

Étalonnage de marégraphes

Étudier les changements du niveau marin à la côte nécessite des séries marégraphiques de haute qualité métrologique. Pour assurer la précision et l'exactitude des données issues des réseaux de marégraphes, des campagnes de calibrations in-situ sont régulièrement menées. Les protocoles d'étalonnage actuels reposent sur la comparaison de paires d'instruments, notamment par l'utilisation du diagramme de *Van de Casteele*. Or, si ces protocoles permettent bien d'estimer des biais systématiques, ils ne peuvent néanmoins pas estimer l'incertitude des instruments.

Dans cette étude, nous montrons qu'en *combinant* les mesures d'au moins 3 instruments, il est possible d'obtenir à la fois une meilleure estimation des biais mais aussi une estimation des incertitudes des instruments.

Erreurs fréquentes sur les hauteurs d'eau

Erreur = Biais (déterministe) + Bruit (aléatoire)

- **De-synchronisation** : un biais de l'horloge du marégraphe. Ce biais est corrigé en amont en estimant le biais d'horloge qui maximise la fonction d'inter-corrélation entre le signal mesuré et celui d'un marégraphe de référence.
- **Décalage constant** : un biais indépendant de la hauteur d'eau.
- **Erreur d'échelle** : un biais proportionnel à hauteur d'eau calculée $H_i(t)$.

En présence d'un décalage constant et/ou d'une erreur d'échelle, on peut utiliser le modèle linéaire de biais suivant :

$$B_i(t) = \alpha_i + \beta_i \cdot H_i(t) \quad \text{où } \alpha_i \text{ et } \beta_i \text{ sont des paramètres de biais à estimer}$$

- **Bruit** : erreur aléatoire, modélisée par une loi gaussienne :

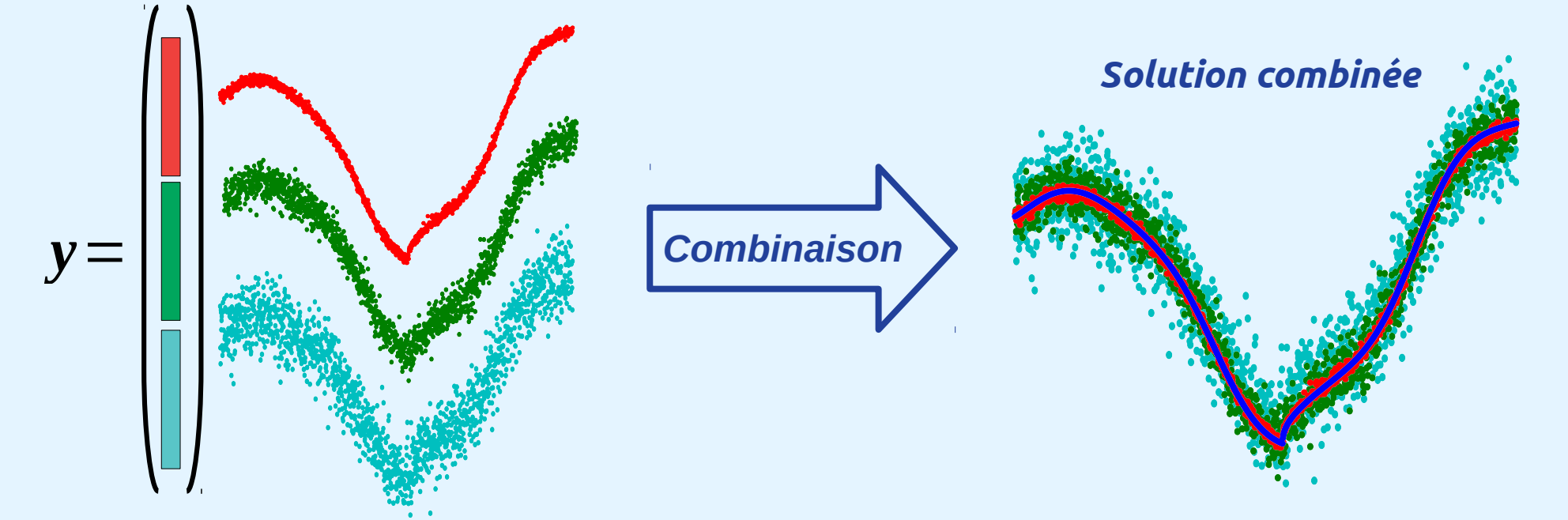
$$N(0, \sigma_i) \quad \text{où } \sigma_i \text{ est l'incertitude de l'instrument « i » qui est aussi à estimer}$$

Méthode proposée : la combinaison de données

Lorsque 3 instruments sont co-localisés, ils mesurent la même réalité physique. On choisit alors de combiner toutes les observations disponibles pour estimer un signal commun, c'est à dire *une solution combinée*.

