



Mémoire Master 2 :

L'analyse des variations du niveau de la mer mesurées par les marégraphes et l'altimétrie spatiale dans le Golfe de Mexique.

FONTAINE Camille

Master Sciences pour l'environnement parcours
Géosciences et géophysique du littoral.

2024-2025

Encadré par Mikhail Karpytchev

J'ai effectué mon stage de fin d'année de master au laboratoire LIENSs (UMR 7266), une unité de recherche interdisciplinaire affiliée à La Rochelle Université et au CNRS. Fondé en 2008, il regroupe près de 200 personnes sur un site unique de plus de 6 000 m², facilitant la mutualisation des ressources et la collaboration scientifique.

Le LIENSs concentre ses recherches sur le fonctionnement, l'évolution et l'exploitation durable de la zone littorale, en particulier dans le contexte actuel de changement global et d'urbanisation croissante des côtes. Son approche est résolument interdisciplinaire : elle mobilise des expertises allant des sciences de l'environnement (biologie, écologie, géophysique), à la chimie, aux biotechnologies, aux sciences humaines et sociales, à la géographie, à l'histoire et au droit de l'environnement

Les travaux du laboratoire s'articulent autour de grandes questions : comment fonctionne le système littoral à différentes échelles ? Comment évolue-t-il face aux pressions anthropiques et au changement climatique ? Comment les sociétés littorales s'adaptent-elles à ces mutations ? Et comment valoriser durablement les ressources littorales, notamment pour la santé humaine ?

Le LIENSs s'organise en six équipes de recherche thématiques et bénéficie de plateformes logistiques et analytiques de pointe. Il participe à de nombreux programmes nationaux et européens, et entretient une forte interaction avec les acteurs du territoire pour accompagner l'adaptation des sociétés et des écosystèmes littoraux aux changements en cours.

RESUME

Ce rapport analyse les variations du niveau de la mer dans le Golfe du Mexique à partir de données marégraphiques, d'altimétrie satellitaire et de mesures GNSS, afin d'estimer le mouvement vertical du sol (VLM) et d'évaluer la vulnérabilité côtière face à l'élévation du niveau marin. L'étude s'appuie sur des séries temporelles issues de marégraphes et d'altimétrie retraitée, couvrant plusieurs décennies, ainsi que sur des données GNSS récentes. Après filtrage des signaux pour extraire les tendances de fond, la cohérence entre les différentes sources est évaluée. Les résultats montrent une forte corrélation entre les variations du niveau de la mer mesurées par marégraphes et altimétrie, et confirment l'accélération de l'élévation du niveau marin depuis 2010. L'estimation du VLM par la méthode directe (différence entre tendances marégraphiques et altimétriques) est globalement cohérente avec les mesures GNSS sur la période récente. Une méthode régionale, inspirée de (Buble, Bennett and Hreinsdóttir, 2010) est également mise en œuvre. Elle repose uniquement sur les données marégraphiques pour estimer une tendance régionale commune du niveau de la mer, à partir de laquelle les variations locales peuvent être interprétées comme des mouvements verticaux du sol. En parallèle, une approche de reconstruction basée sur l'analyse en composantes empiriques permet d'étendre ces estimations sur des périodes antérieures à la couverture GNSS, offrant une vision historique du VLM. Cette démarche met en évidence l'importance de combiner plusieurs types de données pour mieux comprendre et anticiper les impacts du changement climatique sur les zones côtières du Golfe du Mexique.

Table des matières

1. Introduction :	1
a. Zone d'étude :	3
b. Spécificité de la zone.	4
II. Matériels et méthodes :	5
a. Données :	5
1. Altimétrie satellitaire :	5
2. Les données marégraphiques :	8
3. Données GNSS :	8
b. Méthodologie :	9
1. Estimation du VLM avec la méthode directe :	9
i. Période 2002-2021 :	9
ii. Période 1960-2021 :	10
2. Estimation avec la méthode Buble :	11
II. Résultats :	13
a. Cohérence des niveaux d'eau mesurés par les marégraphes et l'altimétrie :	13
b. Estimation du VLM sur la période 2002-2021 :	18
1. Méthode directe :	18
2. Méthode Buble (Buble, Bennett and Hreinsdóttir, 2010) :	20
c. Estimation du VLM sur la période 1960-2021 :	21
1. Méthode directe :	21
2. Méthode Buble (Buble, Bennett and Hreinsdóttir, 2010):	25
III. Discussion :	26
IV. Conclusion :	27
V. Bibliographie :	28
VI. Annexe :	30
a. ANNEXE 1 :	30
b. ANNEXE 2 :	31
.....	32
c. ANNEXE 3 :	33
d. ANNEXE 4 :	34

1. Introduction :

L'élévation du niveau de la mer est l'une des conséquences les plus menaçantes du réchauffement climatique actuel pour les populations vivant dans les zones côtières de basse altitude. Les côtes basses du Golfe du Mexique (GOM) abritent une grande variété d'écosystèmes et de communautés humaines qui sont très vulnérables aux changements du niveau de la mer (Letetrel *et al.*, 2015). On distingue deux notions fondamentales du niveau de la mer : le niveau de la mer absolu, qui correspond à la hauteur de la surface de la mer par rapport à un référentiel géocentrique (généralement le centre de la Terre), et le niveau de la mer relatif, qui est la hauteur de la mer mesurée localement par rapport au sol sur lequel est installé le marégraphe. Les fluctuations relatives du niveau de la mer comprennent à la fois les changements absolus du niveau de la mer et les mouvements verticaux du sol qui peuvent être dus à plusieurs facteurs comme : l'ajustement isostatique glaciaire (GIA), des processus tectoniques, l'affaissement ou au soulèvement côtier provoqué par des facteurs anthropiques telle que le pompage d'eau ou des hydrocarbures (Letetrel *et al.*, 2015). Les côtes du golfe du Mexique sont exposées à des situations problématiques qui peuvent être classées en deux processus différents : (1) l'érosion côtière et (2) la perte de zones humides (Boesch *et al.*, 1994; Davis, 2011). Ces deux processus sont au moins en partie dus à l'élévation absolue du niveau de la mer, exacerbée par les mouvements verticaux du terrain (Davis, 2011). Plusieurs techniques permettent d'observer et mesurer le mouvement vertical de la surface terrestre (VLM = Vertical Land Movement) :

