MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
TRANSPORTS
VILLE ET LOGEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM

le cnam
Laboratoire
Géomatique et Foncier
gef

cnes
CENTRE NATIONAL
D'ÉTUDES SPATIALES

Mesurer le niveau de la mer :

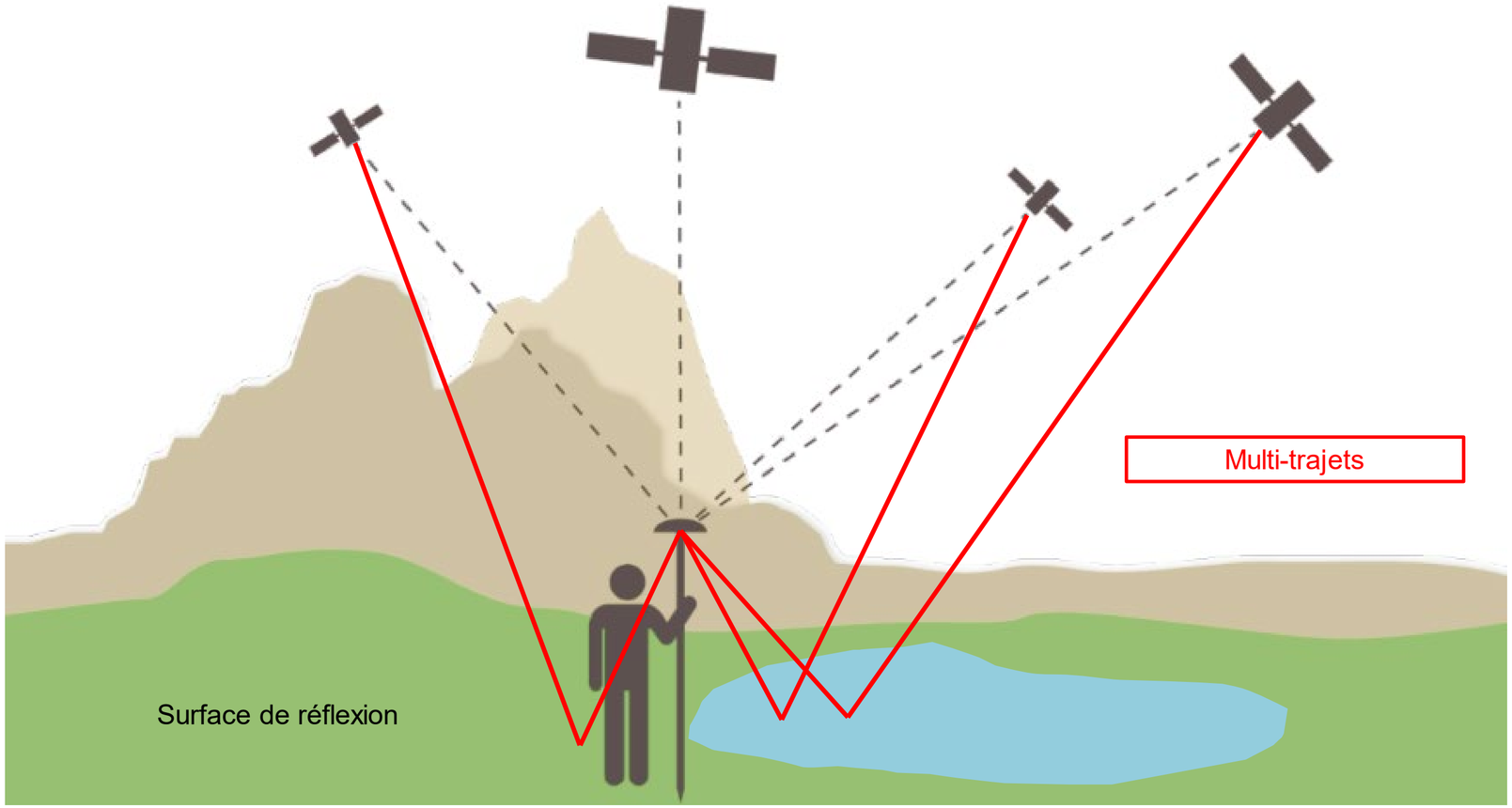
Méthode de la réflectométrie GNSS par mesure de phase de porteuse

Nolan VARAIS, Jérôme VERDUN, José CALI, Laurent LESTARQUIT

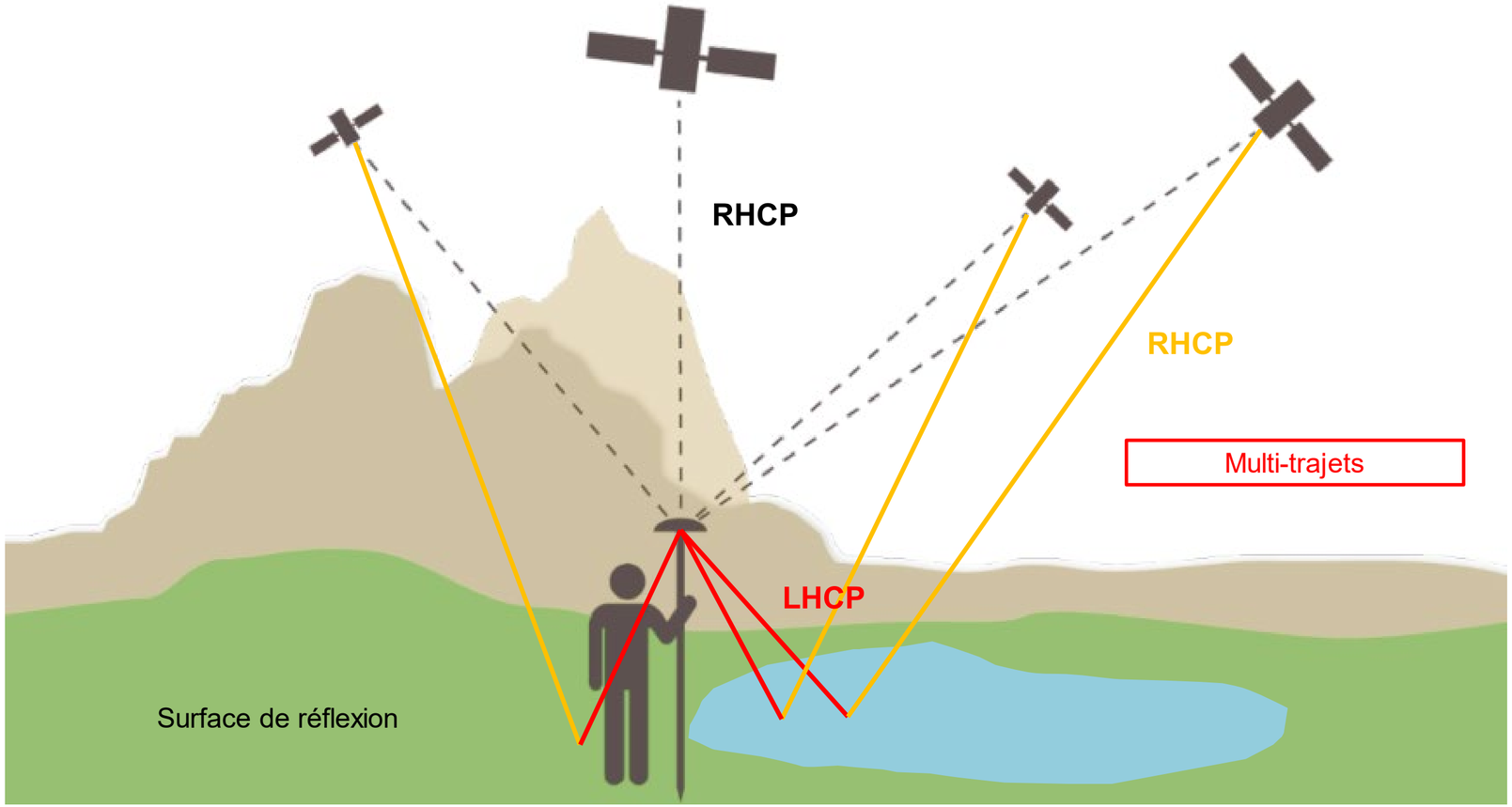
PARTENAIRE SCIENCE COMES TO TOWN
Financé par l'Union européenne

