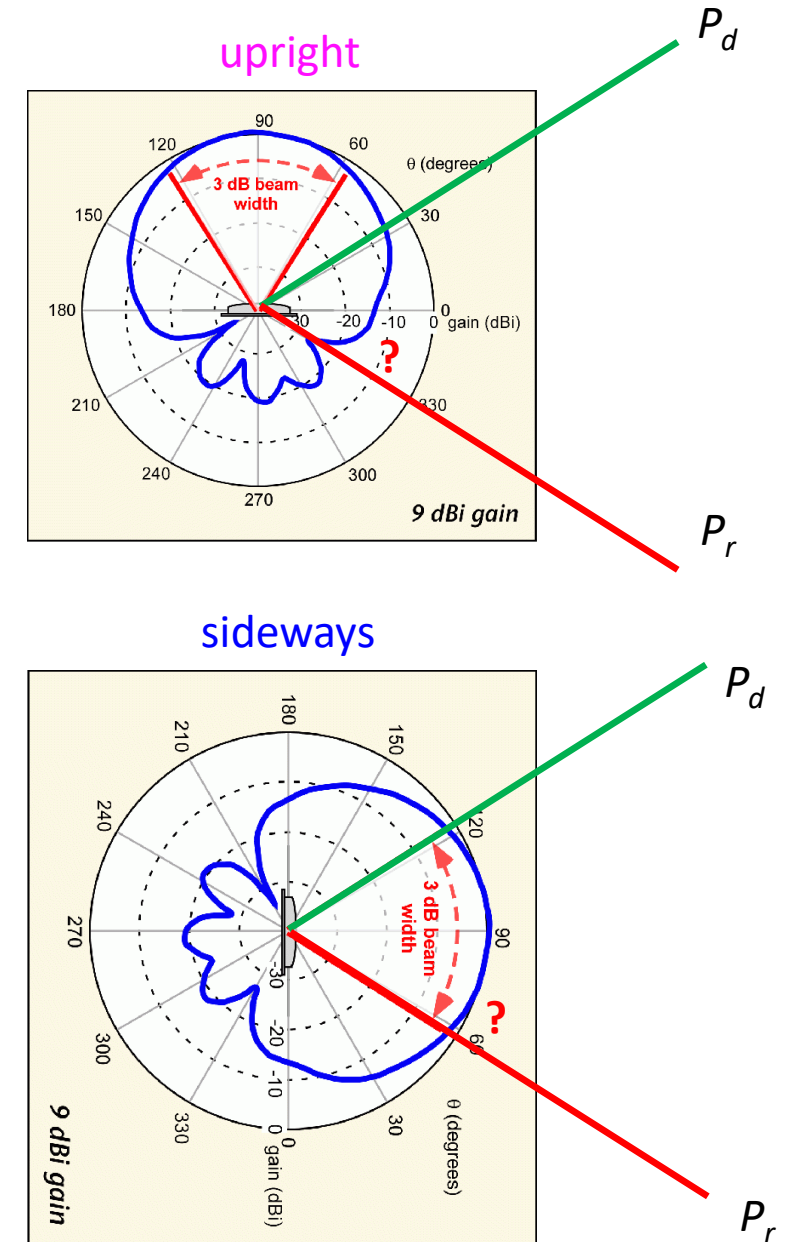
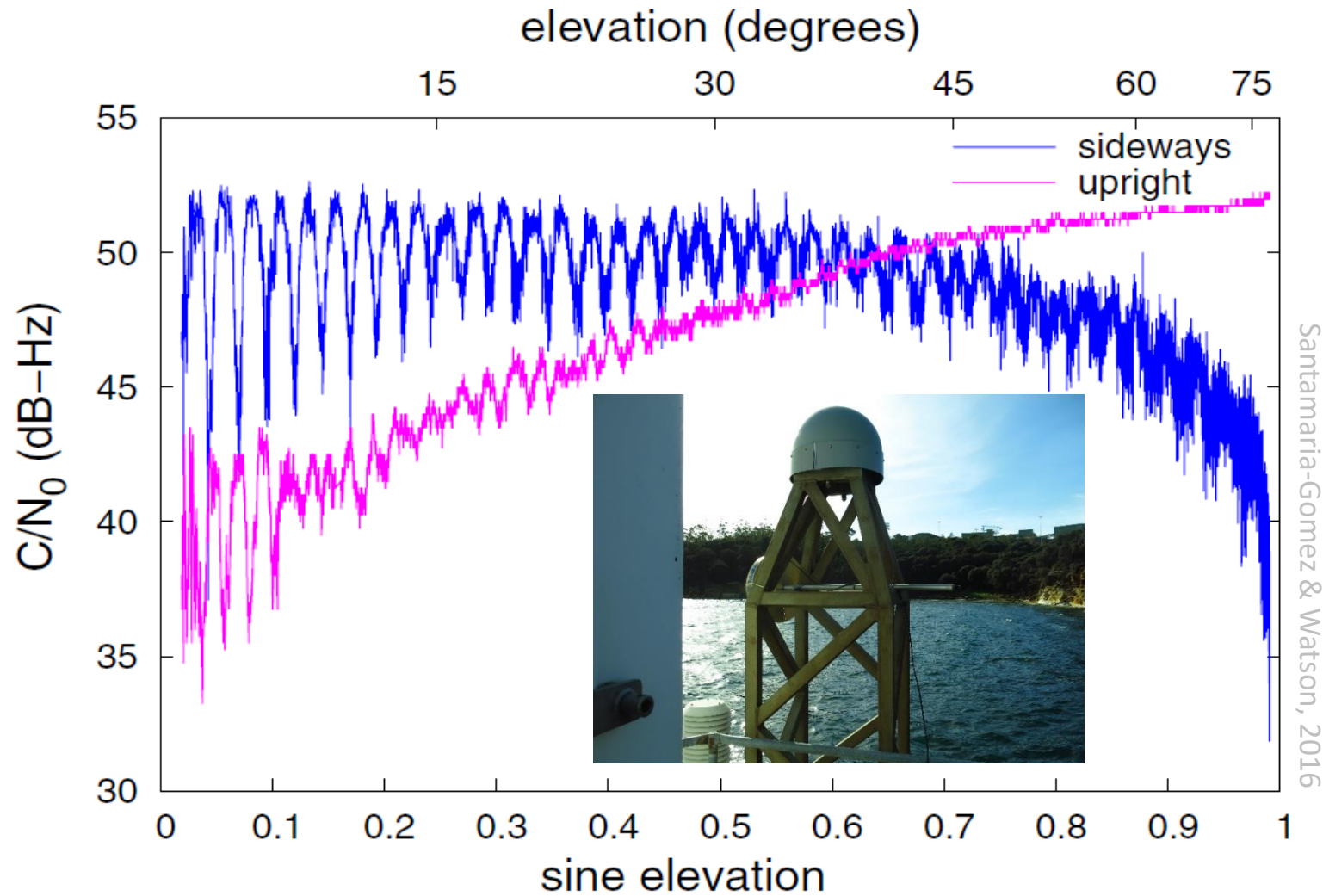
$$SNR = P_d + P_r + 2\sqrt{P_d P_r} \cos \theta$$