- Les GNSS (Global Navigation Satellite Systems) permettent d'estimer le VLM par rapport au référentiel terrestre, malheureusement ils sont distribués de manière inhomogène dans l'espace, souvent incomplètes dans le temps, couvrent une période relativement courte et peuvent être affectées par plusieurs sources d'erreur telles que les changements d'équipement ou le tassement de la plate-forme (Oelsmann *et al.*, 2024).
- Les marégraphes mesurent le niveau de la mer relatif. La couverture spatio-temporelle des marégraphes est loin d'être satisfaisante. De nombreuses côtes, en particulier dans l'hémisphère sud, ne sont pas ou seulement mal échantillonnées (Leclercq *et al.*, 2025).
- L'altimétrie par satellite, qui depuis le début des années 1990 fournit une mesure du niveau de la mer absolu (Letetrel *et al.*, 2015). Cependant, à l'approche des côtes mondiales, les données de niveau de la mer basées sur l'altimétrie sont dégradées dans une bande d'environ 20 km autour de la côte en raison de mesures altimétriques parasites contaminées par des échos radar provenant des terres environnantes (Cipollini *et al.*, 2017; Vignudelli *et al.*, 2019). Toutefois de nombreuses études ont montré que le retraitement dédié de l'altimétrie radar permet de récupérer des données valides dans les zones côtières (Passaro *et al.*, 2014; Birol *et al.*, 2017a, 2021).

Cette étude a pour objectif d'estimer le mouvement vertical du sol (VLM) sur les côtes du golfe du Mexique pour des périodes antérieures aux mesures GNSS. Cette approche permet d'isoler la composante liée aux mouvements verticaux du terrain, essentielle pour interpréter correctement les variations observées du niveau marin et évaluer la vulnérabilité côtière face à l'évolution du niveau de la mer. Nous savons que les marégraphes et l'altimétrie ne mesurent pas la hauteur au même endroit. Cela soulève la question suivante : les estimations du mouvement vertical du sol, obtenues par la combinaison de l'altimétrie satellitaire retraitée et des marégraphes, sont-elles cohérentes avec celles fournies par les mesures GNSS sur la période commune ? Pour répondre à cette question, nous devons filtrer les séries marégraphiques et altimétriques. Nous les filtrons pour pouvoir extraire le ou les modes de très basses fréquences, comme la tendance. Ensuite nous pourrions évaluer la cohérence des signaux en faisant une corrélation. Et enfin nous

pourrons répondre à la question en estimant le VLM et en le comparant avec les données GNSS. L'estimation du VLM repose sur une analyse en composantes empiriques appliquée à trois groupes de stations, afin d'identifier les modes dominants sur lesquels sera calculé le VLM.

Alors que les estimations classiques du VLM reposent principalement sur les données GNSS, souvent limitées à des séries temporelles courtes, ou bien sur les données XTRACK/ altimétrie grillé qui ont certes des séries temporelles plus longue mais avec très peu de donnée entre 1993 et les année 2000. Ce qui nous amène à nous demander : Quel est le mouvement vertical du sol (VLM) avant 2002, estimé à partir des données combinées d'altimétrie et de marégraphes, en l'absence de mesures GNSS ? nous utiliserons une approche de reconstruction basée sur l'analyse en composantes empiriques (EOF). Concrètement, nous projetterons les séries marégraphiques sur les EOFs issues de l'altimétrie retraité, ce qui permettra de reconstruire un nouveau signal cohérent avec l'altimétrie retraité sur la période commune et d'étendre cette reconstruction dans le passé. Le VLM sera alors estimé en comparant les tendances issues des marégraphes reconstruit et des marégraphes d'origine, offrant ainsi une vision historique du mouvement vertical du sol sur des périodes antérieures à la couverture GNSS.

a. Zone d'étude :