MARINE NATIONALE 400 ANS

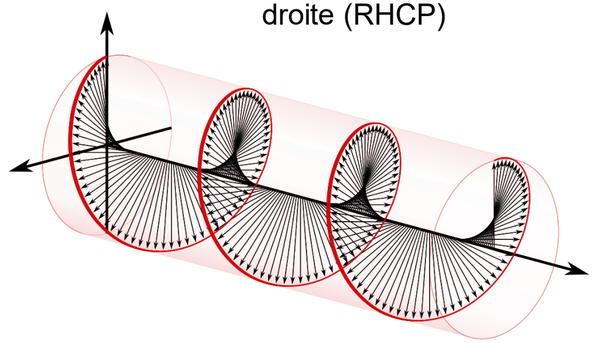
Principe de la réflectométrie par mesure de phase



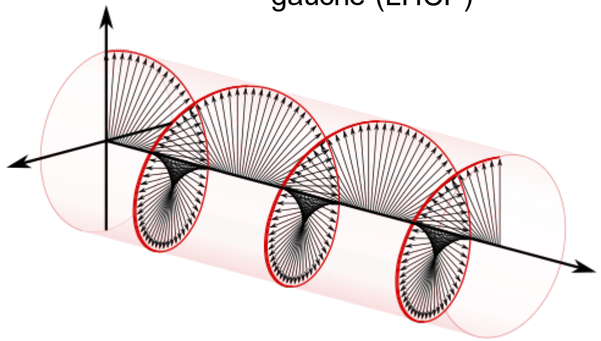
- C.D. Hall, 1988
- M. Martin-Neira, 1993

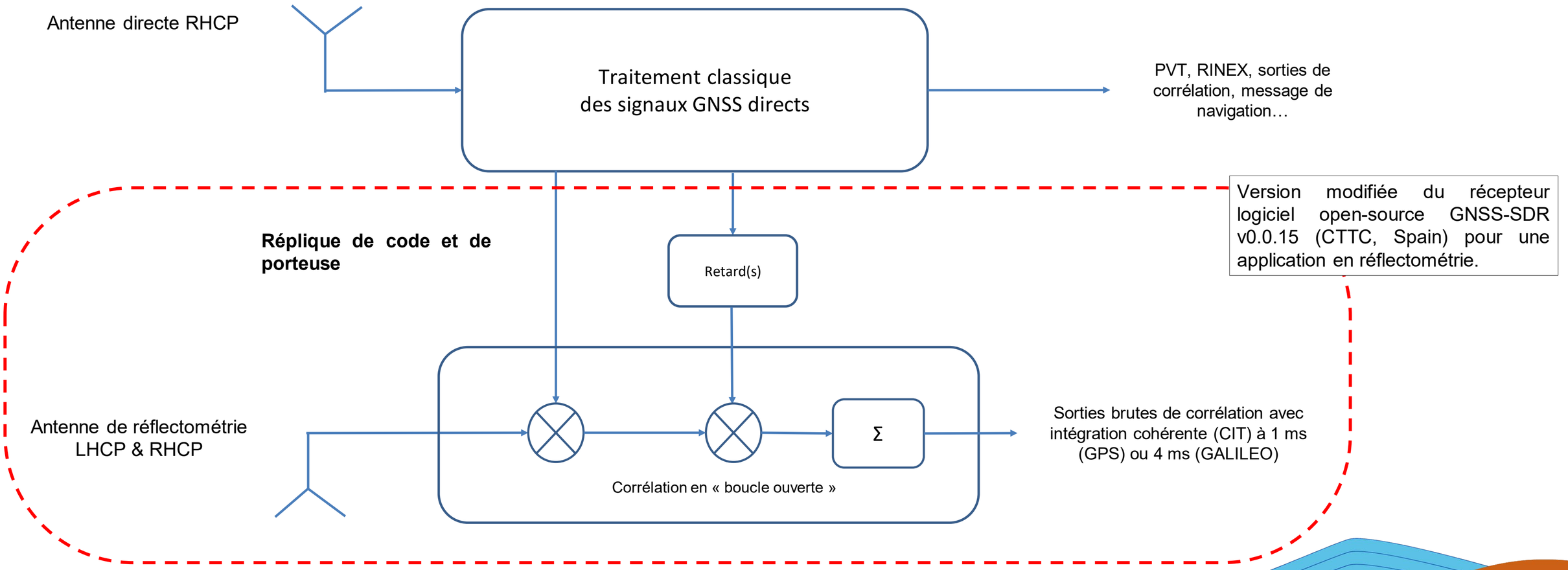


Polarisation circulaire droite (RHCP)