1 – Pour cela, on commence par définir un vecteur d'observation y , constitué des mesures de tous les instruments.

2 – Ensuite, on lie les observations y à la solution combinée, en tenant compte des paramètres de biais et aux précisions des instruments grâce aux modèles fonctionnels et stochastiques suivants :



Modèle fonctionnel

$$E(y) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \\ A_3 & B_3 \end{bmatrix} x = Ax$$

+ biais instru 2
+ biais instru 3

+ α_2 et β_2
+ α_3 et β_3

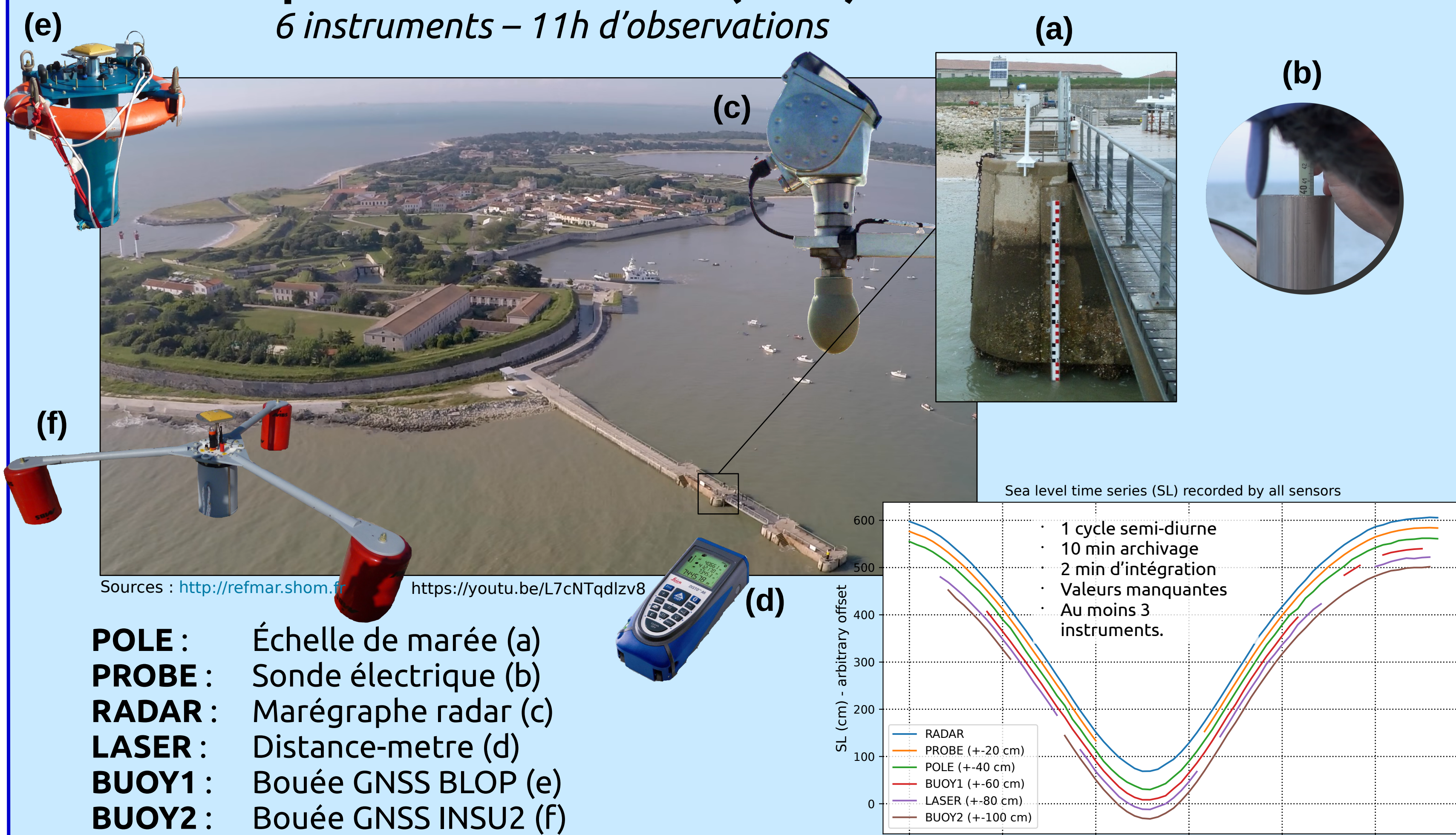
Modèle stochastique

$$\text{var}(y) = Q_y = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 Q_3 \end{bmatrix}$$

3 – Enfin, on estime la solution combinée, les paramètres de biais α_i et β_i et les incertitudes σ_i par l'utilisation conjointe de la méthode des moindres des carrés et de la méthode d'estimation des composantes de la variance par moindres carrés [1].

Expérience de île d'Aix (2016)