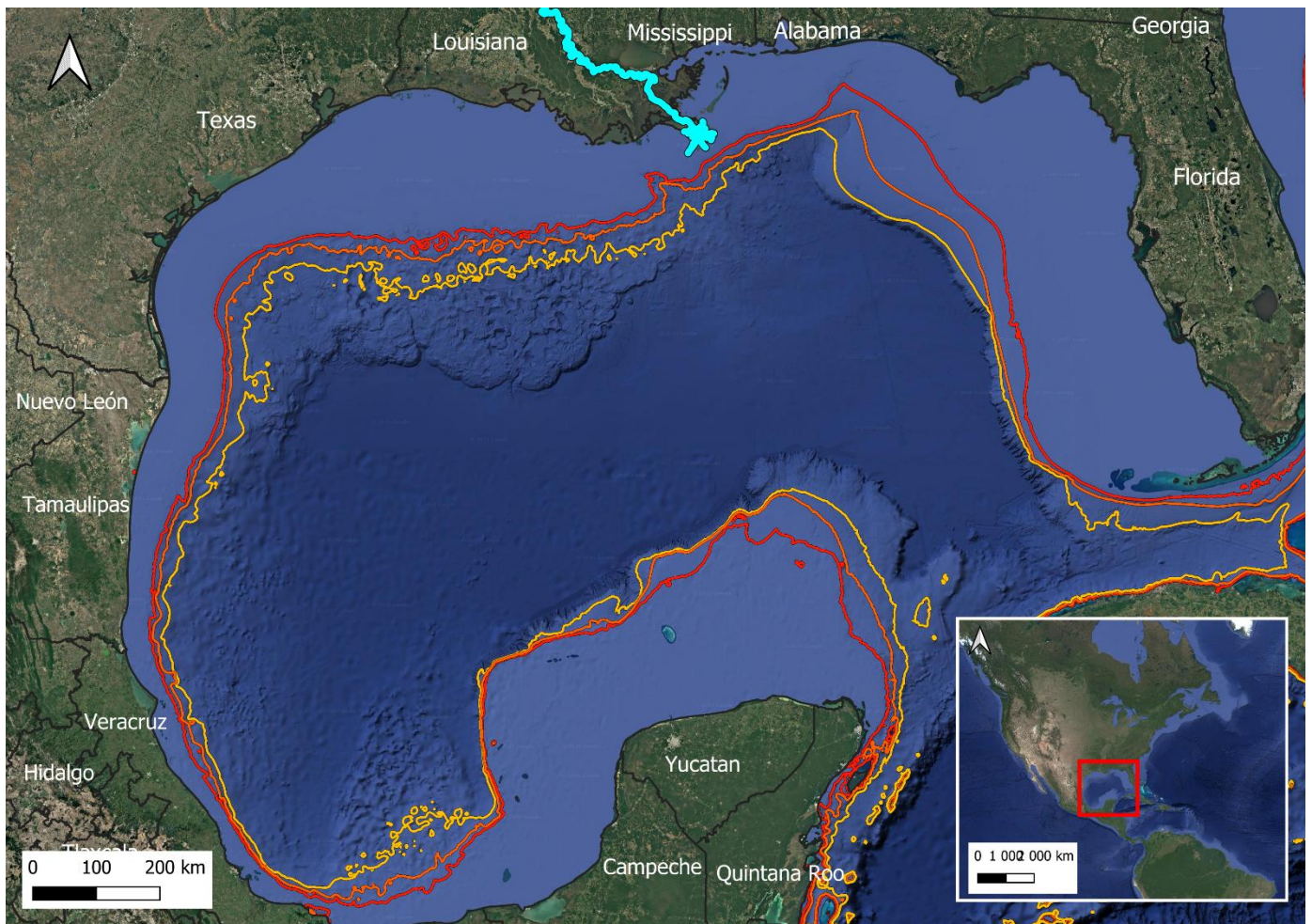


Figure 1. Définition de la zone d'étude : Golfe du Mexique. L'isobathe en rouge (-200) délimite le Plateau Continental. En Bleu c'est le delta du Mississippi. L'isobathe -500 est représentée en orange et l'isobathe -1000 est représentée en jaune. En encadré Blanc, situation géographique du Golfe de Mexique par rapport à l'Amérique du Nord et l'Atlantique du Nord.

Le golfe du Mexique est un vaste golfe de l'océan Atlantique situé au sud-sud-est de l'Amérique du Nord. Il est bordé par les États-Unis (au nord et à l'est, avec des États comme la Floride, l'Alabama, Mississippi, la Louisiane et le Texas), le Mexique (à l'ouest et au sud) et Cuba (au sud-est). Sa superficie est d'environ 1 550 000 km² et il communique avec la mer des Caraïbes par le détroit du Yucatán et avec l'océan Atlantique par le détroit de Floride. C'est une région riche en biodiversité, en ressources naturelles (notamment le pétrole) et en activités économiques liées à la pêche, au transport maritime et au tourisme.

Le plateau continental du golfe du Mexique constitue l'un des exemples les plus représentatifs de marge passive dans le monde. Il se caractérise par une largeur notable, particulièrement marquée au large de la Floride et de la péninsule du Yucatán, où il s'étend sur plusieurs dizaines à centaines de kilomètres avant de plonger vers les grandes profondeurs du bassin central. Cette vaste étendue submergée présente des fonds relativement peu profonds et une topographie douce, héritée de l'histoire géologique du golfe, avec une faible pente jusqu'à la rupture de pente marquant le talus continental.

Au Nord du Golfe nous retrouvons le delta du Mississippi, où des masses énormes de sédiments provenant du bassin de drainage du Mississippi ont construit une vaste plaine qui fait plus de 400 km de largeur (d'est en ouest) sur quelques 200 km de profondeur (du nord au sud). Depuis environ 80 ans, une grande partie du delta s'enfonce de plus en plus rapidement. Ce phénomène est dû à plusieurs facteurs : la canalisation et l'endiguement du fleuve, de nombreux aménagements humains, la fréquence et l'intensité des cyclones tropicaux, ainsi que l'extraction de gaz et de pétrole.

b. Spécificité de la zone.

Le golfe du Mexique se distingue par une dynamique océanographique d'une grande complexité, résultant de l'interaction entre des courants puissants, une stratification marquée et des échanges constants avec l'océan Atlantique. Au cœur de ce système, le courant de boucle, ou Loop Current, façonne la circulation dans les eaux profondes en pénétrant par le canal du Yucatán, décrivant une large courbe vers le nord avant de s'échapper par le détroit de Floride et d'alimenter le Gulf Stream. Ce courant, instable et oscillant, engendre régulièrement d'imposants tourbillons anticycloniques qui se détachent et dérivent vers l'ouest, redistribuant chaleur et énergie à travers tout le bassin, voir Figure 2. La structure verticale du golfe révèle une stratification marquée, avec des eaux superficielles chaudes et salées surmontant des couches intermédiaires et profondes plus froides, issues de l'Atlantique Nord. Les échanges verticaux sont limités par la présence d'une pycnocline prononcée, renforcée par les apports fluviaux, notamment ceux du Mississippi, qui modifient la salinité et favorisent la formation de zones hypoxiques saisonnières sur le plateau nord (Schmitz *et al.*, 2005). Nous pouvons voir 3 dynamiques différentes au sein du Golfe : l'**est** est dominé par le Loop Current, influençant la distribution de la chaleur et des nutriments. Le **nord** reçoit les apports fluviaux du Mississippi, avec une circulation côtière saisonnière cyclonique et des échanges verticaux causés par la brise de terre-mer. À l'**ouest**, des anneaux anticycloniques se propagent vers l'ouest depuis le Loop Current, avec une circulation côtière descendante de septembre à mars et montante de mai à août. La topographie sous-marine canalise les courants et forme des structures tourbillonnaires persistantes (Schmitz *et al.*, 2005).

