

Evaluation des données de niveau marin obtenues par méthode GNSS-IR et distribuées par le service international PSMSL

Rapport de stage 2024

Résumé :

La réflectométrie interférométrique GNSS (GNSS-IR) est une technique émergente offrant un complément aux mesures marégraphiques, particulièrement là où les marégraphes ne peuvent être difficilement installés. Des études ont évalué la précision et la qualité des données GNSS-IR, or ces études ne sont pas concluantes en raison du nombre limité de stations notamment. Une analyse étendue faisant défaut, une étude a été réalisée pour comparer les données GNSS-IR avec des données indépendantes de marégraphes colocalisées afin d'avoir des éléments plus complets sur la précision de cette méthode.

Pour cela, une comparaison à des données validées de marégraphe a été réalisée à partir de statistiques de qualité (RMS des différences calées (différences moins la médiane des différences) et coefficient de corrélation R). Les résultats montrent que la majorité des stations présentent un RMS inférieur à 0,05 m et un coefficient de corrélation supérieur à 0,9, ce qui est conforme aux résultats d'études antérieures, bien que les coefficients de corrélation soient souvent jugés moyens, entre 0,8 et 0,9.

Il a également été constaté que la qualité des données est influencée par la taille des séries de données, le nombre de jours ou de mois communs entre marégraphes et GNSS-IR dans la comparaison, ou le nombre d'observations total par station.

Sur la base des résultats de RMS, seuls 3,88 à 5,81 % des stations ont montrés des résultats trop imprécis (supérieur à 0,1m). Les données GNSS-IR sont donc de très bonne qualité et leur utilisation pourrait être étendue à de nombreuses études.

Mots clés : niveau de la mer moyen, GNSS-IR, réflectométrie, marégraphe, étude générale.

Valentine Vanleene
Maitre de Stage : Guy WOPPELMAN
Tuteur : Médéric GRAVELLE

Master 1 Géoscience et géophysique du littoral

Table des matières

Introduction	3
Réflectométrie interférométrique GNSS	3
Matériels	4
Sources de données	4
Résultats d'études antérieures	5
Méthodes	5
Données GNSS-IR	6
Mise sous référentiel commun	6
Comparaison des séries GNSS-IR et marégraphiques	7
Statistiques	7
Résultats	8
Cas de certaines stations françaises	8
Stations du monde	8
Succès du calage	9
Discussion	10
Cas de certaines stations françaises	10
Stations du monde	11
Succès du calage	13
Conclusion	14
Remerciements	15
Références	15
Annexe.....	17

Introduction

Depuis l'invention du premier marégraphe par Henry R. Palmer en 1831 (Wolfgang, 1972) et en 1843 par R. Chazallon en France (SONEL, 2024), les outils de mesure du niveau de la mer se sont perfectionnés au fil du temps. Parmi eux sont comptés les marégraphes à pression, à ultrasons ou à radar (André et al., 2024), qui aujourd'hui permettent une précision de l'ordre du centimètre pour des mesures instantanées, et de seulement quelques millimètres pour les valeurs moyennes journalières, mensuelles ou annuelles (Wöppelmann, 1999). Cependant, malgré cette précision et les technologies élaborées, les marégraphes traditionnels sont limités par leur répartition spatiale, localisés seulement sur les côtes et les îles océaniques et majoritairement dans l'hémisphère Nord, en Europe et Amérique du Nord. Ceci pose donc des questions quant à la représentativité de l'ensemble des océans (Letetrel, 2010). De plus, la mesure du niveau de la mer par les marégraphes est liée à un référentiel relatif à la croûte terrestre, ce qui signifie que l'observation est affectée par les mouvements verticaux terrestres (Letetrel, 2010 ; Larson et al., 2013).

Une nouvelle technique émergente, la réflectométrie interférométrique GNSS-IR (Global Navigation Satellite Systems Interferometric Reflectometry), pourrait combler ces lacunes. Bien que cette méthode existe depuis 1993 (Larson et al., 1993), elle est encore peu utilisée. Des études ont été menées pour tester ses performances, comme celle de Larson et al. (2017) sur dix ans de données à la station de Friday Harbor. Cependant, ces études sont souvent de courte durée (Strandberg et al., 2016), portent sur un nombre limité de stations (une à cinq) (Larson et al., 2013 ; Larson et al., 2017 ; Santamaría-Gómez et Watson, 2017), ou les stations marégraphiques sont éloignées, ce qui rend la comparaison moins précise (Larson et al., 2013).

Or, les données GNSS-IR sont regroupées sur le site PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level : <https://psmsl.org/data/gnssir/>) et comparé aux données issues de marégraphes traditionnels, pour ces données GNSS-IR si n'y a pas de détails sur la qualité des résultats ni d'éléments quantitatifs dans la comparaison affichée

seulement visuellement pour chaque station GNSS-IR (PSMSL, Manuals and Guides). Ainsi, une étude globale visant à évaluer si cette technique est aussi précise que les marégraphes traditionnels est nécessaire. En effet, cette méthode pourrait offrir une précision comparable et se révéler utile dans certains domaines et sites d'études inadaptés aux techniques de marégraphes classiques notamment au niveau de sites ayant de forts mouvements verticaux (Merrifield et al., 2009).

Ainsi, en partant de l'hypothèse que les données des marégraphes sont plus précises que celles obtenues par GNSS-IR, cette étude vise à déterminer si cette dernière méthode offre une précision comparable et si les résultats obtenus sont cohérents avec les études antérieures limitées (durée, nombre stations). Travaillant avec l'équipe SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales), une attention particulière est portée sur les stations françaises afin d'étudier leur précision relative.

Réflectométrie interférométrique GNSS

La technique GNSS-IR repose sur un système de navigation par satellite. Des signaux de différentes fréquences (L1, L2, etc.) sont envoyés par des satellites appartenant à diverses constellations (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo) vers une antenne GNSS-IR. Cette antenne reçoit à la fois des signaux directs et des signaux réfléchis par une étendue d'eau. Lorsque ces deux signaux sont en opposition de phase, le signal reçu est atténué, tandis que dans le cas contraire, il est amplifié (cf. Figure 1).

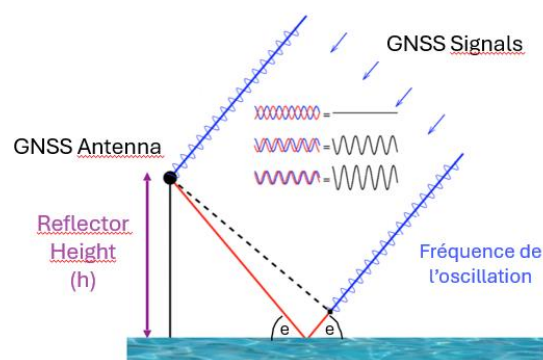


Figure 1 : Géométrie d'un signal GNSS à trajets multiples. L'angle d'élévation du satellite est défini comme « e » et change suivant la position du satellite par rapport à l'antenne (adapté de Larson et al., 2021).

La variation de la puissance du signal reçu est enregistrée lors du passage d'un satellite. Comme illustré sur la figure 2, le rapport signal sur bruit (soit la puissance du signal reçu) oscille fortement à de faibles angles d'élévation. En revanche, ces oscillations sont moins visibles à des angles élevés. Ainsi, là où le signal présente présentant de nombreuses oscillations est celle d'intérêt, car elle permet de déterminer la hauteur du niveau de la mer.

À noter que sur la figure, l'arc du passage du satellite n'est pas complet, seule une partie est représentée. Si l'arc était complet, les fréquences d'oscillation se déploieraient en formant un arc de cercle symétrique.

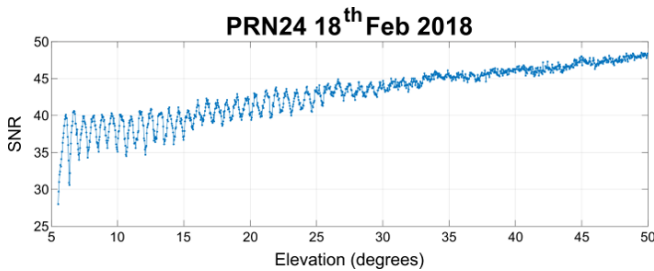


Figure 2 : Un exemple de la façon dont le rapport signal sur bruit fluctue lorsqu'un satellite passe au-dessus à marée basse (Simon Williams).

La marée changeant au passage du satellite, seules les 20 premières minutes ou les 20 dernières d'un arc, qui peut durer jusqu'à 4 heures, seront analysées pour mesurer le niveau de la mer. Pour ce faire, la tendance est d'abord éliminée, puis un calcul de spectre est réalisé, par exemple à l'aide de la méthode de Lomb-Scargle. Grâce à un périodogramme, la fréquence de l'oscillation est déterminée (PSMSL, 2024 ; Strandberg, 2020 ; Larson et al., 2021). La hauteur du réflecteur (h)(cf. Figure 1) étant directement liée à la fréquence des oscillations (f)(rapport signal sur bruit, cf. Figure 1 et 2), la mesure du niveau marin peut donc être réalisée via la relation suivante :

$$h = \frac{f\lambda}{2} + \frac{\dot{h} \cdot \tan(\varepsilon)}{\dot{\varepsilon}} \quad (\text{Strandberg, 2020})$$

Avec :

- λ , la longueur d'onde du signal GNSS-IR
- ε , l'angle d'élévation du satellite passant au-dessus de l'antenne GNSS-IR (cf. Figure 1)
- \dot{h} et $\dot{\varepsilon}$, hauteur et élévation corrigés (suppression de la marée notamment) respectivement.

Matériels

Afin de qualifier qualitativement et quantitativement la méthode GNSS-IR, des données GNSS-IR et marégraphiques ont été comparées. Ces données proviennent de différentes sources qui ont été rassemblées et fusionnées (cf. Méthodes). Une comparaison avec la littérature a également permis de construire des catégories de qualité des résultats obtenus.

Sources de données

Dans cette étude, diverses sources de données ont été utilisées.