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





# L'effet d'une bonne antenne géodésique





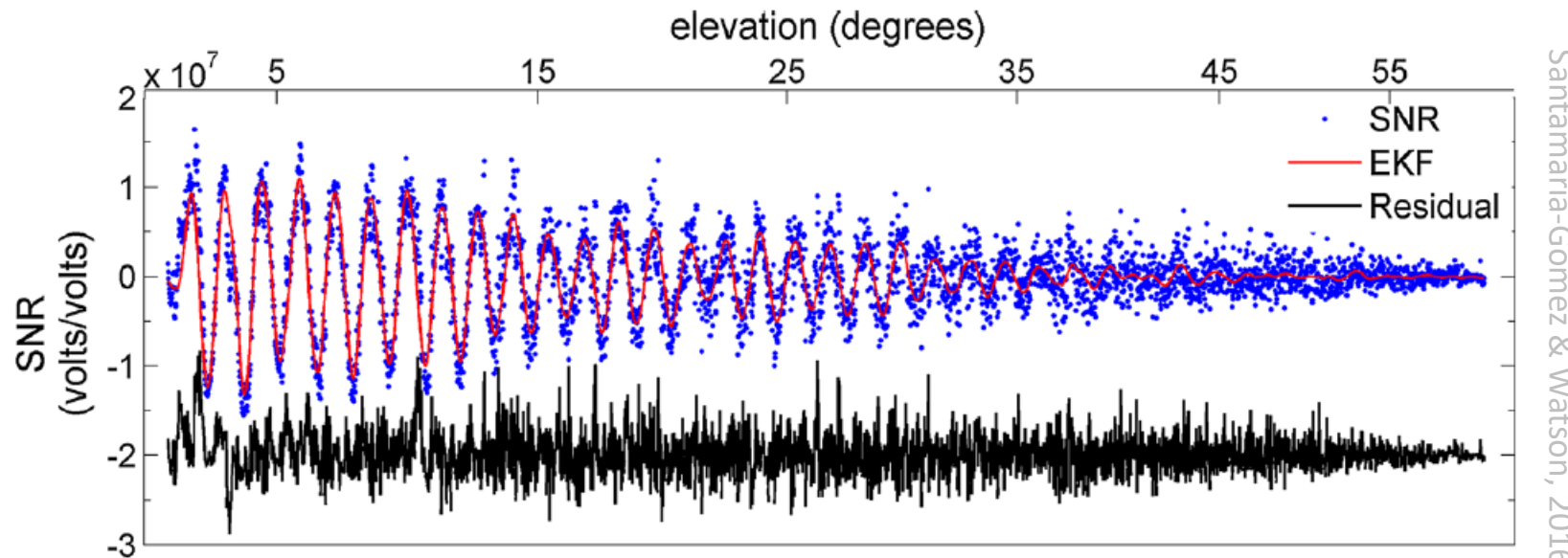
# Prétraitement du « SNR »

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

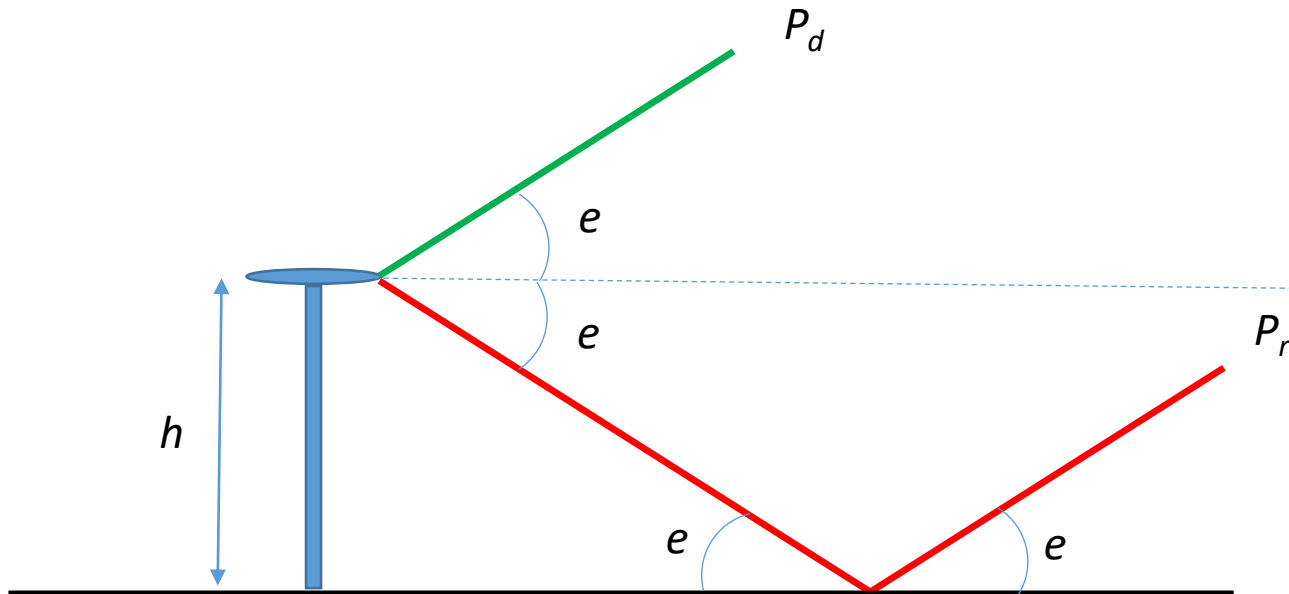
$$C/N_0(dB - Hz) = \cancel{P_d + P_r} + 2\sqrt{P_d P_r} \cos \theta$$