Les marges continentales du golfe présentent des régimes de circulation variés, fortement influencés par les vents saisonniers, les marées et les apports d'eau douce. Sur la côte ouest, la baie de Campeche est le siège de la formation régulière d'eddies cycloniques, tandis que la plate-forme ouest de la Floride subit l'influence directe du Loop Current, qui favorise des intrusions d'eaux chaudes et des phénomènes d'upwelling. La circulation profonde du golfe, plus lente et homogène, est alimentée par l'Upper North Atlantic Deep Water, dont le renouvellement est contraint par la topographie des seuils sous-marins. Cette dynamique profonde assure une ventilation partielle du bassin central, où le temps de résidence des eaux excède le siècle, témoignant d'une connectivité étroite mais lente avec l'Atlantique (Schmitz *et al.*, 2005).

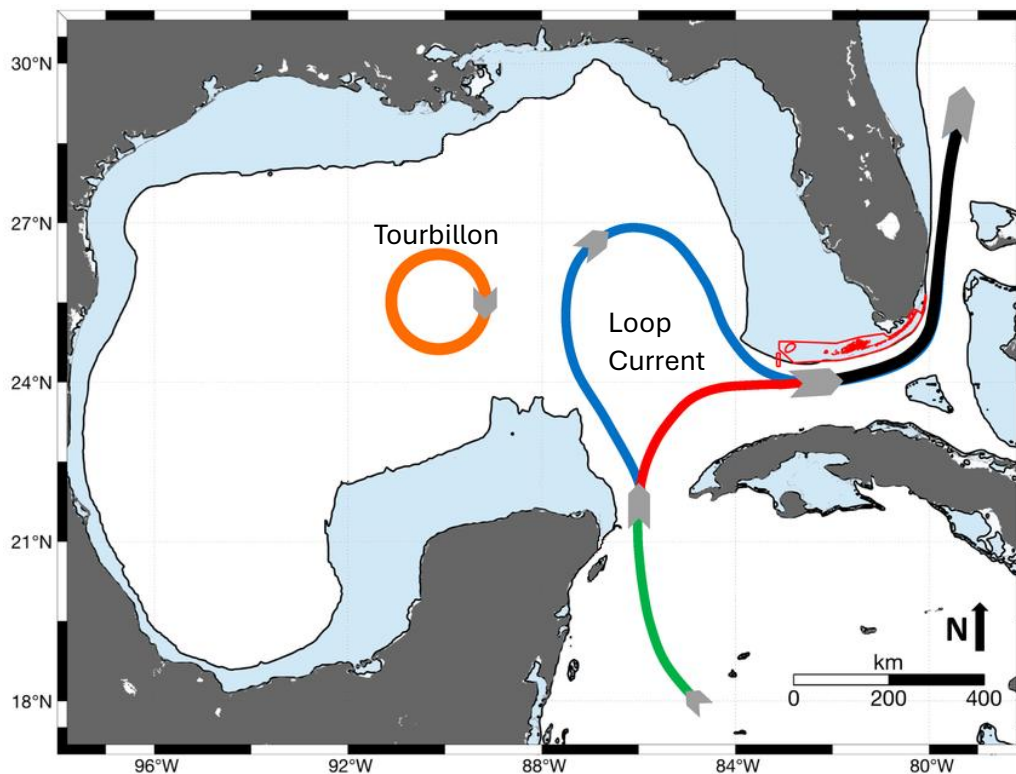


Figure 2. Schéma du Loop Current. Le courant entre dans le Golfe du Mexique par le canal du Yucatan (vert) et en sort par le détroit de Floride (noir). Le schéma représente deux états du Loop Current : rétracté en rouge et étendu en bleu. En orange, le tourbillon rejeté par le Loop Current quand il se rétracte. Figure adaptée de (Otis et al., 2019)

L'ensemble de ces processus fait du golfe du Mexique un système océanique particulièrement dynamique, où la variabilité mésoéchelle, la stratification verticale et les interactions côte-large jouent un rôle déterminant dans la distribution des masses d'eau, des nutriments et de l'oxygène. Les avancées récentes en modélisation numérique et en observation in situ permettent aujourd'hui de mieux comprendre la complexité de cette circulation, essentielle à la fois pour la prévision des événements extrêmes, la gestion des ressources marines et l'étude des impacts du changement climatique sur les marges océaniques de l'Atlantique (Schmitz et al., 2005).

II. Matériels et méthodes :

a. Données :

1. Altimétrie satellitaire :

Pour les données altimétriques, nous avons utilisé l'altimétrie retraité. Jusqu'à récemment, l'altimétrie radar classique ne pouvait pas fournir de données fiables sur le niveau de la mer à moins de 10 km de la côte. Cependant, un retraitement des formes d'onde radar sur la période 2002-2021, associé à des corrections géophysiques adaptées aux régions côtières, permet désormais de combler cette lacune sur un grand nombre de sites côtiers (Leclercq et al., 2025).