Tout d'abord, les mesures instantanées du niveau marin à analyser, obtenues par la méthode GNSS-IR, ont été recueillies sur le portail GNSS-IR du Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL). Seules les stations GNSS-IR qualifiées de « bonnes » par le PSMSL sont traitées. Ces stations sont définies comme telles lorsque les données GNSS-IR sont accessibles et que la réflectométrie fonctionne correctement, bien que le critère de "bon fonctionnement" ne soit pas précisément défini.

En complément de ces données, les hauteurs marégraphiques de comparaison ont été récoltées à partir de différentes bases de données. Les moyennes mensuelles marégraphiques catégorisées RLR (Revised Local Reference) ont été récupérées sur le site du PSMSL. Les données journalières, quant à elles, ont été obtenues sur le site de l'Université d'Hawaii (University of Hawaii Sea Level Center : UHSLC). De plus, afin d'augmenter le nombre de stations disposant de données GNSS-IR et marégraphiques comparables, des moyennes mensuelles et journalières de 32 stations françaises ont été recueillies via le site de SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales).

Ayant cherché la cause des variations de qualité des résultats, de nombreuses métadonnées sur chaque station ont également été récoltées. Ces métadonnées ont été principalement obtenues via les sites du PSMSL, d'UHSLC et de SONEL. Dans le cas des stations de données GNSS-IR, chaque fichier possède, sur ses premières lignes, différentes informations (identifiant de la station

GNSS-IR, code, coordonnées, hauteur ellipsoïdale de la station GNSS-IR notamment). Les sites UHSLC et SONEL, quant à eux, fournissent entre autres les identifiants et coordonnées de leur station dans un tableau.

De plus, un fichier fourni par Médéric Gravelle permet de déterminer le type d'antenne et la présence ou non d'un radome en se basant sur un acronyme spécifique. Cet acronyme, également présent dans un autre tableau de Médéric Gravelle, est associé à l'identifiant GNSS-IR, ce qui permet de relier le type de matériel à l'identifiant de la station GNSS-IR.

Une autre information a été ajoutée dans le tableau de métadonnées : la hauteur ellipsoïdale de la station marégraphique sous le référentiel RLR, fournie dans un fichier par le service PSMSL. Cette information est utilisée afin de mettre les données marégraphiques sous un même référentiel que les données GNSS-IR.

Afin de lier les stations GNSS-IR aux stations marégraphiques, un tableau contenant l'identifiant RLR (données marégraphiques issues du site PSMSL sous RLR) et l'identifiant

UHSLC correspondant a été réalisé. Médéric Gravelle et Laurent Testut, chercheurs au LIENSs, ont fourni des tableaux permettant d'associer les identifiants RLR aux identifiants GNSS-IR, tout en comprenant diverses métadonnées (coordonnées des stations, code, nom de la station, ...), facilitant la mise en œuvre du tableau comparatif (identifiant GNSS-IR, RLR, UHSLC et SONEL).

Finalement, toutes ces métadonnées recueillies ont été rassemblées dans un même tableau, facilitant ainsi l'utilisation des informations obtenues. Ainsi, pour chaque station GNSS-IR, les identifiants RLR, UHSLC et RLR été donnés ainsi qu'un grand nombre de métadonnées, dans le cas où toutes ces informations été disponibles.

Résultats d'études antérieures

Les résultats de la littérature regroupées dans le tableau 1 ont été récoltées afin de réaliser les catégories de stations (très bonne, bonne et mauvaises) à la suite des résultats obtenus lors de cette étude.

Tableau 1 : Résultats d'écart quadratique moyen des différences (RMS) et coefficients de corrélation (R) provenant d'études antérieures

RMS (cm)	Type de données	R	Référence
De 6,2 à 43	Données horaires	De 0,89 à 0,99	Löfgren et al. (2014a)
De 3,2 à 9		De 0,86 à 0,97	Löfgren et al. (2014b)
12,6			Peng et al. (2019)
2,1	Moyennes journalières		Larson et al. (2017)
2,3			Larson et al. (2013)
6,5		0,84	S. Dahl-Jensen et al. (2021)
1,3	Moyennes mensuelles		Larson et al. (2017)

De plus, suivant les usages, la précision des données nécessaire n'est pas la même. En effet, pour des études sur l'hydrologie des littoraux par exemple, une précision de moins 5 cm est nécessaire. Pour des événements importants tels que les tsunamis ou les tempêtes, une précision sous les 10 cm est suffisante. Ainsi, au vu de toutes ces informations, les catégories suivantes ont été établies sur la base des résultats d'écart quadratique moyen : de 0 à 0.02m, correspond aux très bonnes stations ; de 0.02 à 0.05m, les bonnes ; de 0.05 à 0.1m les moyennes et de 0.1 à 0.2m les mauvaises stations.

Pour ce qui est des coefficients de corrélations, les catégories ont été établies sur la base des résultats des études antérieurs mais également de façon subjective au vu des résultats obtenus. Les catégories obtenues sont donc : de 1 à 0,98 sont représentées les très bonnes stations ; de 0.98 à 0.9 les bonnes ; de 0,9 à 0,8 les moyennes et enfin de 0,8 au minimum obtenu, les mauvaises stations.

Méthodes

Afin de réaliser cette étude, les données récoltées ont tout d'abord subies un pré-traitement. Ce pré-

traitement consiste à s'assurer que les données sont homogènes et qu'elles soient sous un référentiel commun. Ensuite, de nombreux tests statistiques ont été réalisées sur ces données afin de permettre de qualifier les données GNSS-IR par comparaison aux données marégraphiques.

Si souhaité, pour plus de détails sur la mise en œuvre de la méthode, veuillez consulter le script fourni.

Données GNSS-IR

Pour calculer les moyennes journalières des données GNSS-IR, la méthode proposée par le site PSMSL a été suivie.

Tout d'abord, afin de prendre en compte le mouvement vertical de l'eau lorsque que le satellite passe au-dessus du plan d'eau, les hauteurs ajustées (correction d'un biais lié aux mouvements verticaux de la mer lors du passage du satellite) fournies pour chaque station ont été utilisées.

Ensuite, les moyennes journalières ont été calculées à partir des valeurs résiduelles (hauteurs ajustées sans marée). Cette étape permet de s'affranchir du biais provenant de la distribution des observations sur le cycle des marées. Les résultats obtenus étant proche de 0, la hauteur de l'ellipsoïde par rapport à la station GNSS-IR sera ajouté et la hauteur du récepteur retiré à la fin de tous les calculs.

Après obtention des résidus, les légères différences dans le centre de phase de l'antenne (centre définit auquel les signaux sont reçus par l'antenne) pour différents canaux (différents signaux de différentes constellations) sont prises en compte. Ainsi, les résultats de chaque signal de chaque constellation sont rapportés à un signal de référence, le signal L2 de la constellation GPS, signal présent pour toutes les stations traitées.

Enfin, après tous ces calculs, les calculs de moyennes sont réalisés, la hauteur du récepteur est ajoutée et celle du récepteur est soustraite afin d'avoir une hauteur du niveau de la mer vis-à-vis d'une référence dite GNSS-IR.

Pour plus de précision sur cette méthode, consultez la page du PSMSL (PSMSL, Calculating daily means from GNSS-IR data).

Les moyennes mensuelles des données GNSS-IR ont été calculées à partir des moyennes journalières obtenues. Cependant, pour les données marégraphiques, le PSMSL exige un minimum de 15 jours de données par mois pour calculer les moyennes mensuelles. Cette condition a donc été appliquée lors du calcul des moyennes mensuelles GNSS-IR.

Mise sous référentiel commun

Après homogénéisation (changement d'unité), les moyennes journalières et mensuelles des données marégraphiques (de SONEL, UHSLC ou RLR du PSMSL) ont été mise sous la même référence que les données GNSS-IR, la référence GRS80. Pour ce faire, une hauteur ellipsoïdale du marégraphe de catégorie RLR a été ajoutée lorsqu'elle été disponible (cf. Figure 3). Sur la page "Calculating daily means from GNSS-IR data" du PSMSL, expliquant la méthode employée, un « datum » a également été soustrait. Ce datum est un écart permettant de mettre les données marégraphiques sous référence RLR. Or, n'ayant pas un fichier contenant cette information pour chaque station, cette valeur n'a pas été prise en compte. Ainsi, la mise en référence n'est pas totalement réalisée pour les données marégraphiques de SONEL et UHSLC car il aurait fallu ajouter cette valeur de « datum » pour que les données GNSS-IR et marégraphiques soient sous référentiel commun.

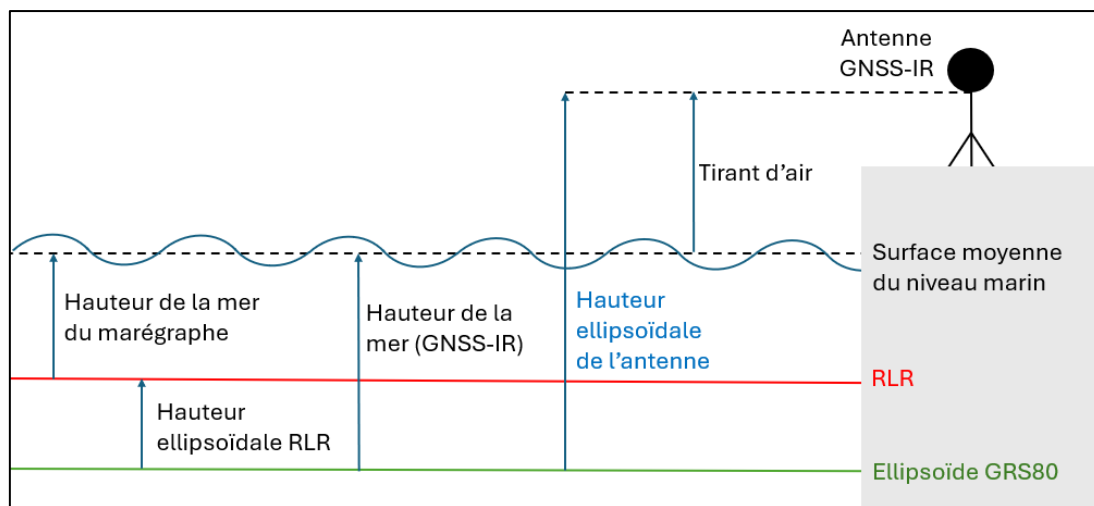


Figure 3 : Schéma explicatif de la mise sous référentiel commun des données du niveau de la mer

Cependant, comme mentionné précédemment, l'information de hauteur ellipsoïdale du marégraphe RLR n'est pas disponible pour toutes les stations. Ainsi, un calage a été calculé. Il s'agit de la médiane des différences entre les données GNSS-IR et les données marégraphiques. La médiane a été choisie plutôt que la moyenne afin de minimiser l'impact des outliers potentiellement présents dans la série de données. Une autre méthode aurait été de calculer chacune des médianes des séries puis de les soustraire. Le « datum » n'étant pas pris en compte, ce calage a été appliqué pour chacune des stations traitées.