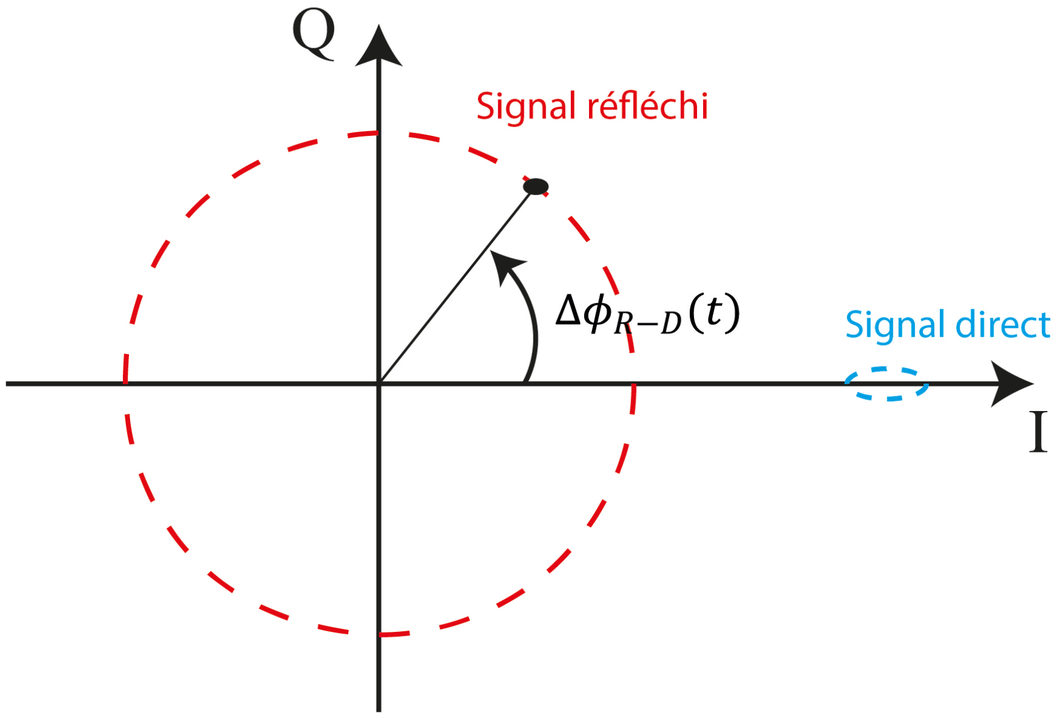


Polarisation circulaire gauche (LHCP)



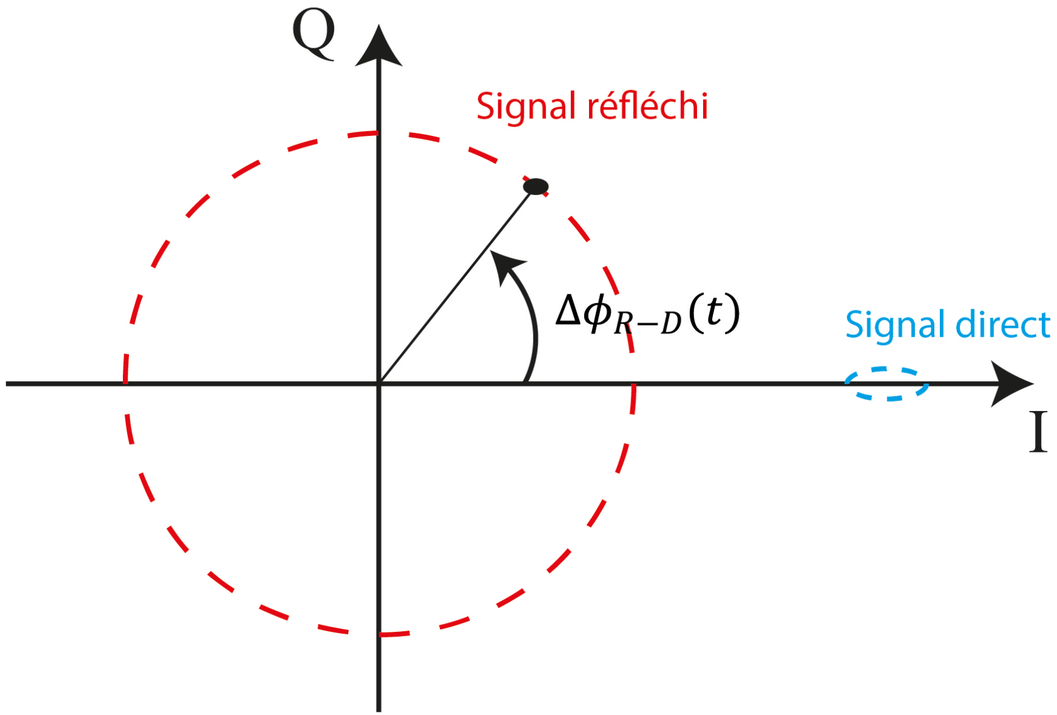

Antenne directe RHCP
Traitement classique
des signaux GNSS directs
PVT, RINEX, sorties de corrélation, message de navigation…
Version modifiée du récepteur logiciel open-source GNSS-SDR v0.0.15 (CTTC, Spain) pour une application en réflectométrie.
Réplique de code et de porteuse
Retard(s)
Antenne de réflectométrie LHCP & RHCP
Σ
Sorties brutes de corrélation avec intégration cohérente (CIT) à 1 ms (GPS) ou 4 ms (GALILEO)
Corrélation en « boucle ouverte »

Même réplique de porteuse pour les signaux directs et réfléchis
= mesure directe de la différence de phase de porteuse