Ce sont les données d'XTRACK qui ont été retraitées. Les données XTRACK fournissent des séries temporelles d'anomalies du niveau de la mer (Sea Level Anomaly, SLA) le long des traces des satellites (Figure 3), avec une résolution spatiale de 1 Hz, c'est-à-dire qu'une mesure du niveau de la mer est enregistrée à chaque seconde le long de la trajectoire du satellite. Cela

correspond à une mesure tous les 6 à 7 kilomètres environ. Ces SLA ont été produite à partir de plusieurs missions altimétriques que l'on peut retrouver dans le Tableau 1.

Mission	Période de données
Topex/Poseidon + Jason-1 + Jason-2 + Jason-3	28/02/1993 – 07/04/2022
ERS-1 + ERS-2 + ENVISAT + SARAL	23/10/1992 – 16/04/2016
GFO	08/01/2000 - 08/09/2008
T/P interleaved+Jason-1 interleaved	20/09/2002 – 13/05/2017
HY-2A	12/04/2014 – 15/03/2016
Sentinel-3A	12/03/2016 – 26/01/2023

Tableau 1. Description des missions qui composent le produit XTRACK avec leurs périodes de couverture. Référence Aviso (CTOH, 2023).

Afin d'améliorer la précision sur ces SLA, des corrections géophysiques ont été appliquées concernant : l'ionosphère, la troposphère sèche, la troposphère humide, la marée polaire, la marée solide, la marée océanique ainsi que la charge de marée, et le DAC (Dynamic Atmospheric Correction). De plus en plus le produit XTRACK tend à se perfectionner et donc à s'approcher de plus en plus des côtes.

Le retraitement a consisté à réestimer la portée altimétrique (c'est-à-dire l'altitude du satellite au-dessus de la surface de la mer) en utilisant la méthode de retracking ALES pour récupérer la hauteur de la surface de la mer basée sur l'altimétrie dans la zone côtière. Le retracking ALES fournit également la correction du biais de l'état de la mer appliquée aux données altimétriques du niveau de la mer pour tenir compte de la présence de vagues océaniques à la surface. Ici, nous nous concentrons sur les données haute résolution (20 Hz) le long de la trace. Nous interpolons les corrections géophysiques fournies à 1 Hz dans les enregistrements de données géophysiques (GDR) standard pour calculer les données du niveau de la mer à 20 Hz utilisées dans cette étude (Leclercq *et al.*, 2025). Le retraitement ne prend pas la mission Topex/Poseidon, car les données près des côtes sont de basse qualité, ce qui fait que la période que couvre l'altimétrie retraité est de janvier 2002 à juin 2021 Cet ensemble de données, disponible sur le site web SEANOE(The Climate Change Initiative Coastal Sea Level Team *et al.*, 2020; Cazenave *et al.*, 2022, 2022), est utilisé dans cette étude.

Le long des côtes du golfe, 32 stations virtuelles sont réparties. Pour chaque trajectoire satellite (Figure 3), les séries chronologiques sont établies sur une base mensuelle.

Afin d'accorder avec les données des marégraphes, nous rajoutons le DAC à nos données altimétriques. Le jeu de données ne permet pas de récupérer les corrections interpolé, nous nous sommes donc appuyer sur (Birol *et al.*, 2017b). Nous utilisons des valeurs de seuil tels que : 3.3 cm pour Jason-1, 2.5-3.4 cm pour Jason-2, 1-2 cm pour Jason-3 (Li, Han and Yang, 2023). Ensuite nous utilisons un filtre de seuil de 3σ ou 4σ (selon la zone côtière) est appliqué le long de la trace du satellite (σ est l'écart type de l'enregistrement le long de la trace). Ainsi, dans une deuxième étape, toutes les valeurs de correction sont interpolées à partir d'une courbe de Bézier construite à partir des données éditées(Birol *et al.*, 2017b).

Le Tableau 2 permet de visualiser les tendances de chaque station virtuelle sélectionnée en millimètres par an (mm/an). Ces tendances ont été estimées à l'aide de la méthode des moindres carrés ordinaires (OLS).

Station	Tendance (mm/an)
KEY WEST	6.1 ± 0.4
NAPLES	6.6 ± 0.4
FORT MYERS	5.9 ± 0.4
ST. PETERSBURG	7.9 ± 0.5
CEDAR KEY	4.5 ± 0.5
APALCHICOLA	7.0 ± 0.4
PENSACOLA	5.6 ± 0.4
DAUPHIN ISLAND	5.9 ± 0.5
GRAND ISLE	8.1 ± 0.5
GALVESTON II	8.0 ± 0.7
FREEPORT	7.7 ± 0.6
ROCKPORT	7.2 ± 0.7

Tableau 2. Analyse des tendances au niveau de chaque station, concernant les séries altimétriques retraitées pour la période de 2002 à 2021. Les tendances ont été estimées par la méthode des moindres carrés