Comparaison des séries GNSS-IR et marégraphiques

Finalement, après avoir homogénéiser et mis toutes les données sous un référentiel commun, seules les périodes où les données GNSS-IR et marégraphiques étaient disponibles simultanément ont été conservées. De plus, pour des résultats statistiquement représentatifs, nous avons imposé deux conditions. Pour les moyennes mensuelles, 30 mois de données minimum sont requis. Dans le cas des moyennes journalières, au moins 100 jours de données sont demandés, ce qui correspond environ à 3 mois. Ce dernier critère a été instauré afin que les résultats soient plus représentatifs de l'environnement. En effet, si des tempêtes sont présentes sur la période choisie, les conditions normales du milieu n'auraient pas pu être analysées. Ainsi, il n'aurait pas été possible de savoir si l'antenne GNSS-IR du site était bien

capable de mesurer correctement le niveau de la mer par rapport au marégraphe.

Statistiques

Afin de qualifier la qualité des données GNSS-IR, plusieurs calculs statistiques ont été réalisés : écart-types des données GNSS-IR et marégraphiques, ainsi que leur ratio (GNSS-IR/marégraphe), écarts quadratiques moyens des différences calées (RMSD), et coefficients de corrélation linéaire (R). Ces différentes statistiques et plus particulièrement les RMSD et R ont été estimés pour comparer la méthode GNSS-IR au marégraphe.

Ajouté aux calculs statistiques, des histogrammes ont été réalisés pour visualiser la répartition des données et identifier les stations avec des résultats remarquables dont les codes des stations sont affichés de manière subjective. Des nuages de points ont été également construits afin de visualiser les différences ajustées entre les deux méthodes au cours du temps, ainsi que la corrélation entre ces méthodes sur un second graphique.

De plus, pour évaluer les origines influençant la qualité des données, plusieurs facteurs ont été considérés et représentés graphiquement via des couleurs. Parmi eux, le nombre d'observations par jour ou par mois des données traitées, le nombre de jours ou de mois analysés, la distance de l'antenne GNSS-IR par rapport au marégraphe et le nombre maximal de constellations ou de fréquence utilisé pour obtenir les mesures ont été pris en compte.

Finalement, des cartes du globe et de la France ont été réalisées afin de représenter les résultats en fonction de la localisation des stations. Ces cartes permettent donc de savoir si la localisation joue un rôle sur la qualité des résultats.

Résultats

Dans cette section, les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableau pour une partie des stations françaises, et sous forme de graphique et carte pour l'ensemble des stations étudiées du fait du nombre important de stations.

Cas de certaines stations françaises

Pour chaque station, des stations françaises de la métropole, équipées d'un marégraphe et disposant de données RLR, UHSLC et SONEL ont été sélectionnées. Ainsi, les résultats des 8 stations sélectionnées sont présentées dans le tableau 2.

En regardant le tableau 2, il peut être remarqué que les valeurs d'écart quadratique moyen des différences calées (RMSD) sont plus faibles pour les données mensuelles que pour les données journalières. Cette observation est conforme à la littérature : plus l'échelle temporelle est grande, meilleurs sont les résultats.

Tableau 2 : Ecart quadratique moyen des différences calées (RMSD) et des coefficients de corrélation (R) des moyennes journalières et mensuelles au niveau de diverses stations françaises.

Station	RMSD (m)		R	
	Journalier	Mensuel	Journalier	Mensuel
Brest	0,035	0,015	0,965	0,980
Dzaoudzi	0,021	0,12	0,973	0,989
Fort-de-France	0,050	0,33	0,783	0,862
Marseille	0,050	0,023	0,885	0,952
Nouméa-Numbo	0,015	0,009	0,975	0,988
Roscoff	0,073	0,27	0,840	0,916
Saint Paul	0,143	0,134	0,535	0,419
Sète	0,017	0,010	0,991	0,991

Stations du monde

Sur un total de 371 stations GNSS-IR (doublons compris sinon 293 stations), 86 stations disposent de données journalières et 103 de données mensuelles, représentant respectivement 23% et 28% des stations. Bien que cela semble peu, parmi ces 371 stations GNSS-IR, 120 possèdent des données UHSLC dont seulement 20 avec des données SONEL sur les 32 ayant l'acronyme de ce service (doublons compris sinon 24 stations), ainsi 65% des stations avec des données UHSLC et/ou SONEL sont traitées.

Concernant les données mensuelles, parmi les 371 stations GNSS-IR, 232 ont des données RLR, dont 216 stations avec des données accessibles (les autres ayant des liens de station non fonctionnels). Avec l'ajout des 2 stations SONEL qui n'ont pas d'identifiant RLR, cela

porte à 47% le nombre de stations avec des données mensuelles traitées. Ces pourcentages semblent faibles, or plusieurs conditions présentées précédemment ont été ajoutées. Ainsi, le nombre restreint de stations traitées par rapport au total est dû à ces critères stricts (il serait utile de faire tourner le script sans ces critères pour évaluer l'impact).

Sur les figures, un critère supplémentaire est ajouté pour expliquer la variation de qualité des résultats, notamment comme ci-dessous le nombre d'observations par mois. Ici, uniquement les résultats des moyennes mensuelles sont présentés. Ce choix a été pris selon le nombre de données, puisqu'un nombre plus important de stations permet une meilleure représentativité des résultats. Cependant, les résultats des données journalières sont présentés en annexe.

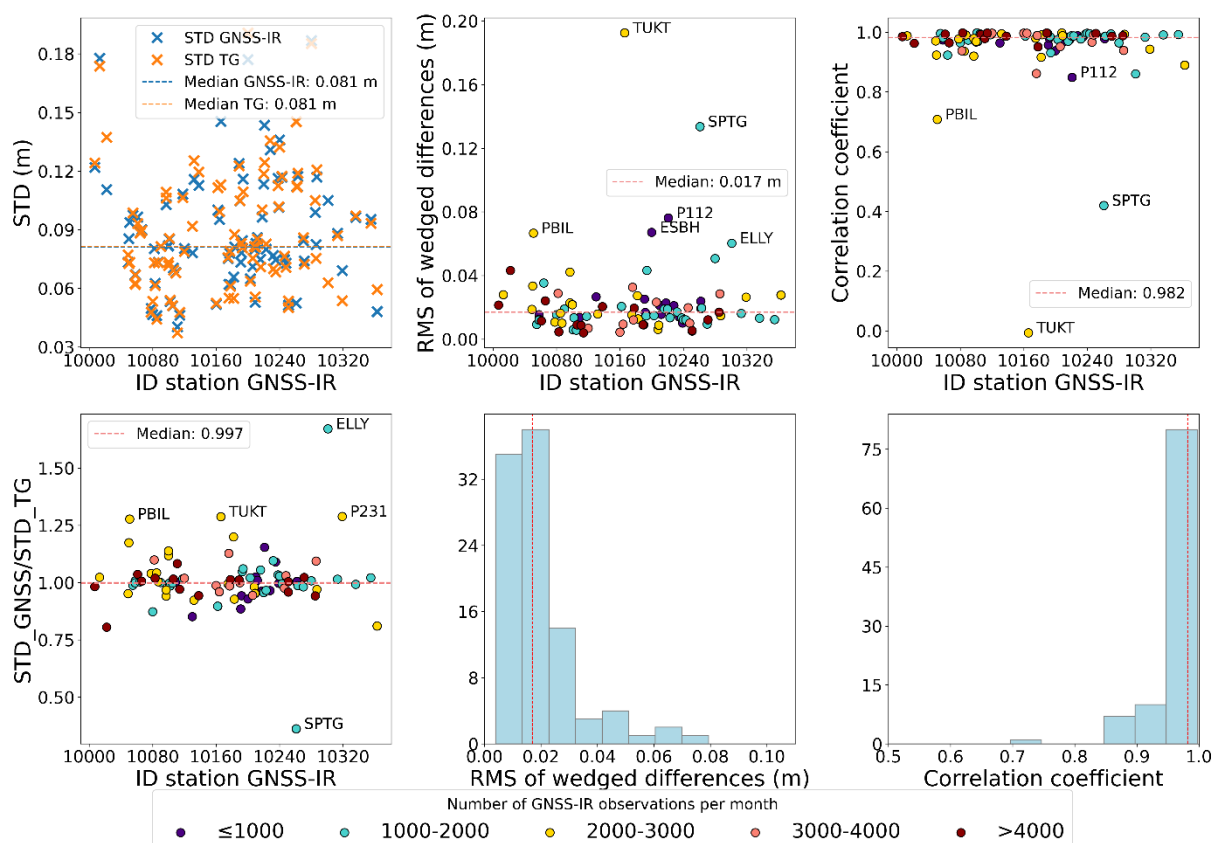


Figure 4 : GNSS-IR vs marégraphes (série de données mensuelles, 103 stations). Les points de couleurs font références au nombre d'observation par mois qui ont permis de mesurer le niveau de la mer par technique GNSS-IR.

De plus, sur la figure 5, les valeurs d'écart quadratique moyen des données journalières des stations sont localisées géographiquement. Les résultats de coefficients de corrélation correspondants sont présentés en annexe.

Les données journalières sont privilégiées cette fois en raison de leur plus grande variabilité des résultats et du plus grand nombre de stations françaises métropolitaines.