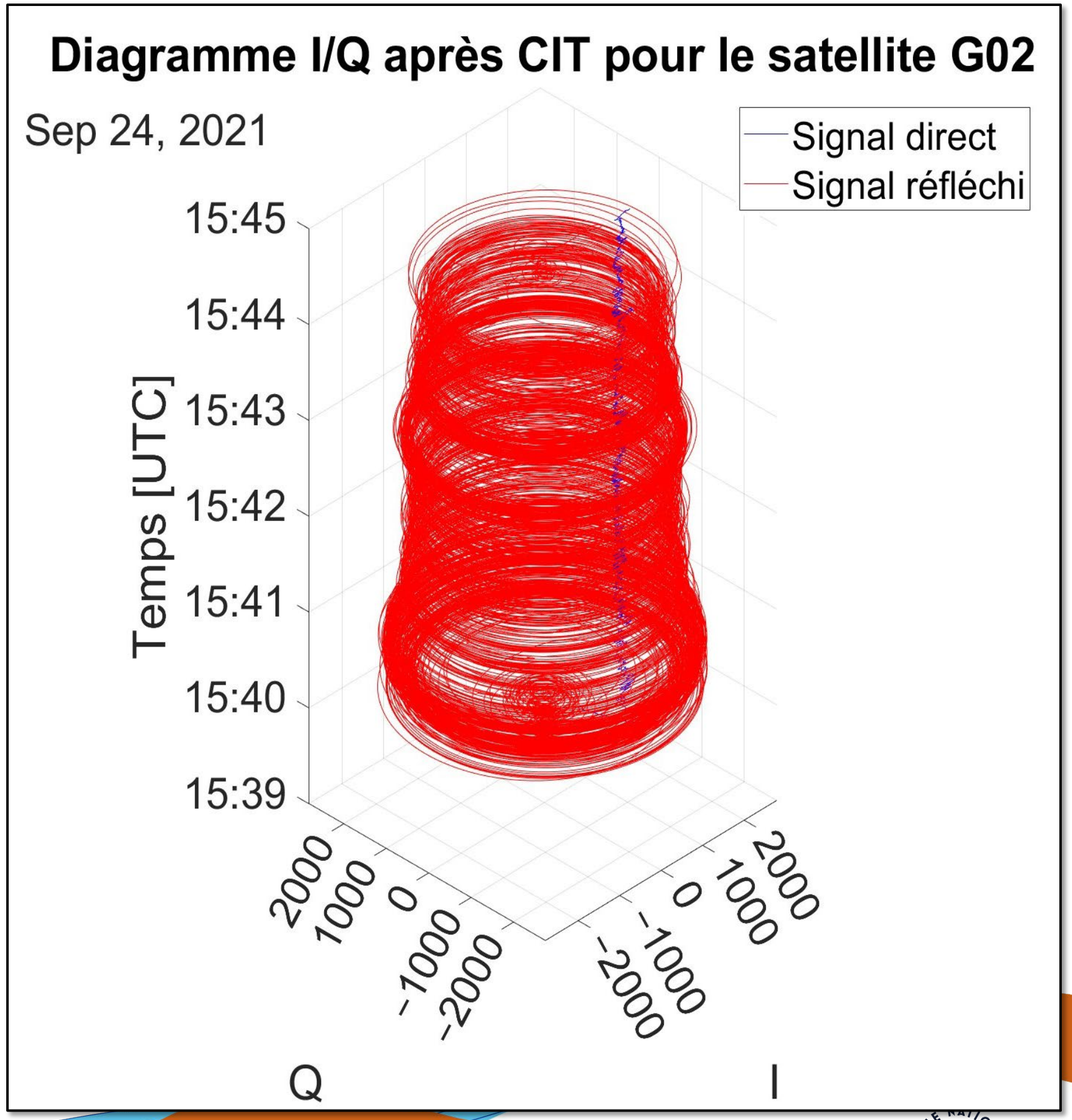


$$\Delta\phi_{R-D}(t) = unwrap\left(arctan2(R_Q, R_I)\right)$$

Même réplique de porteuse pour les signaux directs et réfléchis
= mesure directe de la différence de phase de porteuse



$$\Delta\phi_{R-D}(t) = unwrap\left(arctan2(R_Q, R_I)\right)$$



Mise en application sur le lac de Carcans-Hourtin

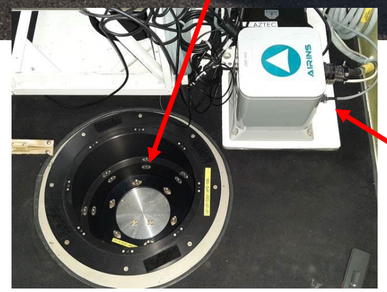


Antenne directe Trimble AV39





Antenne de réflectométrie



Centrale inertielle AIRins 100 Hz pour la détermination du bras de levier

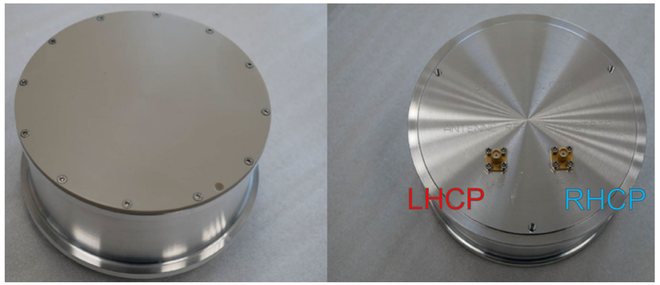


Antenne directe Trimble AV39



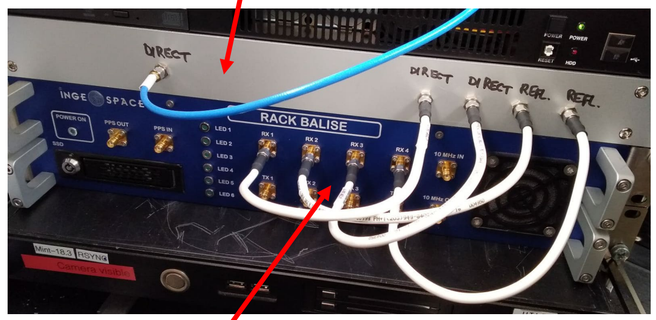


Conçue et développée par le Cnes
Toutes bandes GNSS entre 1,1 et 1,6 GHz
Deux voies LHCP et RHCP avec isolation



4 canaux RF synchronisés (2x2 paires de canaux RF, une fréquence centrale par paire)