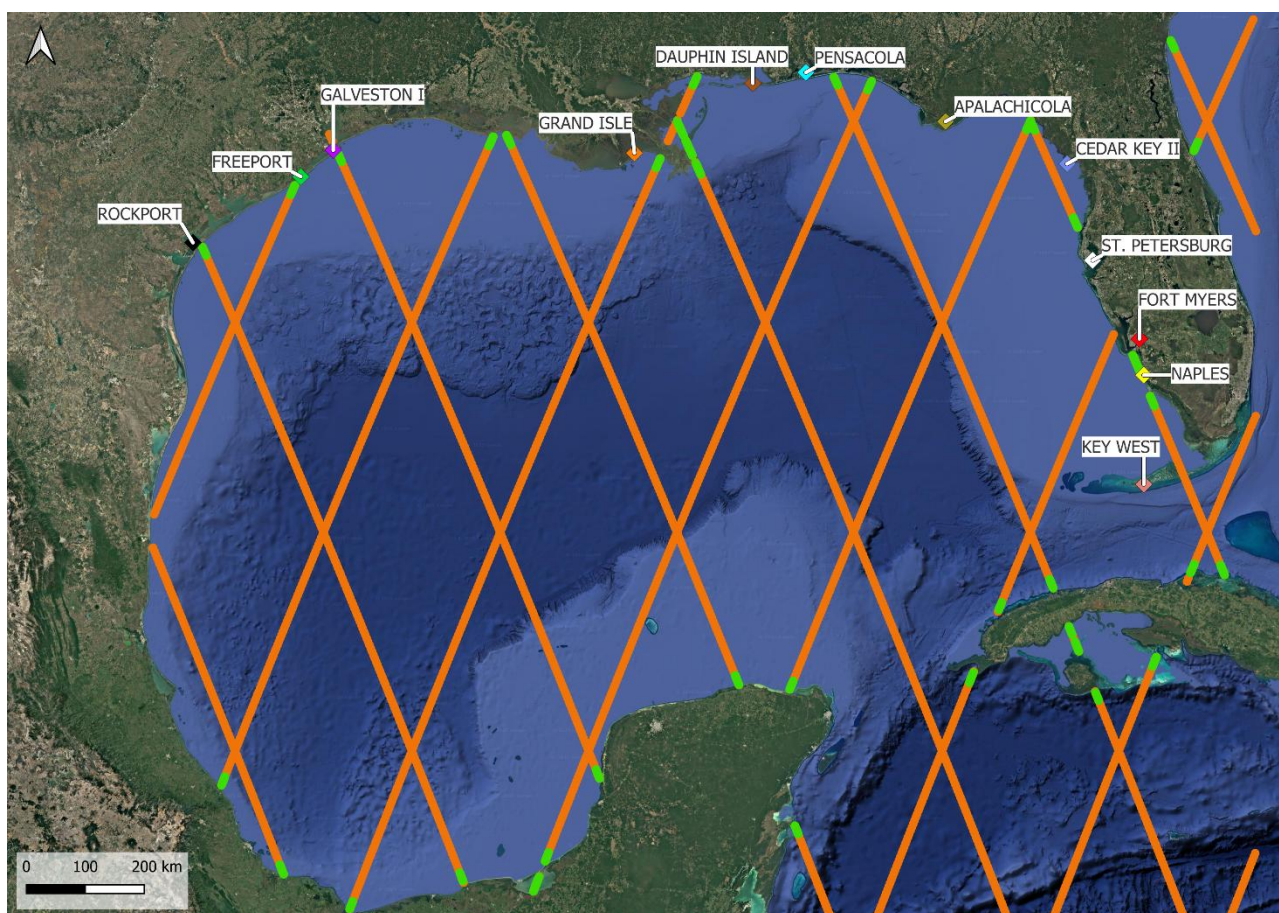


Figure 3. Les différentes traces altimétriques de T/P, Jason1, Jason2, Jason3 au sein du GOM, ainsi que les positions des marégraphes. En vert les parties des traces pour l'altimétrie retraité et en orange, les traces pour XTRACK.

2. Les données marégraphiques :

Les relevés mensuels des marégraphes ont été téléchargés depuis le Service permanent du niveau moyen de la mer (PSMSL) le 16 janvier 2025 (Holgate *et al.*, 2012). Pour sélectionner les marégraphes, ils devaient aux critères suivants : avoir 80 % de données valides, être proche des traces altimétrique (SEANOE et XTRACK) et avoir une série temporelle longue. Le choix s'est porté sur 12 marégraphes qu'on peut retrouver sur la Figure 3. Aucun marégraphe n'a été sélectionné sur la côte mexicaine en raison du nombre limité de données disponibles (3-4 ans) ou des nombreuses lacunes dans les enregistrements pour la période de 2002 à 2024.

Station	Période	Lacune	Tendance (mm/an)
KEY WEST	1913-2023	0.8%	2.6±0.1
NAPLES	1965-2023	3.7%	3.3±0.2
FORT MYERS	1965-2023	6.5%	3.5±0.2
ST. PETERSBURG	1947-2023	0.1%	3.1±0.1
CEDAR KEY	1938-2023	4.6%	2.4±0.1
APALACHICOLA	1967-2023	5.1%	3.0±0.2
PENSACOLA	1923-2023	1.3%	2.7±0.1
DAUPHIN ISLAND	1966-2023	18.9%	4.5±0.2
GRAND ISLE	1947-2023	4%	9.1±0.1
GALVESTON II	1908-2023	0.5%	6.6±0.1
FREEPORT	1954-2020	0.1%	8.7±0.2
ROCKPORT	1948-2023	15.6%	6.9±0.2

Tableau 3. Les marégraphes, leurs périodes de fonctionnement, la proportion de données manquantes et les tendances du niveau de la mer estimées par la méthode des moindres carrés sur la période de fonctionnement.

3. Données GNSS :

Nous avons bénéficié des données GNSS retraitées dans le cadre de la nouvelle solution ULR8 (Santamaría-Gómez *et al.*, 2025). Ces jeux de données fournissent la tendance en mm/an ainsi que son erreur en mm/an. Les tendances ont été déterminées pour 10 des 12 cas, comme présenté dans le Tableau 4.