6 instruments – 11h d'observations



Un étalonnage plus complet

La méthode proposée a été appliquée à l'expérience d'inter-comparaison de l'île d'Aix (2016)

Pour assurer l'unicité de la solution, on a imposé un offset nul et une erreur d'échelle nulle pour la sonde PROBE. Ainsi, la solution combinée, les paramètres de biais α_i et β_i et les incertitudes σ_i de tous les instruments ont pu être estimés :

	α_i (cm)	β_i (cm/m)	σ_i (cm)
PROBE	.	.	0.31 +/- 0.10
MCN	-1.87 +/- 0.30	0.52 +/- 0.07	0.81 +/- 0.08
RADAR	0.13 +/- 0.39	-0.32 +/- 0.09	1.23 +/- 0.12
BUOY1	-4.30 +/- 0.41	0.00 +/- 0.11	1.25 +/- 0.14
LASER	-3.42 +/- 0.35	0.13 +/- 0.08	0.90 +/- 0.10
BUOY2	-3.52 +/- 0.30	0.17 +/- 0.07	0.74 +/- 0.09

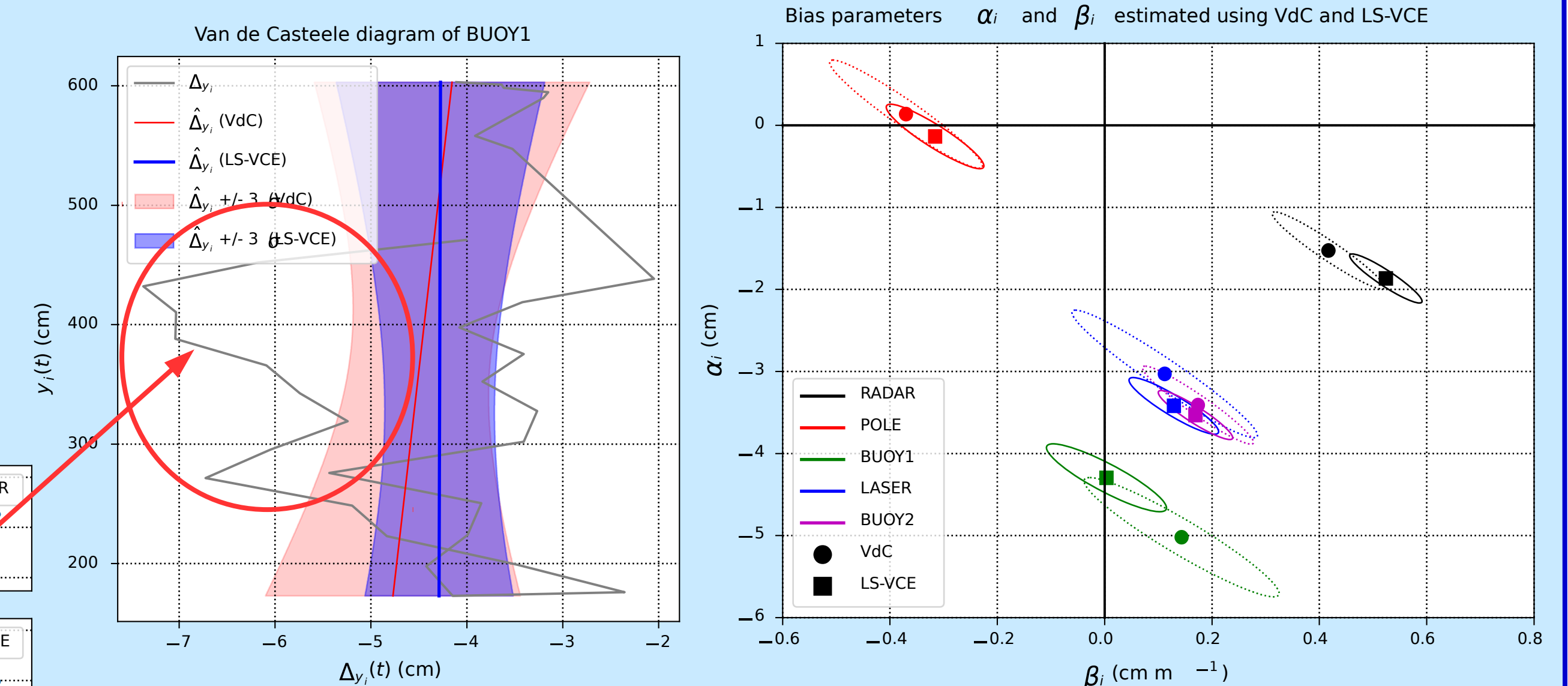
L'analyse des résidus suggère que la différence de précision entre les bouées GNSS BUOY1 et BUOY2 est surtout causée par une perturbation des mesures de BUOY1 entre 7:45 et 9:45.