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

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



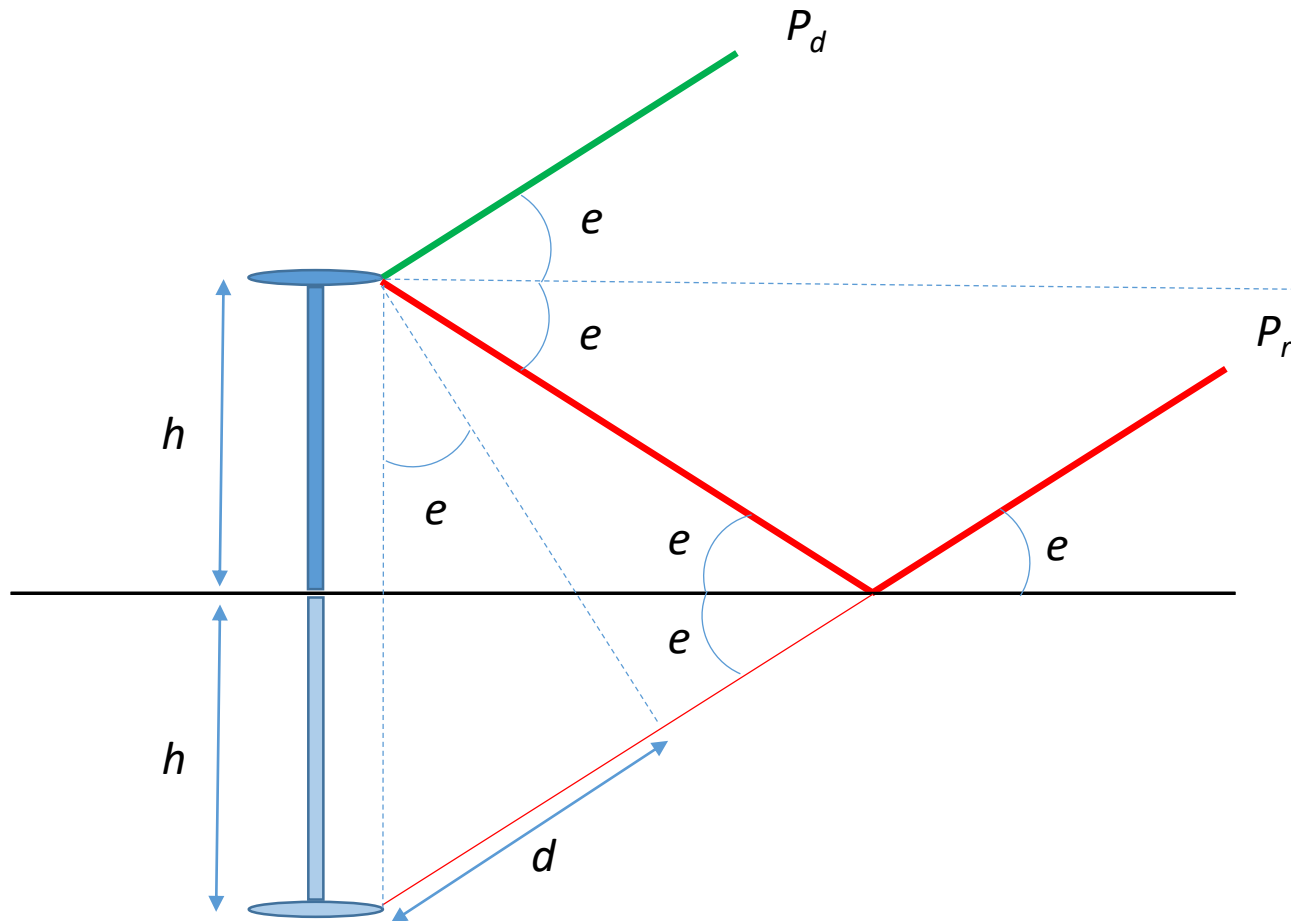
# Equation d'observation SNR



$$SNR = A \cos \theta$$

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

# Equation d'observation SNR



$$SNR = A \cos \theta$$

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