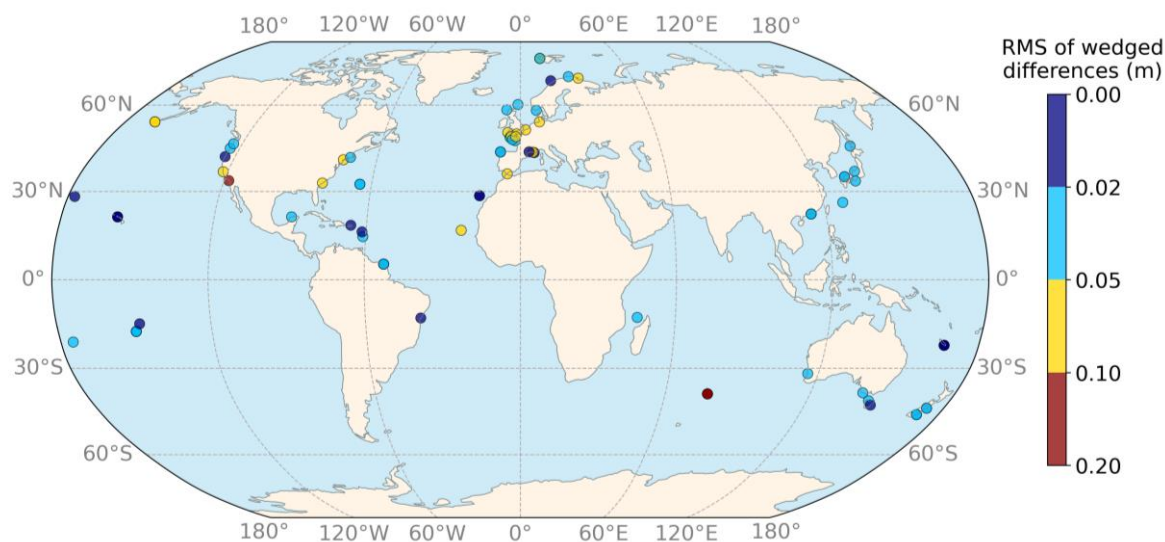


Figure 5 : GNSS-IR vs marégraphe. RMS des différences sans tendance et saisonnalité (série journalière, 86 stations)

Sur cette figure 5, il est possible de voir que certaines régions du monde possèdent de

meilleurs résultats, notamment au Japon et en Océanie où les RMSD sont supérieurs à 5cm. En

Europe, où il y a un plus grand nombre de stations, les résultats sont plus variés, pouvant être catégorisé comme moyen (cf. Matériels). Ainsi, une répartition suivant la localisation peut être observée.

Succès du calage

Pour le calage, il est important de maintenir un calage précis, généralement compris entre -1 et 1 cm, idéalement sous le centimètre. Or, lorsque les informations ellipsoïdales ne sont pas disponibles, ce critère n'est pas respecté de plusieurs dizaines de mètres dans la plupart des cas. En prenant uniquement les stations disposant de ces informations, l'écart observé dans les données journalières est tout de même important alors qu'il ne devrait pas l'être (cf. Figure 6). Pour les données mensuelles (cf. Figure 7), l'absence d'informations ellipsoïdales a également un impact significatif sur les résultats. En ne considérant que les stations pour lesquelles ces informations sont disponibles, de meilleurs calages sont obtenus pour la plupart des stations par rapport aux données journalières. Cependant, les calages restent supérieurs au centimètre (cf. Figures 7 et 8).

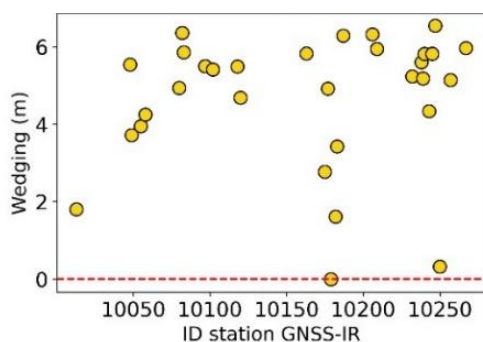


Figure 6 : Calage GNSS-IR vs marégraphe (série journalière)

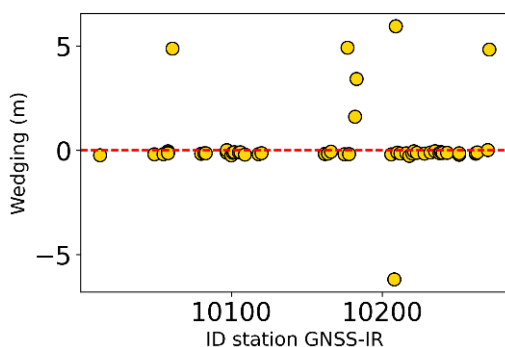


Figure 7 : Calage GNSS-IR vs marégraphe (série mensuelle).

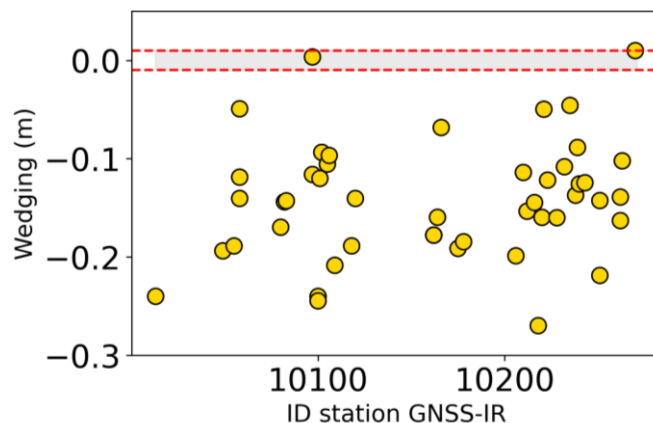


Figure 8 : Calage GNSS-IR vs marégraphe. Zoom sur les stations ayant un calage proche de 0,3m (série mensuelle).

Discussion

Cas de certaines stations françaises

A Marseille, il a été observé que les différences calées sont cycliques. Or, en étudiant plus précisément la station de Marseille, il peut être constaté que le marégraphe est dans un puit au fond d'une galerie, contenant une grille, située dans une anse. Ces installations ont eu pour effet de diminuer fortement l'impact de la houle et a fortiori la mesure du niveau de la mer mesuré. Ainsi, le marégraphe mesure le niveau d'une surface calme, contrairement à l'antenne qui mesure les variations du niveau marin avec les effets de l'environnement ambiant. Ajouté à cela, le marégraphe est localisé et mesure le niveau de la mer après la zone de déferlement des vagues. L'appareil mesure donc également le setup contrairement à l'antenne GNSS-IR qui mesure une plus large portion de la mer plus au large. De plus, la littérature indique que même de petites différences environnementales peuvent influencer les résultats (études sur l'Alaska). Ainsi, la différence de milieu des appareils pourrait expliquer cette cyclicité des différences.

Afin vérifier la périodicité observée, une solution serait d'appliquer un calcul de spectre de type Lomb-Scargle, par exemple. En réalisant cela, il serait possible d'obtenir via la fréquence, la périodicité de la cyclicité si elle est vraiment significative.

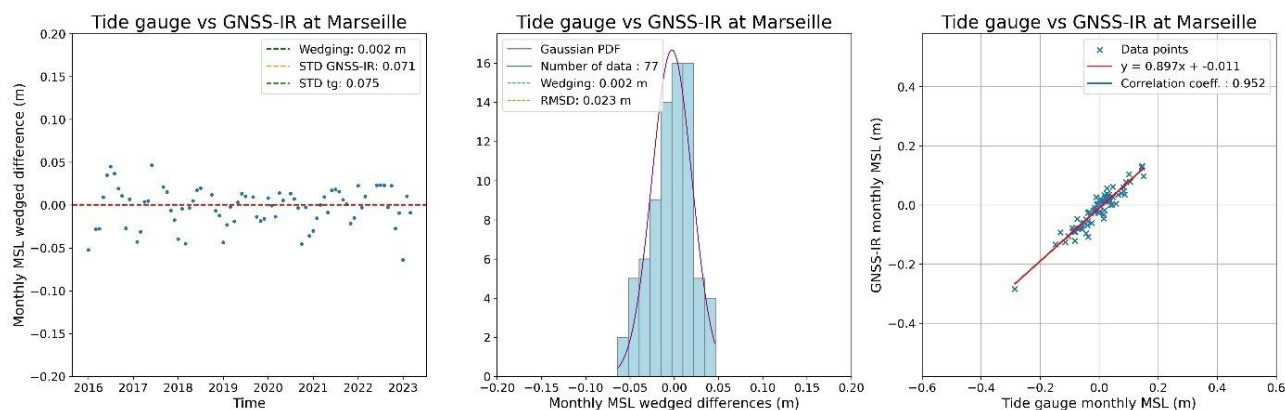


Figure 9 : GNSS-IR vs marégraphe à Marseille (série mensuelle sans tendance et saisonnalité)

En examinant les résultats des stations de France métropolitaine, il a été constaté que les résultats mensuels sont très bons, tant pour les RMSD (cf. Figure 10) que pour les coefficients de corrélation linéaire. De plus, aucune tendance liée à la localisation n'a été observée. Cependant, ces résultats ne sont pas concluants en raison du nombre limité de stations.



Figure 10 : GNSS-IR vs marégraphes en France métropolitaine. RMS des différences calées de la série mensuelle (86 stations).

Pour les moyennes journalières, une répartition spatiale a été observée (cf. Figure 11). En Méditerranée, les résultats sont meilleurs. A noter qu'à Marseille la couleur jaune indique un coefficient de corrélation d'environ 0,05m, valeur qui peut être considérée comme bonne (entre 0,02 et 0,05 m). L'océan Atlantique montre des résultats légèrement inférieurs, avec des stations en turquoise classées comme bonnes. La Manche et la mer du Nord affichent les résultats les moins performants, notamment à Saint-Malo, où le coefficient de corrélation est de 0,75.