Station	Tendance (mm/an)	Période	Distance avec le marégraphe (Km)
KEY WEST	-1.78 ± 0.38	2002-11-15 à 2014-01-15	5.30
NAPLES	-1.87 ± 0.41	2002-12-17 à 2024-02-08	3.57
FORT MYERS	-1.64 ± 0.26	2003-01-06 à 2022-10-06	6.22
ST. PETERSBURG	-1.82 ± 0.40	2007-01-01 à 2019-09-03	13.63
CEDAR KEY	N/A	N/A	N/A
APALACHICOLA	N/A	N/A	N/A
PENSACOLA	-0.99 ± 0.35	2004-02-04 à 2025	7.56
DAUPHIN ISLAND	-1.95 ± 0.18	2008-01-09 à 2025	0.30
GRAND ISLE	-7.06 ± 0.22	2004-06-22 à 2025	0.25
GALVESTON II	-4.10 ± 0.37	2005-01-01 à 2025	5.01
FREEPORT	-1.94 ± 0.34	2004-06-12 à 2025	11.78
ROCKPORT	-4.28 ± 0.57	2007-05-23 à 2017-10-20	4.49

Tableau 4. Stations GNSS : tendances mesurées, périodes de référence et proximité aux marégraphes

b. Méthodologie :

1. Estimation du VLM avec la méthode directe :

i. Période 2002-2021 :

Nous allons estimer le VLM : Vertical Land Motion ou mouvement vertical du sol, représente la variation de l'altitude d'un point à la surface de la Terre au cours du temps, indépendamment des variations du niveau de la mer. Il est crucial pour distinguer l'élévation réelle du niveau marin (par rapport au centre de la Terre) des variations relatives mesurées localement par les marégraphes, qui peuvent être influencées par le mouvement vertical du sol sur lequel ils sont installés, voir Figure 4. Pour estimer ce VLM nous allons utiliser l'approche directe qui revient à faire :

$$Tendance_{VLM} = Tendance_{alt} - Tendance_{TG} \quad (Eq1)$$

Alt pour altimétrie et TG pour Tide Gauge \Leftrightarrow marégraphe.

Avec l'erreur calculer comme suit :

$$Erreur_{VLM} = \sqrt{erreur_{alt}^2 + erreur_{TG}^2} \quad (Eq2)$$

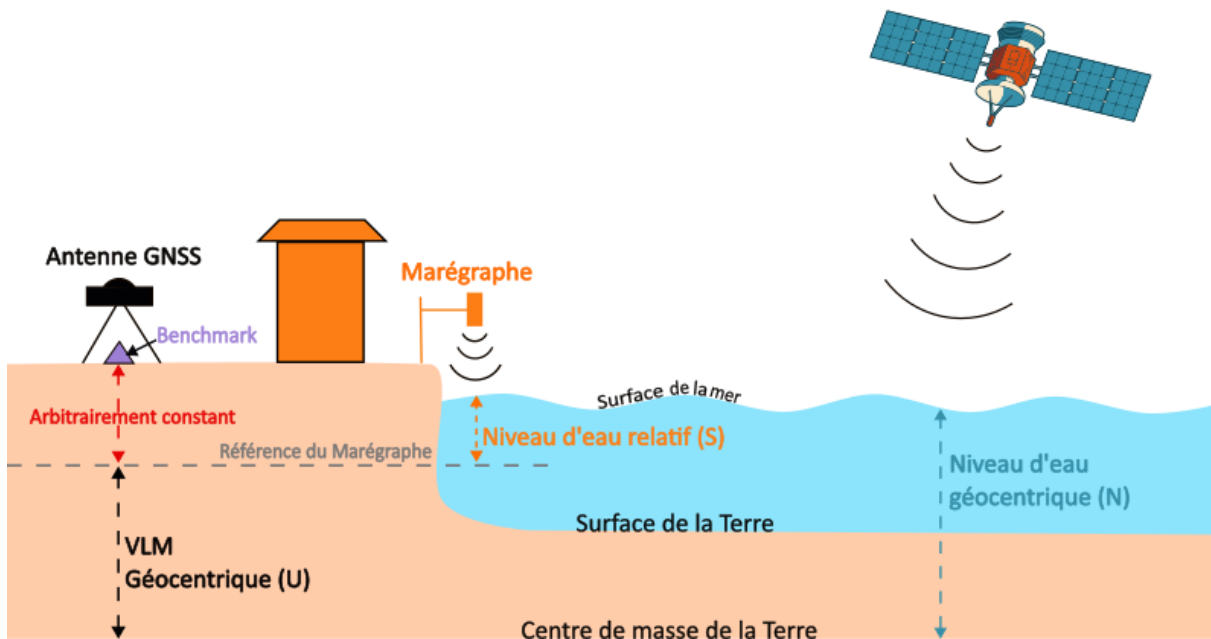


Figure 4. Schéma des mesures GNSS, marégraphique et altimétrique. Le VLM sera calculé avec le niveau de la mer géocentrique (N) et le niveau d'eau relatif (S), c'est l'approche directe. Figure adaptée de (Wöppelmann and Marcos, 2016)

Pour estimer le VLM (Vertical Land Motion) à partir de la différence entre les tendances il est essentiel de comparer des signaux qui reflètent uniquement les tendances de fond, sans être biaisés par la saisonnalité ou d'autres composantes périodiques. Nous filtrons la saisonnalité via les techniques :

- **EMD (Empirical Mode Decomposition)** est une méthode adaptative de décomposition des signaux non stationnaires et non linéaires, qui extrait successivement des fonctions appelées modes intrinsèques (IMF, Intrinsic Mode Functions). Chaque IMF représente une oscillation à une échelle temporelle propre, sans hypothèse préalable sur la forme des composantes. L'EMD repose sur un processus itératif de criblage (sifting) basé sur les extrema locaux du signal, jusqu'à obtenir la tendance et les fluctuations de plus basse fréquence (Flandrin and Gonçalves, 2003).
- **SSA (Singular Spectrum Analysis)** est une méthode non paramétrique d'analyse spectrale des séries temporelles, fondée sur la décomposition en valeurs singulières d'une matrice de trajectoire construite à partir de la série. Elle permet de séparer la série en composantes interprétables telles que la tendance, les cycles périodiques (y compris la saisonnalité) et le bruit. SSA combine des éléments d'analyse de séries temporelles, de statistiques multivariées et de traitement du signal, sans nécessiter d'hypothèses strictes sur la structure du signal. Pour cette méthode il est nécessaire d'indiquer en paramètre la longueur de la fenêtre, car celle-ci va influencer la séparation entre la tendance, la saisonnalité et le bruit. Nous avons choisi une fenêtre de 12 mois pour chaque station et pour les deux jeux de données (TG et altimétrie) (Hassani, 2010).