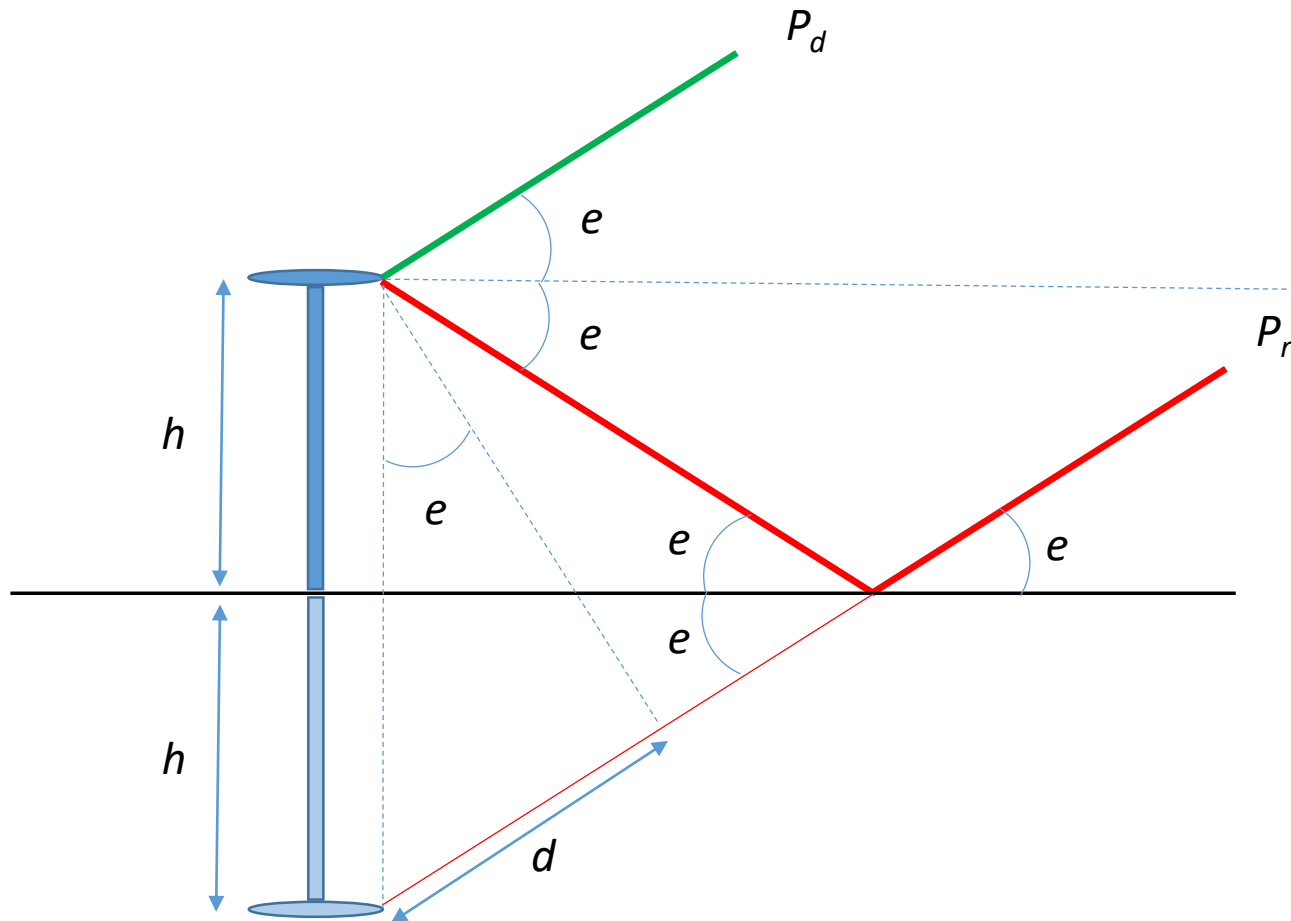
$$d = 2h \sin e$$

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

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

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

# Equation d'observation SNR



$$SNR = A \cos \theta$$

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