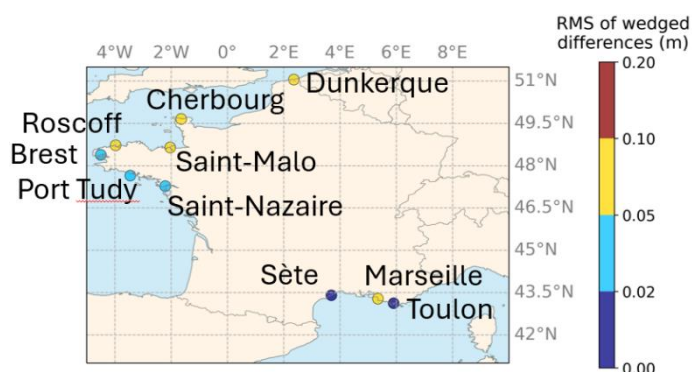


Figure 11 : GNSS-IR vs marégraphes en France métropolitaine. RMS des différences calées de la série journalière (86 stations).

Il a également été observé que le nombre d'observations par jour pourrait exercer une influence plus significative sur la variation de la qualité des résultats. Ainsi, il serait intéressant de déterminer si la localisation ou le nombre d'observations par jour a un impact plus important sur la variation de qualité des résultats en France. Il est également possible que ces deux facteurs agissent simultanément sur cette fluctuation. De plus, la localisation pourrait ne pas être le seul facteur en jeu, des éléments comme la salinité, la densité, la rugosité de l'étendue d'eau, l'opérateur et a fortiori le réglage du réflecteur, ou l'amplitude des marées pourraient également jouer un rôle. Cette question mérite d'être étudiée de manière plus approfondie, tant en France qu'à l'échelle mondiale.

Stations du monde

En analysant les résultats obtenus, il a été constaté qu'environ trois quarts des stations présentent de bons résultats, c'est-à-dire un RMSD inférieur à 0,05 m et un coefficient de corrélation supérieur à 0,9. Certaines régions du

monde, comme le Japon ou l'Océanie, affichent des performances particulièrement bonnes, avec des stations classées comme bonnes ou très bonnes. Comme discuté dans le cas de la France, la localisation jouerait un rôle indirect et le marnage, par exemple, pourrait être plus significatif. Or, dans l'océan Pacifique, au niveau de l'Océanie ou du Japon, le marnage est presque nul voire nul. Pour vérifier l'hypothèse du marnage comme facteur clé, il est possible d'ajouter les points amphidromiques. Ceci pourrait permettre de savoir si, au niveau des ces points, les résultats sont meilleurs.

De plus, au vu des résultats obtenus, 18 à 59 % des données des stations GNSS-IR sont utilisables pour de nombreuses applications, 31 à 52% peuvent être repris lors d'étude pour un nombre plus restreint d'études comme celles d'hydrologie et 5 à 20% des stations présentent des résultats applicables lors de recherches sur des événements forts tels que les tempêtes ou cyclones (le détail des pourcentages obtenus est présent en annexe). Ainsi, seul 5 à 16% des stations ont été catégorisées comme mauvaises. Ceci montre la grande qualité des données GNSS-IR qui est comparable aux marégraphes et, pour 18 à 59% des données, de précision proche.

En comparant avec les études antérieures, les stations mentionnées dans la littérature affichent un RMSD jugé bon ou très bon comme 74 % à 90 % des stations étudiées jugées très bonnes ou bonnes. Cependant, les données instantanées montrent des valeurs considérées comme moins bonnes, ce qui est attendu, car les moyennes journalières et mensuelles tendent à améliorer les résultats. Par conséquent, nos résultats ne semblent pas aberrants et confirment en partie la qualité des données obtenues.

Malgré la très bonne qualité des résultats, 5 à 16% des stations, comme celle de Tuktoyaktuk (TUKT), ont été catégorisée comme mauvaise. En examinant le graphique de cette station sur le site du PSMSL, il a été remarqué que les différences calées augmentent lorsque le nombre d'observations diminue, notamment pendant la période hivernale. Étant donné que cette station est située dans une zone reculée au nord de l'Amérique du Nord, ces résultats pourraient être

affectés par des problèmes liés à la température ou à la glace. En effet, la mauvaise qualité des résultats pourrait ne pas être due à la qualité de l'instrumentation, mais plutôt à la présence de glace. Si de la glace est présente à la surface de l'eau, l'antenne GNSS-IR mesure la hauteur de la couche de glace plutôt que le niveau de la mer. Par conséquent, il n'est pas surprenant que le nombre d'observations par mois chute fortement, ce qui conduit à des résultats de mauvaise qualité.

Dans le cas de la station de Saint-Paul, la raison de la mauvaise qualité des résultats est tout autre. Tout d'abord, en regardant le ratio des écarts-types de la Figure 4 ou de la Figure 11, il est possible d'observer un ratio inférieur à 0,4 environ. De plus, il a été constaté qu'entre 2018 et 2020, la différence entre les données GNSS-IR et marégraphiques étaient parfois de plus de 0,4m. Ces observations suggèrent que la qualité des données de l'antenne GNSS-IR est grandement moins bonne que celle du marégraphe de façon irrégulière dans le temps. En regardant l'empreinte au sol (la partie de l'étendue d'eau qui va être analysée) de cette station sur le site PSMSL, il est remarquable qu'elle soit très faible et bloquée par un côté du cratère affaissé similaire à une flèche littorale. Ainsi, la mesure du niveau de la mer est réalisée sur une faible portion de l'océan dont une partie à l'intérieur et la seconde à l'extérieur du cratère. Les données obtenues sont donc imprécises et peuvent expliquer la mauvaise qualité des résultats obtenus.

Lors de cette étude, il a été remarqué que la localisation et le choix du positionnement de la station, qui influencent l'empreinte au sol de l'antenne GNSS, semblent être deux paramètres clés affectant la variation de la qualité des données. Cependant, en analysant les graphiques montrant les résultats en fonction des identifiants des stations, un autre paramètre pourrait s'avérer très significatif pour expliquer cette variation. En effet, sur les graphiques présentés (Figures 4 et 10), un critère variant en fonction de la couleur des points a été ajouté. Dans le cas des figures présentées, il s'agit du nombre total d'observations (Figure 10) ou du nombre d'observations par mois (Figure 4) pour les séries

mensuelles (les résultats des séries journalières sont disponibles en annexe).

Grâce à ces figures, l'influence du nombre d'observations, qu'elles soient totales, journalières ou mensuelles, est clairement

visible. Seules les stations avec un nombre d'observations plus faible affichent les résultats les moins bons. Ainsi, il est certain que ce paramètre joue un rôle important dans la qualité des résultats obtenus.

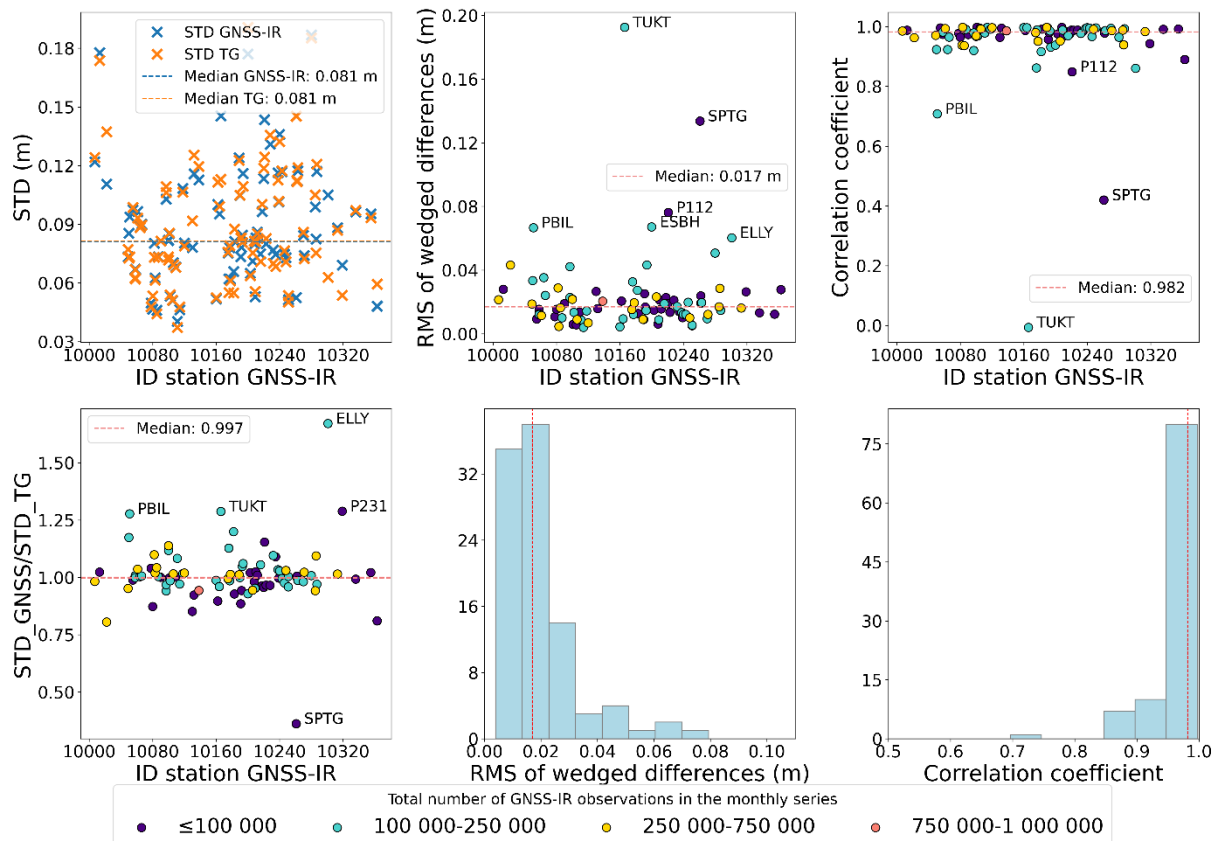


Figure 12 : GNSS-IR vs marégraphes (série de données mensuelles, 103 stations). Les points de couleurs font références au nombre de mois dans la série comparant les moyennes mensuelles du niveau marin GNSS-IR et marégraphiques.