Un étalonnage plus précis

Les résultats de la méthode proposée ont été comparés à ceux d'une méthode par comparaison.

Contrairement à la méthode proposée, la méthode par comparaison testée, qui consistait à ajuster le modèle de biais sur les écarts avec la sonde électrique (PROBE), n'a pas pu tirer profit de la redondance d'information apportée par tous les instruments déployés simultanément. En particulier, lorsque la sonde n'a pas d'observations, entre 10:00 et 12:10, les observations des autres instruments ne pouvaient pas être pris en compte, faute d'instrument de référence. Ce n'est pas le cas pour la méthode par combinaison qui a cherché à "confronter" toutes les observations disponibles, même lorsque la sonde ne mesurait plus. De plus, la méthode proposée a aussi permis de pondérer les mesures de tous les instruments en fonction de leurs précisions.

Ces 2 particularités ont entraîné une réduction de 30% à 55% des incertitudes sur les paramètres de biais. C'est particulièrement visible via les intervalles de confiance sur le diagramme de Van de Casteele (gauche) et dans l'espace des paramètres (droite) ci-dessus :



Conclusions & Perspectives

- La méthode par combinaison proposée se montre plus adaptée à l'exploitation des campagnes d'inter-comparaison que la méthode par comparaison.
- Il est dorénavant possible de mieux caractériser les performances des marégraphes par l'estimation conjointe des paramètres de biais et des incertitudes des instruments.
- La meilleure prise en compte des observations disponibles peut conduire à un étalonnage plus précis : ici la précision des résultats a été améliorée de 30% à 55%.
- La méthode proposée étant flexible, elle est potentiellement adaptable à d'autres types d'instruments et à d'autres types de biais et/ou de bruit.

Reference :

[1] Teunissen, P. J. G. and Amiri-Simkoei, A. R. (2008). Least-squares variance component estimation. Journal of Geodesy, 82(2):65–82.

Remerciements :

La thèse de Kevin Gobron est co-financée par la région Nouvelle Aquitaine et par la Direction Générale de l'Armement (DGA). L'expérience de l'île d'Aix (2016) a été menée par Laurent Testut (CNAP-LEGOS), Valérie Ballu (CNRS-LIENSs), Médéric Gravelle (CNRS-LIENSs), Alvaro Santamaria-Gomez (CNAP-OMP), Mikaël Guichard (ULR-LIENSs), Elizabeth Prouteau (CNRS-LIENSs), Pierre Chasseloup (SONEL-LIENSs), Cyril Poitevin (LIENSs), Fabien Durand (IRD-LEGOS), Ronan Le Gall (SHOM) et Pascal Le Dù (SHOM).