Rack RF avec amplificateur, filtres et splitters



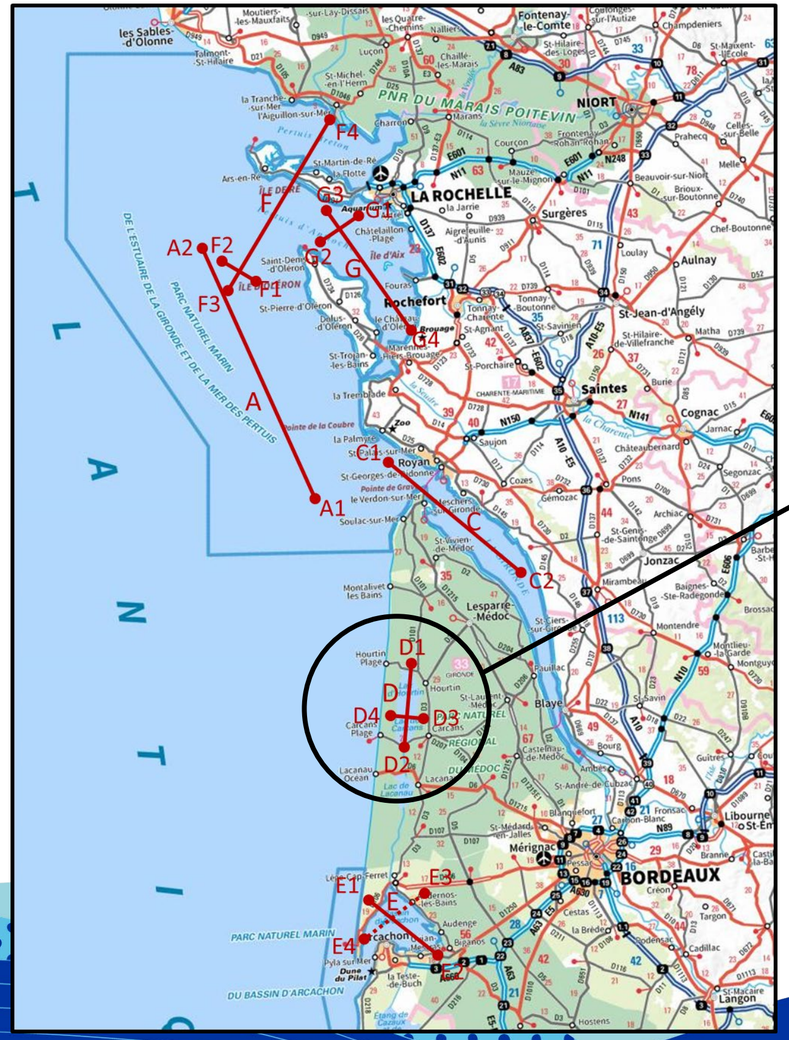
Numériseur

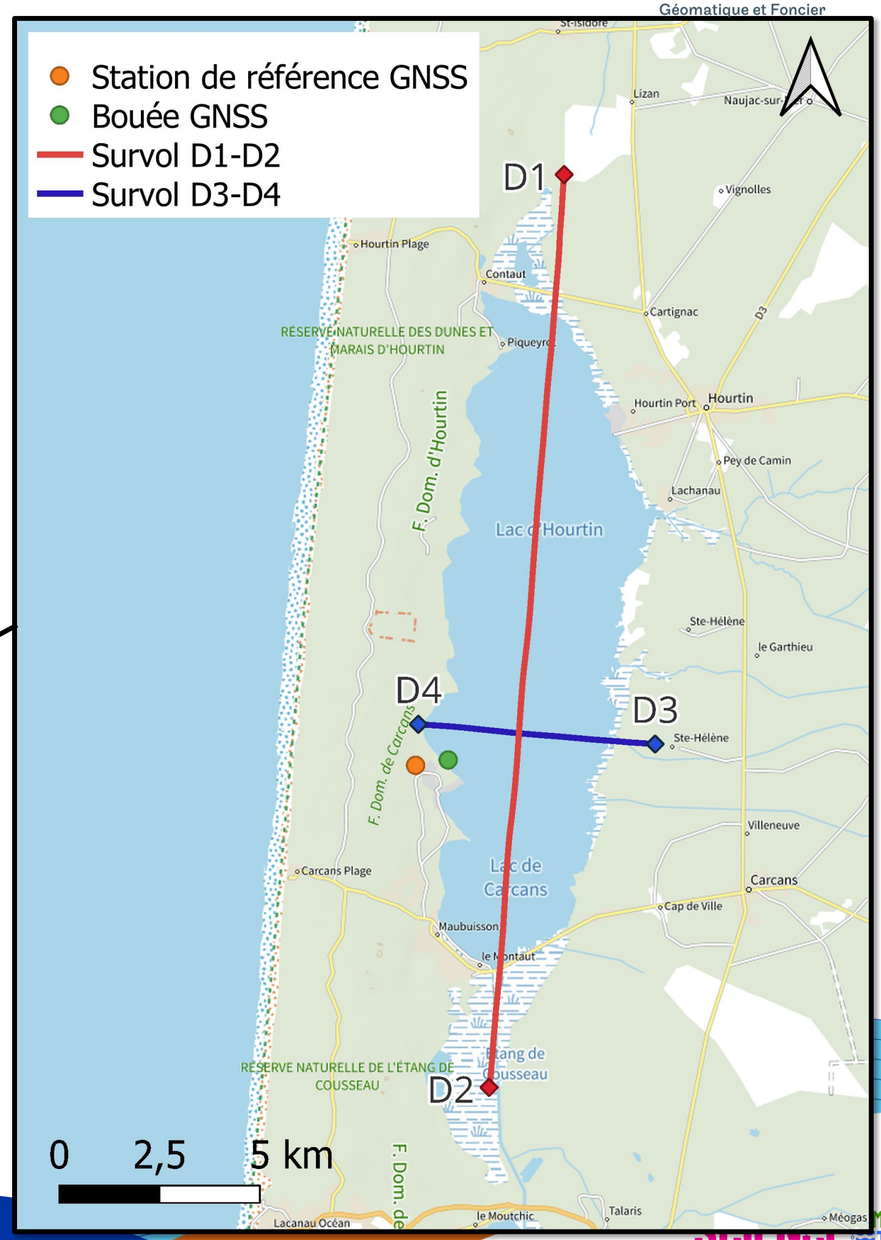
MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
TRANSPORTS
VILLE ET LOGEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM

le cnam
Laboratoire
Géomatique et Foncier
gef

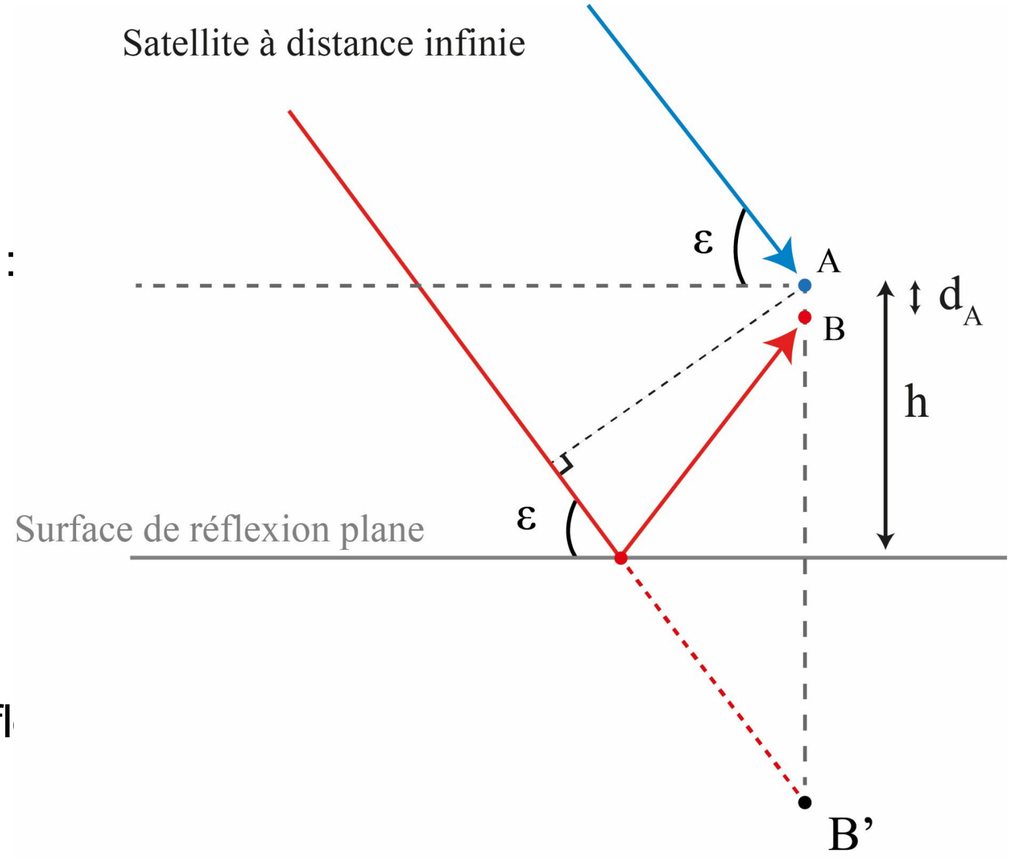
cnes
CENTRE NATIONAL
D'ÉTUDES SPATIALES





Modèle de « terre plate et satellite à distance infinie »

valide pour des hauteurs inférieures à 100 m seulement (sinon erreur géométrique > 1cm et nécessite correction courbure de la terre)



i satellites = i points de réflexions = i équations pour chaque époque :

$$\left(\Delta \boldsymbol{L_i^{R-D}} + \boldsymbol{N_i}\right)\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{2h}\sin\boldsymbol{\varepsilon_i} + \mathbf{b} + \mathbf{Aarm_i} + \boldsymbol{T_i}$$

avec ΔL_i^{R-D} = déphasage en nombre de cycles

N_i = ambiguïté entière

h = hauteur de la surface de réflexion

b = biais RF direct − réfléchi

A_{arm} = correction du bras de levier entre l'antenne directe et réfl

T = retard troposphérique additionnel modélisé

7 satellites en vue = 7 équations

$$-2\delta z_w \sin\varepsilon_i + \mathrm{b} = \left(\Delta L_i^{R-D} + N_i\right)\lambda - 2\hat{h}\sin\varepsilon_i - \mathrm{Aarm}_i - \widehat{T_i}$$