En examinant le cas de la station TUKT précédemment étudiée, il a été observé que le nombre d'observations par mois est assez respectable, entre 2000 et 3000 observations. Il est donc probable que ce paramètre ne soit pas le seul à influencer la qualité des résultats ; la localisation pourrait également jouer un rôle important. Pour la station de Saint Paul, l'empreinte au sol pourrait également être un facteur déterminant. Étant donné que le nombre d'observations (total, mensuel ou journalier) est lié à cette empreinte au sol, ces paramètres peuvent être interconnectés.

Ainsi, d'après les résultats obtenus, le nombre d'observations, le choix du positionnement de

l'antenne (et a fortiori l'empreinte au sol), et la localisation influencent la variabilité des résultats. Cependant, il est à noter que la localisation n'est peut-être pas le critère direct ; des facteurs tels que la température ou l'amplitude des marées pourraient en réalité jouer un rôle principal.

Succès du calage

Pour les stations où l'information sur la hauteur ellipsoïdale du marégraphe était disponible, il a été constaté que les décalages étaient supérieurs au centimètre, alors qu'ils ne devraient pas l'être (cf. Résultats). Pour les moyennes journalières, la figure 6 montre que les écarts observés pourraient

correspondre à un datum manquant. En effet, la hauteur ellipsoïdale ajoutée aux données marégraphiques est basée sur le référentiel RLR. Ainsi, les données marégraphiques de SONEL et de l'UHSLC, qui ne sont pas de catégorie RLR, présentent un biais correspondant au datum.

Dans le cadre de cette étude, le datum a été soustrait pour les stations disposant de données journalières afin de vérifier cette hypothèse. La figure 13, représentant les résultats obtenus, montre que l'écart observé sur la figure 6 est majoritairement dû au datum. Toutefois, pour certaines stations, l'écart reste important, atteignant plusieurs mètres (cf. Figure 14). Pour les autres stations, les écarts sont également présents, mais beaucoup moins importants.

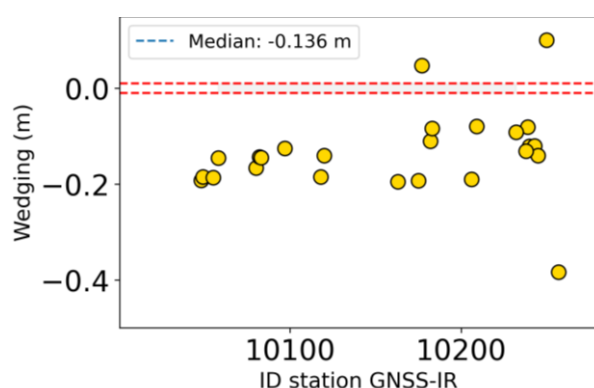


Figure 13 : GNSS-IR vs Marégraphe. Calage de la série journalière sans datum (zoom sur les stations avec un calage centimétrique).

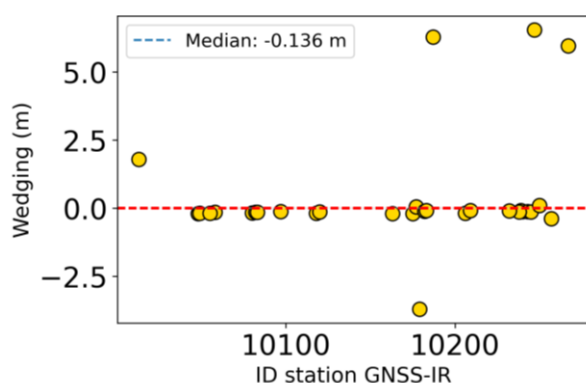


Figure 14 : GNSS-IR vs Marégraphe. Calage de la série journalière sans datum.

Pour les moyennes mensuelles, un léger écart similaire avait été observé, sauf pour certaines stations où les écarts correspondaient au datum lorsque les données proviennent de SONEL. Un

autre paramètre pourrait donc expliquer ces écarts. Cette question n'ayant pas été résolue faute d'une étude approfondie, il serait très intéressant de réaliser des tests similaires à ceux effectués sur l'origine des variations des RMSD et R de chaque station.

Conclusion

Lors de cette étude, il a été constaté que parmi les stations analysées, 47% disposaient de données mensuelles et 61% de données journalières. Parmi ces stations, 95% et 94% ont fourni des résultats mensuels et journaliers, respectivement, utiles dans divers domaines de recherche (Hydrologie, étude des tempêtes, ...). De plus, parmi les stations étudiées, 22% à 50% des stations ont été jugées de très bonne qualité, et 31 à 52% comme bonnes, en se basant sur la valeur du RMS des différences calées (différences - médiane des différences). Ainsi, près de trois quarts des stations présentent des données utilisables dans de nombreuses études.

En examinant les causes des stations de moins bonne qualité (6 à 16% pour les RMSD et coefficient de corrélation des données journalières, et 4 à 13% pour les données mensuelles), il a été identifié que les principaux facteurs sont le nombre d'observations total ou par jour ou mois, ainsi que la localisation des stations. Cependant, pour ce dernier facteur, la localisation ne serait pas le paramètre direct ; la température ou le marnage pourraient être les critères principaux expliquant certaines variations de la qualité des résultats.

Plus particulièrement, dans le cas des stations françaises, en comparant la carte des résultats obtenus à une carte des marnages (Figure 12), il est possible de voir une forte corrélation. En effet, à Saint Malo où les résultats ont été très peu satisfaisants, le marnage est très important. Alors qu'à Sète par exemple, il est très faible.

Il est également à noter que tous ces paramètres pourraient jouer un rôle simultané et que d'autres pourraient également entrer en jeu.

Marnage de vive-eau en France (RONIM, 1992)

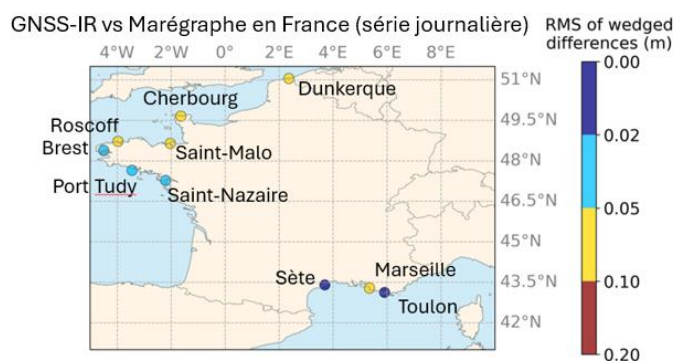
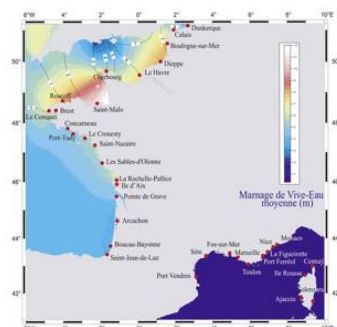


Figure 15 : Comparaison d'une carte des marnages avec la carte des résultats d'écarts quadratiques moyens des différences calées (RMSD) de la série journalière.

Pour approfondir cette analyse, il serait nécessaire de réaliser des études plus poussées, notamment en examinant les différents types de climats et d'environnements, et en segmentant les données par saison. Par exemple, en hiver, la France métropolitaine connaît plus de tempêtes qu'en été, et en été, ce qui pourrait influencer les résultats. Un autre facteur à explorer pourrait être l'impact de la présence ou non d'une constellation sur la qualité des résultats, ou l'utilisation des premières antennes et radomes dans les fichiers des stations par rapport aux dernières. Enfin, il serait pertinent d'analyser les périodes durant lesquelles les appareils ont fonctionné le plus longtemps et de sélectionner les appareils ayant le plus fonctionné durant les périodes de données traitées pour affiner les statistiques.

Remerciements

Je tiens à tout d'abord à remercier mon maître de stage, Guy Wöppelmann, qui m'a offert l'opportunité d'effectuer mon stage au sein du LIENSS. Ce fut une expérience très enrichissante et formatrice me permettant notamment de m'intéresser dans un domaine que je ne connais que peu.

Je remercie encore mon maître de stage pour son accompagnement et ses précieux conseils tout au long de cette période. Son expertise et sa disponibilité m'ont permis d'avancer rapidement et efficacement lors de mon stage et ont été déterminantes dans ma compréhension des méthodes de mesure du niveau de la mer.

Je remercie également toute l'équipe DPL (Dynamique Physique du Littoral) et plus particulièrement de SONEL du LIENSS pour leur accueil chaleureux et leur collaboration. Ils

m'ont permis d'obtenir des données clés me permettant d'avancer plus rapidement sur mon travail et de m'aider lorsque j'avais des questions ou problèmes pour avancer.

Grâce à ce stage, j'ai pu approfondir mes connaissances en marégraphie, et j'ai beaucoup appris sur l'utilisation des données obtenues. Cette expérience m'a non seulement apporté des compétences techniques sur python, mais elle a également renforcé mon intérêt pour ce domaine d'étude.