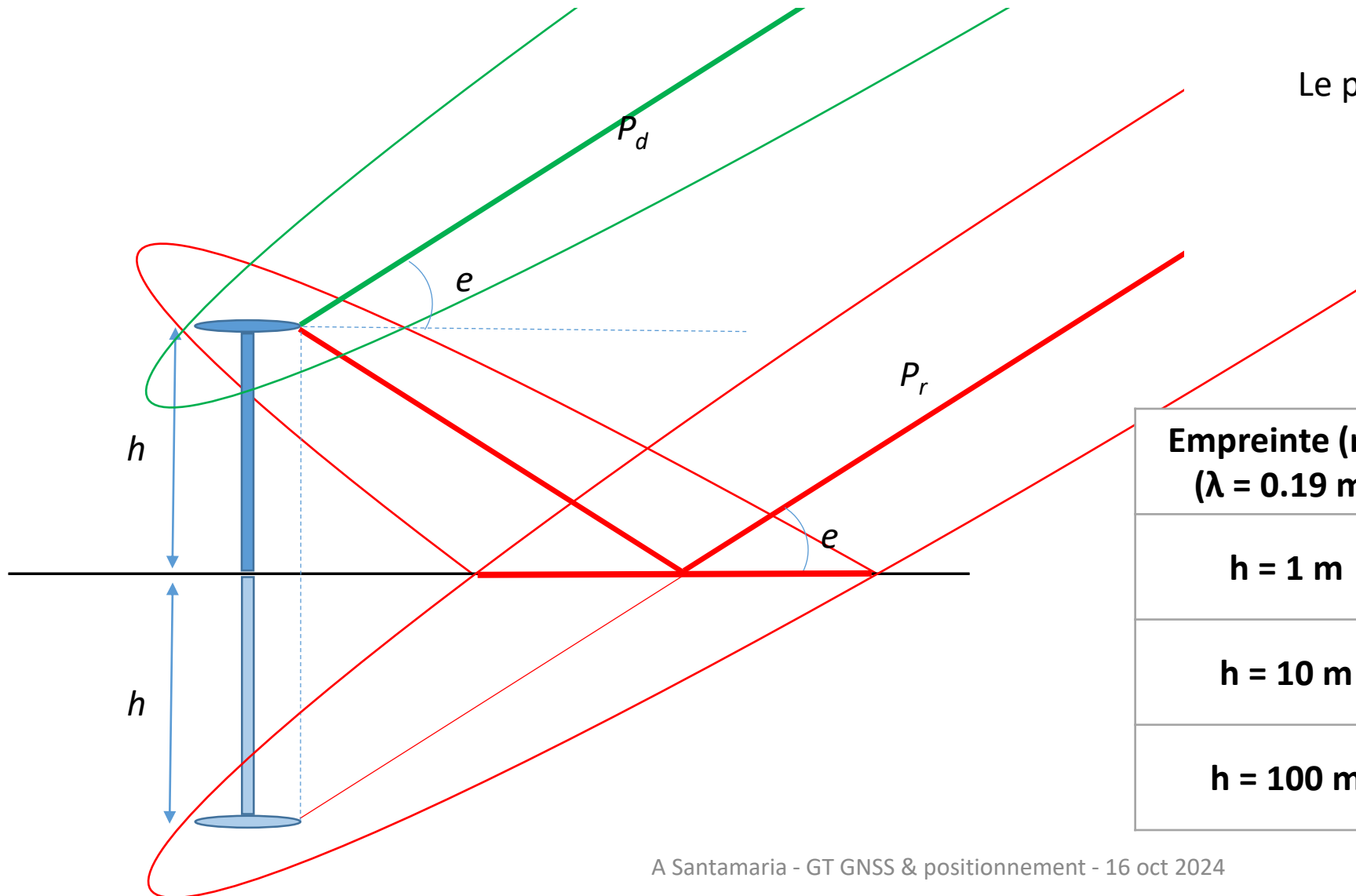
$$d = 2h \sin e - \text{tropo}$$

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

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

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

# Empreinte de la réflexion GNSS



Le premier ellipsoïde de Fresnel

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