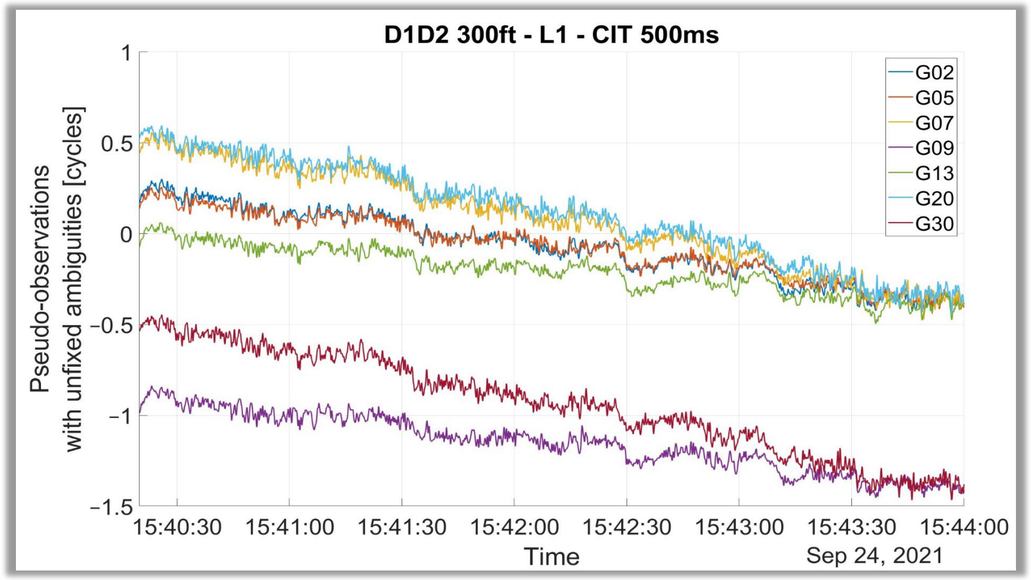
Pseudo-observations

Résolution par moindres carrés de δz_w et b

Hauteur estimée : $\hat{h} = z_{aircraft} - \widehat{z_w}$

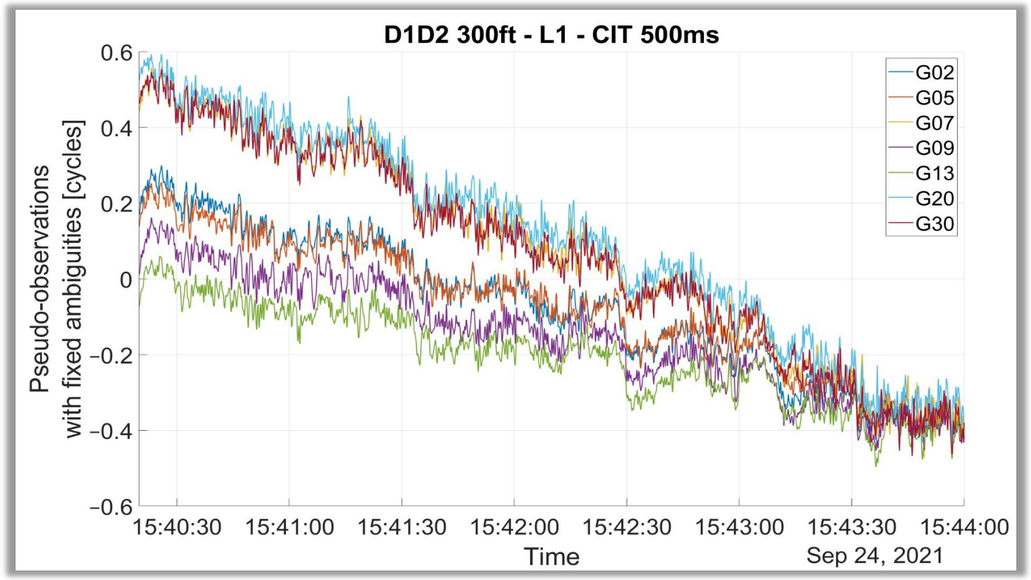
Hauteur de la surface d'eau : $z_w = \widehat{z_w} + \delta z_w$

Par exemple : $\widehat{z_w} = 59{,}98\ m$ (bouée GNSS)



G30 et G09

$N_i = \widehat{N_i} + 1$



Ambiguïté estimée : $\widehat{N_i} = floor\left(\frac{2\hat{h}\sin\varepsilon_i + \mathrm{Aarm}_i + \widehat{T_i}}{\lambda}\right)$

7 satellites en vue = 7 équations

$$-2\delta z_w \sin\varepsilon_i + \mathrm{b} = \left(\Delta L_i^{R-D} + N_i\right)\lambda - 2\hat{h}\sin\varepsilon_i - \mathrm{Aarm}_i - \widehat{T_i}$$