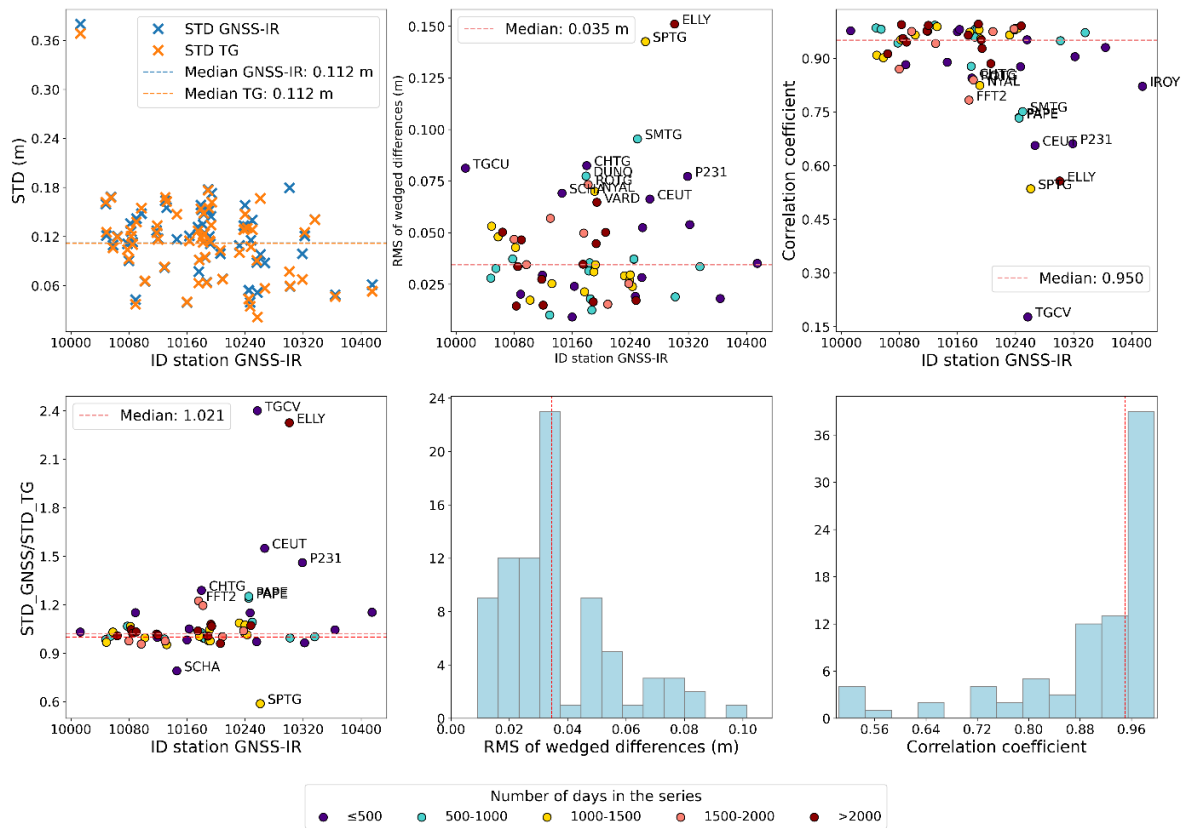
Je suis convaincu que les compétences et les connaissances acquises au sein de cette équipe du LIENSS me seront extrêmement utiles dans la poursuite de mes études et de ma carrière professionnelle. Je garderai un excellent souvenir de cette expérience et je serai ravi de rester en contact avec toute l'équipe.

Références

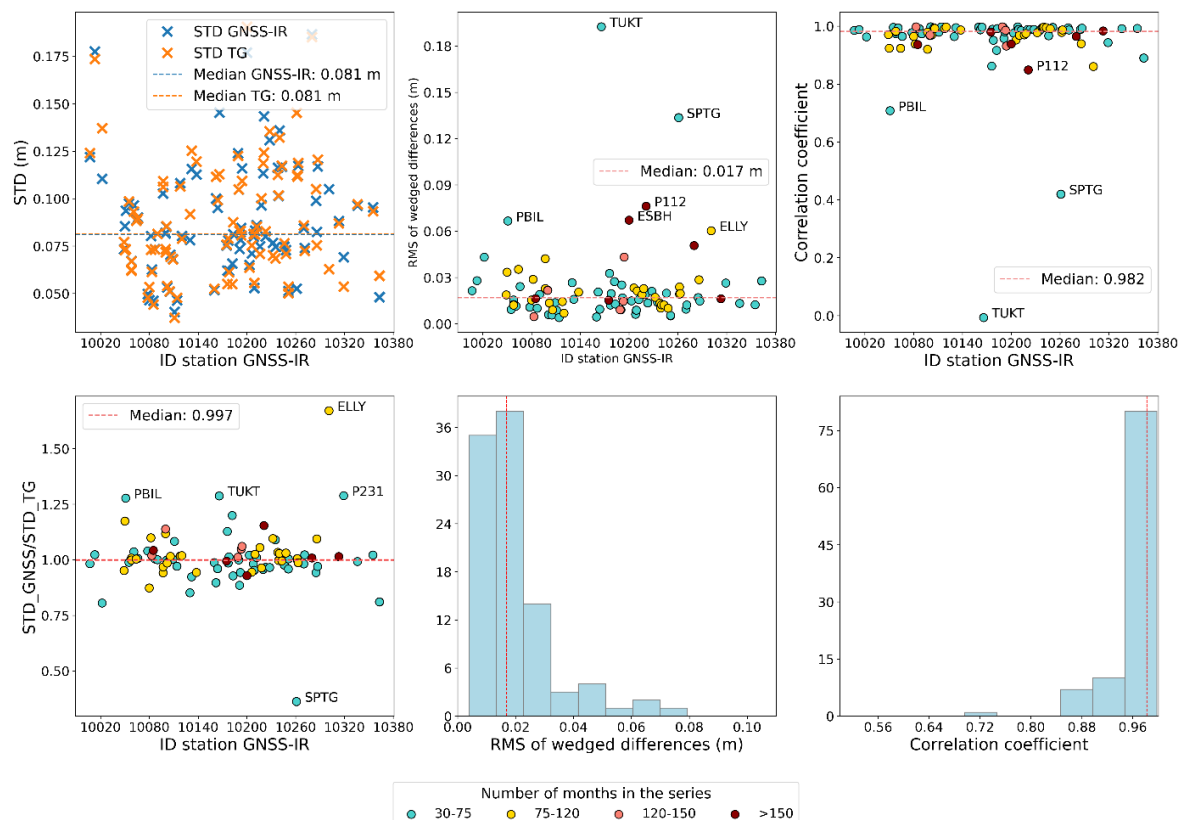
- André G., Giloy N., et Latapy A. 2024. Mesures du niveau marin.
- Dahl-Jensen T.S., Andersen O.B., Williams S.D.P., Helm V., et Khan S.A. 2021. GNSS-IR Measurements of Inter Annual Sea Level Variations in Thule, Greenland from 2008–2019. *Remote Sens.* **13** (24), 5077. <https://doi.org/10.3390/rs13245077>
- Larson K. M., Ray R.D., et Williams S. D. 2017. A 10-Year Comparison of Water Levels Measured with a Geodetic GPS Receiver versus a Conventional Tide Gauge. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **34** : 295–307. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0101.1>
- KarenC, 2019. Helping Marine Travel: Nautical Charts. Marine Insight.

- <https://www.marineinsight.com/marine-navigation/helping-marine-travel-nautical-charts/>
- Larson K. M., Feigl, K., D. Agnew, Y. Bock, A. Donnellan, B. Hager, T. Herring, D. Jackson, T. Jordan, R. King, S. Larsen, M. Murray, Z. Shen, et F. Webb. 1993. Space geodetic measurement of crustal deformation in central and southern California, 1984- 1992, *J. Geophys. Res.* **98** (B12) : 21,677-21,712.
 - Larson K.M., Ray R. D., Nievinski F. G. et Freymueller J. T. 2013. The Accidental Tide Gauge: A GPS Reflection Case Study from Kachemak Bay, Alaska. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **10** (5) : 1200-1204, doi : [10.1109/LGRS.2012.2236075](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2236075)
 - Larson K.M. et la communauté GNSS-IR. 2021. <https://pypi.org/project/gnssrefl/1.0.6/>
 - Letetrel C. 2010. Mouvements verticaux à la surface de la Terre par altimétrie radar embarquée sur satellite, marégraphie et GPS. : un exemple d'application: le Golfe du Mexique. Thèse de doctorat universitaire. Université de La Rochelle, La Rochelle, 186 PP.
 - Littoral ENvironnement et Sociétés (LIENSs) - UMR, consulté le 5 juin 2024. Présentation. <https://lienss.univ-larochelle.fr/Presentation-491>.
 - Littoral ENvironnement et Sociétés (LIENSs) - UMR, consulté le 5 juin 2024. Présentation de l'équipe DPL. <https://lienss.univ-larochelle.fr/Presentation-324>.
 - Merrifield M. A. Merrifield, S. T. et Mitchum G. T. 2009. An anomalous recent acceleration of global sea level rise. *Journal of Climate*. **22**(21) : 5772-5781.
 - NOAA, consulté le 4 juin 2024. Marine Navigation: Moving safely along our marine highways. <https://oceanservice.noaa.gov/navigation/marine-nav/>
 - Peng D., Hill E.M., Li L., Switzer A.D., et Larson K.M., 2019. Application of GNSS interferometric reflectometry for detecting storm surges. *GPS Solutions* **23**(47). <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0838-y>
 - PSMSL, consulté le 4 juin 2024. GNSS-IR portal. <https://psmsl.org/data/gnssir/index.php>
 - PSMSL, consulté le 4 juin 2024. Manuals and Guides. https://psmsl.org/train_and_info/training/manuals/
 - Santamaría-Gómez A. et Watson C. 2017. Remote leveling of tide gauges using GNSS reflectometry: case study at Spring Bay, Australia. *GPS Solutions* **21**: 451–459. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0537-x>
 - SHOM, consulté le 4 juin 2024. Niveau de la mer. <https://www.shom.fr/fr/nos-domaines-dexpertise/niveau-de-la-mer>
 - SONEL, consulté le 4 juin 2024. Compléments sur les marégraphes. <https://www.sonel.org/-Maregraphes,49-.html>
 - Strandberg J., Hobiger T., et Haas R. 2016. Improving GNSS-IR sea level determination through inverse modelling of SNR data. *Radio Science*. 1-23. Doi : [10.1002/2016RS006057](https://doi.org/10.1002/2016RS006057)
 - Standberg J. 2020. New methods and applications for interferometric GNSS reflectometry. Thèse de doctorat universitaire. Chalmers University of Technology, Gothenburg, 58 PP.
 - Wolfgang M. 1972. On the History of recording Tide Gauges. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh Section B Biology*. **73** : 26-34. Doi : <https://doi.org/10.3390/rs13245077>
 - Wöppelmann G. 1997. Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale. Thèse de doctorat universitaire. École doctorale Astronomie et astrophysique d'Île-de-France, Meudon, 258 PP.