$$R_b \approx R_a \sin e$$

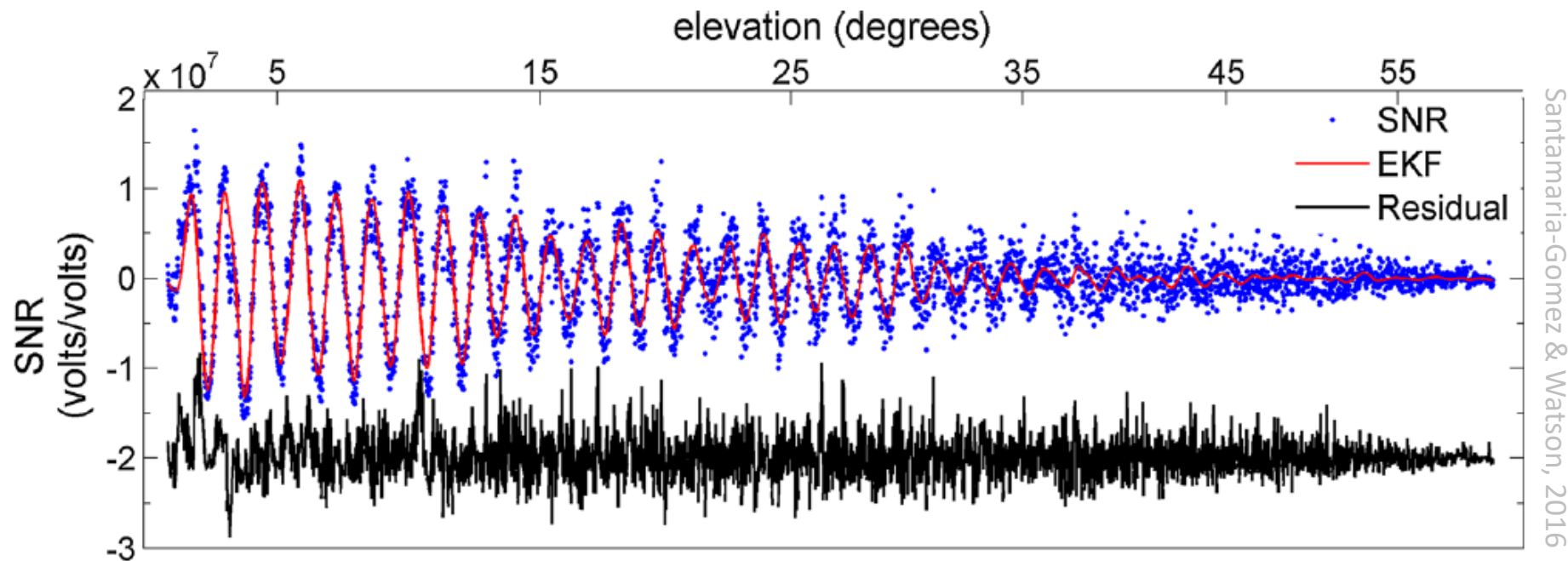
Empreinte (m <sup>2</sup> ) (λ = 0.19 m)	e = 5 °	e = 15 °	e = 90 °
h = 1 m	121.4	10.5	0.6
h = 10 m	828.6	90.7	6.0
h = 100 m	7900.8	892.7	59.7

# 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 ( $\theta$ ) 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 !!