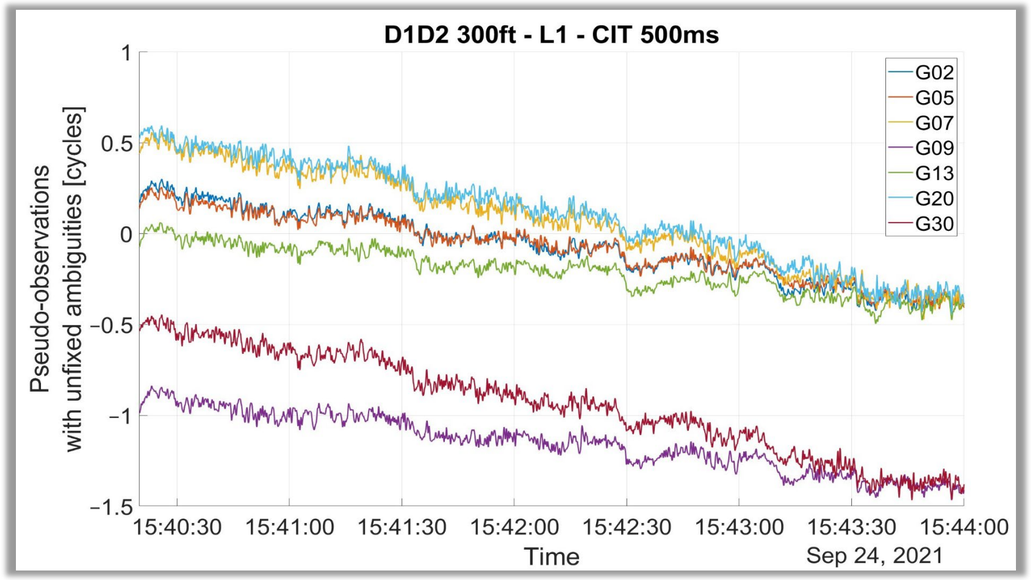
Pseudo-observations

Résolution par moindres carrés de δz_w et b

Hauteur estimée : $\hat{h} = z_{aircraft} - \widehat{z_w}$

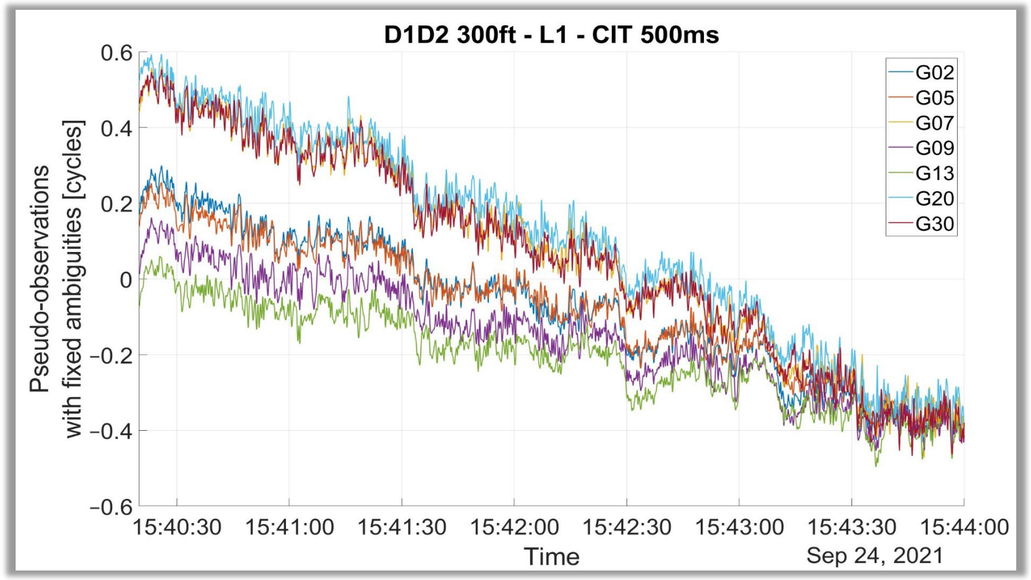
Hauteur de la surface d'eau : $z_w = \widehat{z_w} + \delta z_w$

Par exemple : $\widehat{z_w} = 59{,}98\ m$ (bouée GNSS)