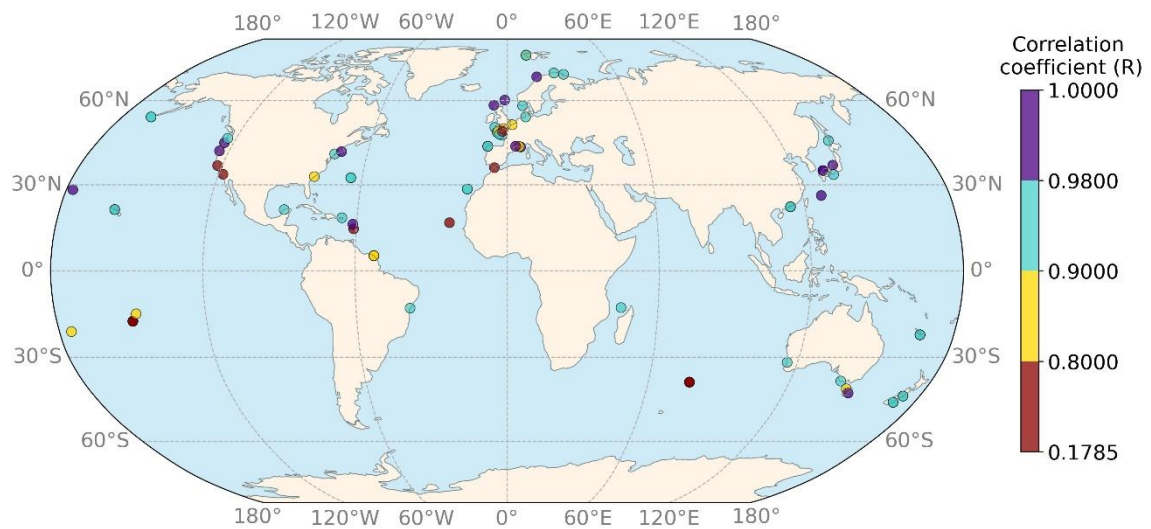
Annexe



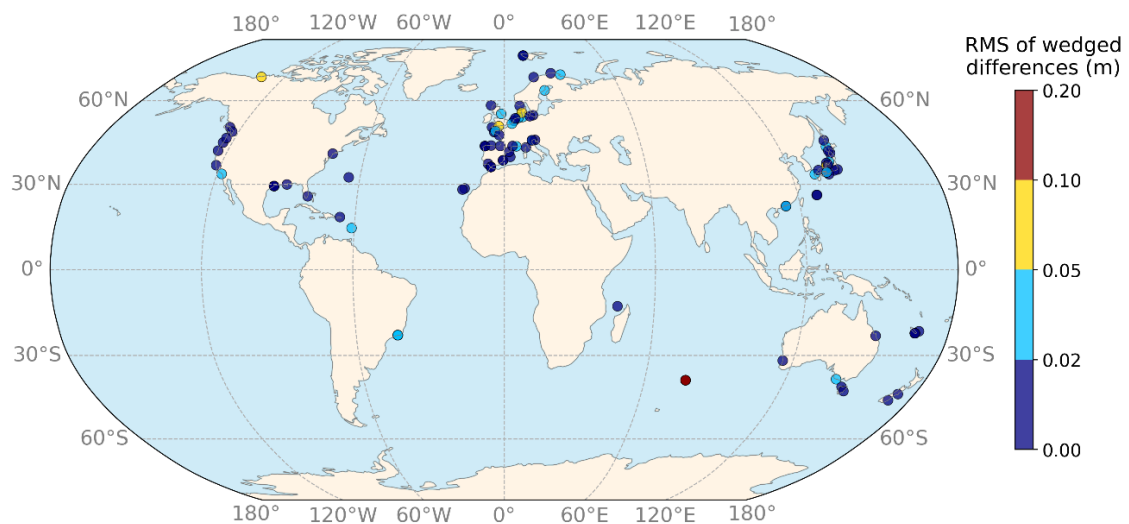
GNSS-IR vs marégraphes (série de données journalières, 86 stations). La tendance et la saisonnalité des données présentées ont été laissées. Les points de couleurs font références au nombre de jours dans la série comparant les moyennes journalières du niveau marin GNSS-IR et marégraphiques.



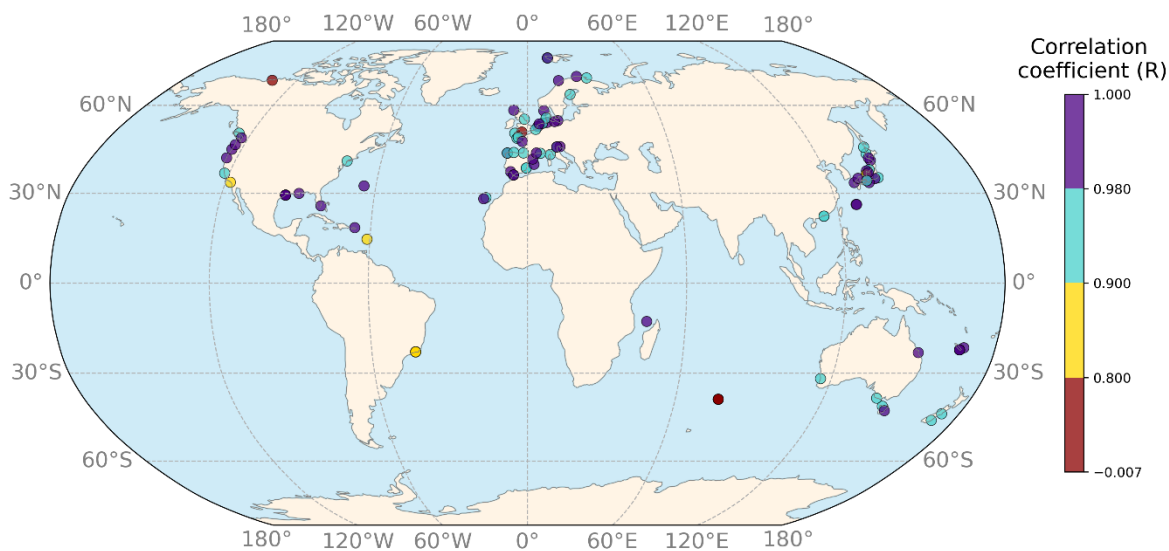
GNSS-IR vs marégraphes (série de données mensuelles, 103 stations). La tendance et la saisonnalité des données présentées ont été laissées. Les points de couleurs font références au nombre de mois dans la série comparant les moyennes mensuelles du niveau marin GNSS-IR et marégraphiques.



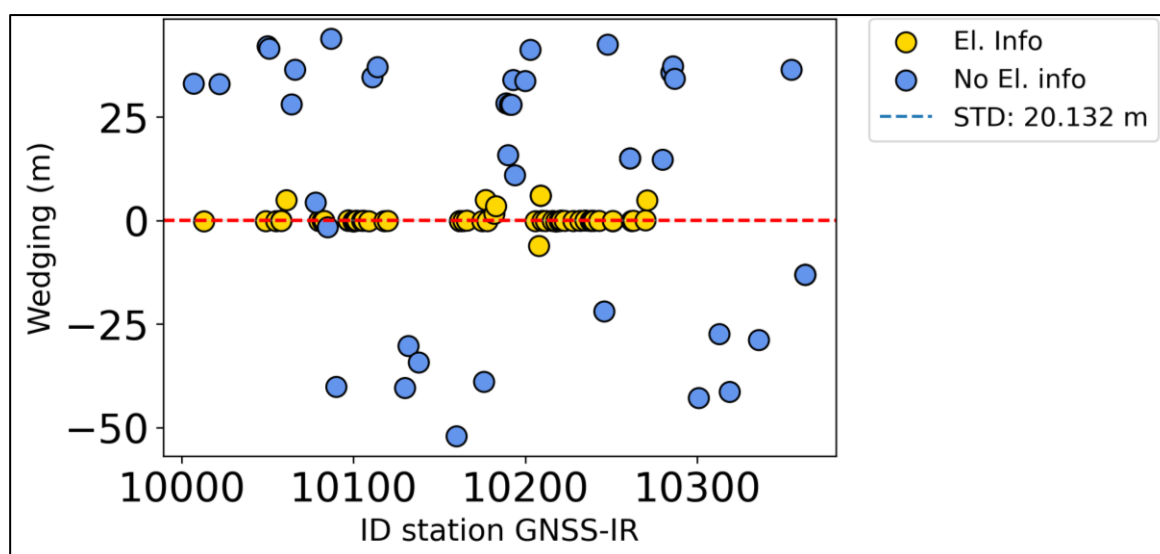
GNSS-IR vs marégraphe. Coefficient de corrélation sans tendance et saisonnalité (série journalière, 86 stations)



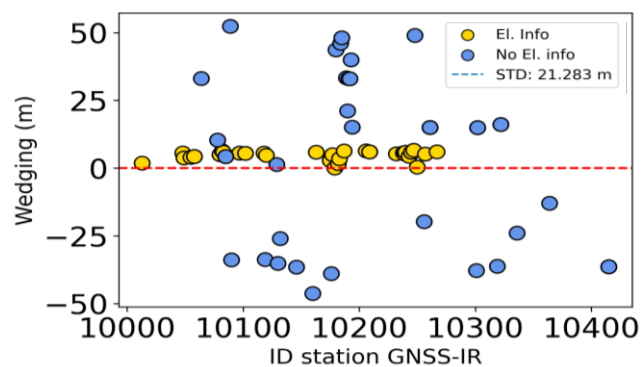
GNSS-IR vs marégraphe. RMS des différences sans tendance et saisonnalité (série mensuelle, 103 stations)



GNSS-IR vs marégraphe. Coefficient de corrélation avec tendance et saisonnalité (série mensuelle, 103 stations)



Monthly



Daily

Tableau 3 : Pourcentage de stations par catégories données suivant les résultats d'écarts quadratiques moyens des différences calées (RMSD) ou des coefficients de corrélation linéaires (R)

RMSD			R		
Catégories (m)	Journalier (%)	Mensuel (%)	Journalier (%)	Mensuel (%)	Catégories
0-0,02	22	59	18	52	1-0,98
0,02-0,05	52	31	51	35	0,98-0,9
0,05-0,1	20	5	15	7	0,9-0,8
0,1-0,2	6	5	16	6	<0,8