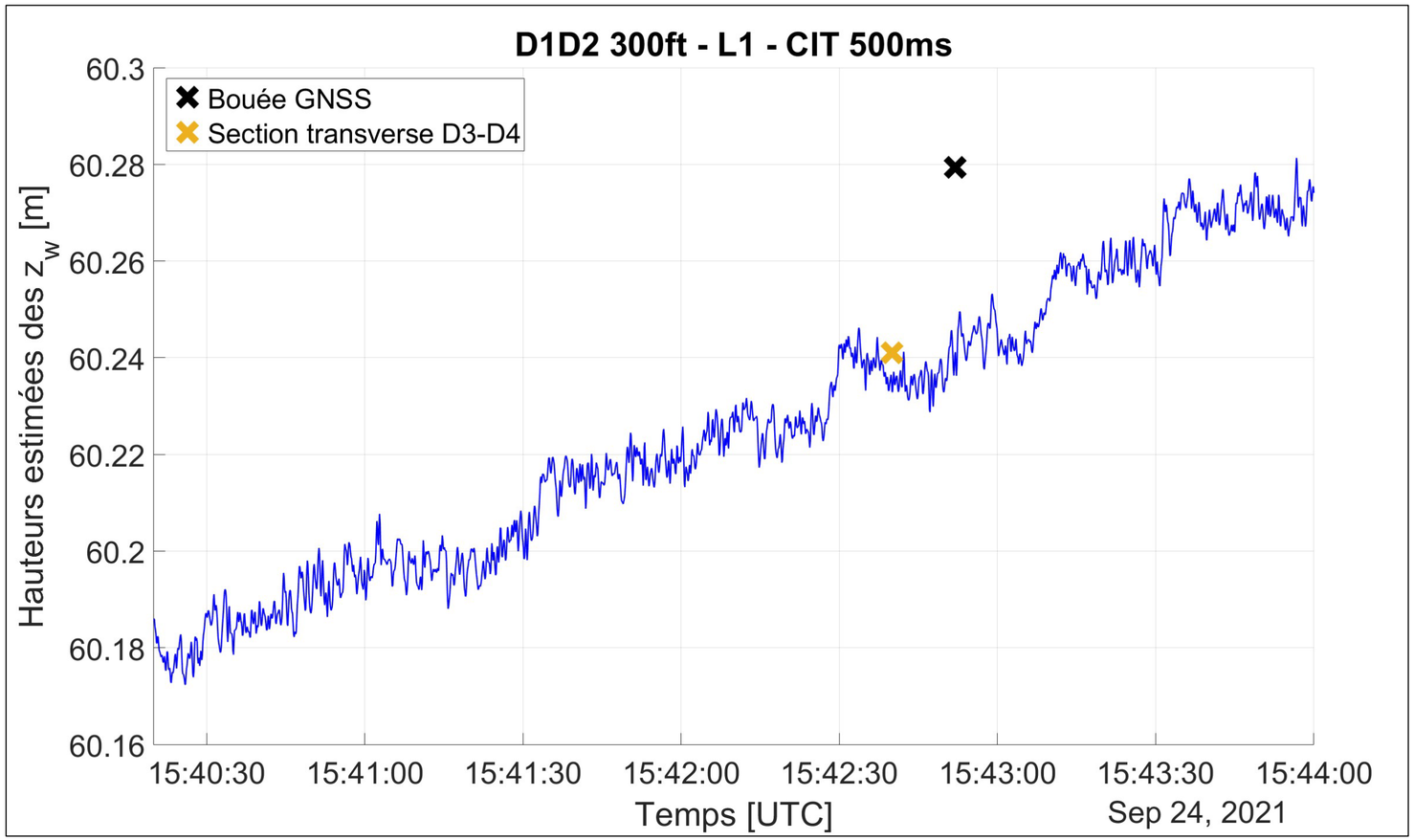


G30 et G09

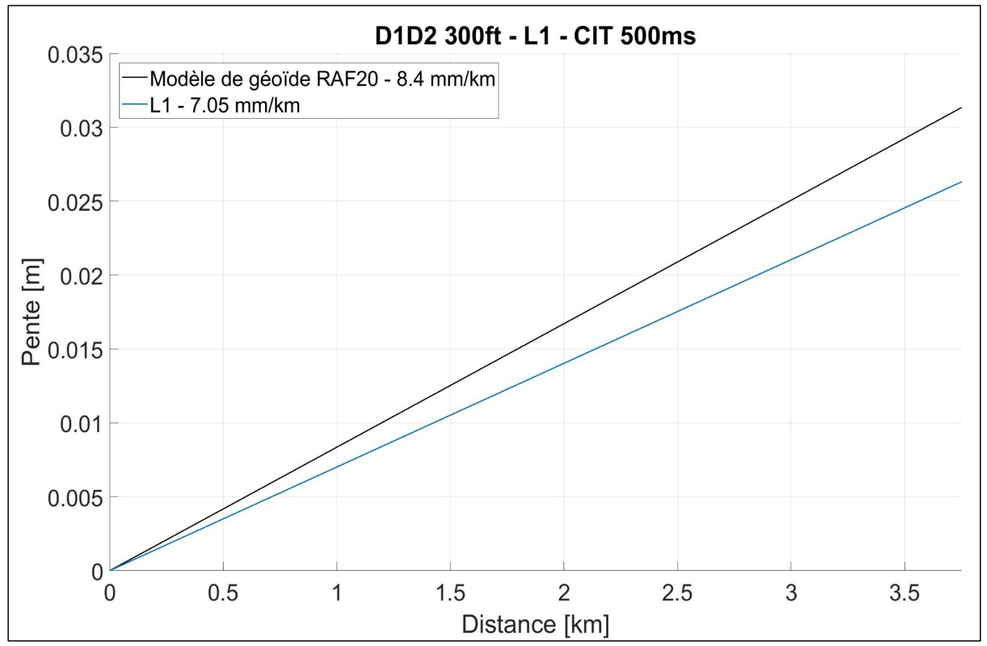
$N_i = \widehat{N_i} + 1$



Ambiguïté estimée : $\widehat{N_i} = floor\left(\frac{2\hat{h}\sin\varepsilon_i + \mathrm{Aarm}_i + \widehat{T_i}}{\lambda}\right)$



biais d'antenne estimé : $b = -0{,}082\ m$



Pente géoïde RAF20 = 8,4 mm/km

Pente des estimations sur L1 = 7,05 mm/km

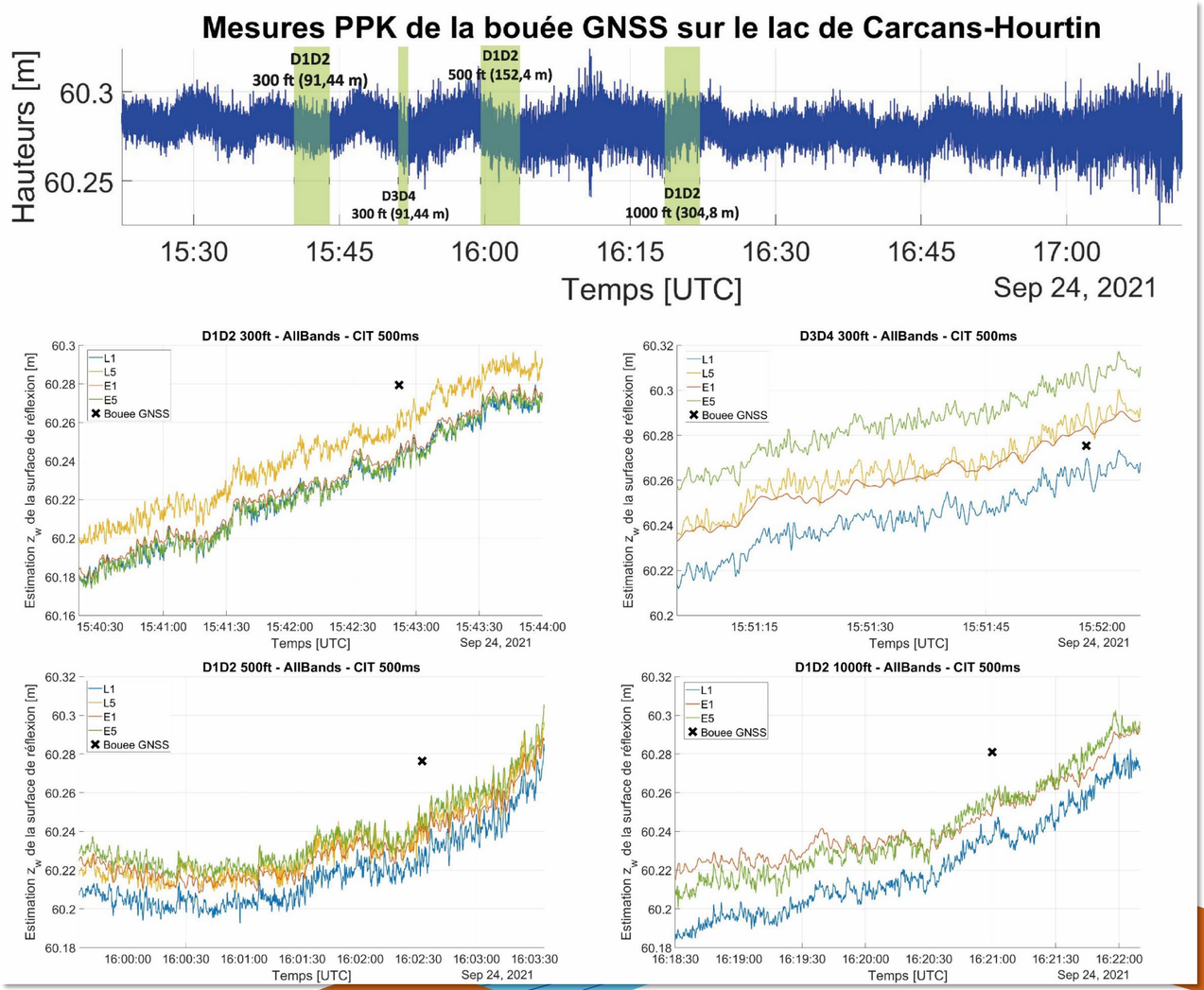
Ecart bouée : 3,7 cm
Ecart profil transverse : 1 cm
Ecart RAF20 : 1,35 mm/km (précision RAF20 : 3,3 mm/km)

- Matériel et traitements très efficaces pour générer des **mesures continues de phase**

- Résolution avec succès des ambiguïtés de phase
= détermination d'une **mesure altimétrique absolue**

- Résultats concordants pour les **4 bandes de fréquence L1, L5, E1 et E5**

- Ecarts à la bouée inférieure à 5 cm pour tous les profils, écarts quadratiques moyens inférieurs à 1 cm, écarts de pente inférieurs à 4 mm/km (par rapport à RAF20)



PERSPECTIVES

- Test de la méthode sur une plateforme fixe avec des mesures in-situ de précisions
- Modélisation troposphérique plus fine / estimation du retard troposphérique
- Résolution automatique des ambiguïtés entières
- Combinaison de constellations et de fréquences
- Traitement sur des surfaces plus rugueuses à des altitudes plus importantes
- Inter-comparaison de mesures aux données satellitaires

PERSPECTIVES

- Test de la méthode sur une plateforme fixe avec des mesures in-situ de précisions
- Modélisation troposphérique plus fine / estimation du retard troposphérique
- Résolution automatique des ambiguïtés entières
- Combinaison de constellations et de fréquences
- Traitement sur des surfaces plus rugueuses à des altitudes plus importantes
- Inter-comparaison de mesures aux données satellitaires

AVEZ-VOUS DES QUESTIONS ?

Nolan Varais. Réflectométrie GNSS par mesure de phase de porteuse : application à l'altimétrie précise à haute résolution spatiale. Planète et Univers [physics]. HESAM Université, 2024. Français. ⟨NNT : 2024HESAC005⟩. ⟨tel-04732931⟩

nolan.varais@geoazur.unice.fr