Avant de filtrer les signaux, nous devons évaluer la capacité de l'altimétrie à reproduire la variabilité locale du niveau de la mer enregistrée in situ. Cette étape est essentielle pour valider l'utilisation conjointe de ces jeux de données dans l'analyse des tendances et des variations du niveau marin côtier. Pour pouvoir évaluer cette cohérence, il faut prendre les traces qui sont proches des marégraphes et il est nécessaire de prendre les SLA (Sea Level Anomaly) moyennées sur 10 points qui est fourni dans le jeu de donnée.

Pour chaque filtre, notre but est de garder la tendance qui est le mode de plus basse fréquence. Il est important d'évaluer la fiabilité des méthodes, pour cela nous devons comparer les variances brute (séries non filtré) et les variances filtrées à l'aide des deux techniques. La variance mesure la dispersion des valeurs autour de leur moyenne, c'est-à-dire la variabilité interne d'une méthode ou d'une estimation.

Ensuite, une matrice de corrélation est établie entre chaque station marégraphique et leurs points altimétriques les plus proches. La corrélation est exprimée en pourcentage, allant de 0 à 100, où 0 % indique aucune corrélation et 100 % indique une corrélation parfaite. En complément de la corrélation, les p-values sont calculées pour déterminer si les corrélations sont statistiquement significatives. Si les p-values sont inférieures à 0.05, alors elles seront considérées comme statistiquement significatives.

En filtrant la saisonnalité et la partie du signal sub-annuel, nous nous focalisons sur la variabilité interannuelle et décennale pour mieux révéler la tendance souvent non-linéaire.

ii. Période 1960-2021 :

Nous cherchons à estimer le VLM sur la même période que les marégraphes souvent compris entre 1960 et 2021. À partir des années 1960, la plupart des marégraphes étaient déjà en service et les réseaux de mesure étaient suffisamment développés pour garantir une couverture spatiale et temporelle cohérente et fiable. Malheureusement, les produits altimétriques et les données GNSS ne fournissent pas autant de données.

Nous allons filtrer les données marégraphiques et altimétriques avec les mêmes techniques vue précédemment : **EMD, SSA**. Nous conservons les modes de fréquence la plus basse, puis nous enlevons la tendance présente dans les séries marégraphiques et altimétriques. L'objectif est d'extraire les modes qui représentent la variabilité résiduelle, plutôt que de capturer la tendance globale. Nous appliquons L'**EOF** uniquement sur les données altimétriques, ce qui nous permet d'identifier le ou les modes dominants et leurs évolutions temporelles associées :

- **L'EOF (Empirical Orthogonal Function)** est une méthode statistique de réduction de dimension utilisée pour extraire les modes dominants de variabilité spatiale et temporelle dans des ensembles de données. Elle consiste à décomposer un jeu de données en une série de modes orthogonaux (EOFs), obtenus comme les vecteurs propres de la matrice de covariance du jeu de données. Chaque mode représente un motif spatial caractéristique, tandis que les coefficients associés (composantes principales) décrivent l'évolution temporelle de ce motif. Cette méthode permet d'identifier et de quantifier les structures principales de variabilité dans des champs spatio-temporels complexes. Dans cette méthode ce qui va nous intéresser le plus c'est la variance expliquée de chaque mode. Nous cherchons à garder le ou les modes dominants c'est-à-dire avec une variance expliquée de plus de 90%. Avec ce ou ces modes nous pouvons reconstruire le signal et comparer les signaux reconstruit de TG et les signaux reconstruit de l'altimétrie.

L'application d'EOF sur ces séries filtrées permet ensuite d'extraire les modes de variabilité les plus significatifs et d'estimer plus précisément la tendance commune, donc le VLM, en minimisant l'influence du bruit ou des signaux locaux. Pour ce faire nous avons déterminé 3 groupes sur lesquels nous appliquons l'EOF. Nous faisons des groupes car selon l'emplacement des stations nous n'avons pas la même dynamique et donc pas le ou les mêmes modes dominant communs.

- Groupe 1 : Key West, Naples, Fort Myers, St. Petersburg et Cedar key II
- Groupe 2 : Apalachicola, Pensacola, Dauphin Island et Grand Isle
- Groupe 3 : Galveston II, Freeport et Rockport

Nous conservons les modes où la variance expliquée dépasse 90%. Ensuite, nous réintroduisons les tendances initiales des séries marégraphiques et altimétriques. Les séries temporelles des marégraphes sont projetées sur ces modes EOFs, puis reconstruites. Cette étape permet de reconstruire, pour chaque site de marégraphe, un signal du niveau de la mer qui soit cohérent avec la variabilité spatiale et temporelle extraite des données altimétriques. Ainsi, même pour des périodes antérieures à la disponibilité des observations altimétriques, il est possible de reconstituer un signal représentatif du niveau de la mer local.

En comparant la tendance du niveau de la mer reconstruite à partir de cette méthode avec celle observée par les marégraphes, il devient possible d'estimer le mouvement vertical du sol sur des périodes bien plus longues que celles couvertes par le GNSS ou l'altimétrie satellitaire seule. Cette approche permet ainsi d'obtenir une vision historique du VLM, essentielle pour interpréter l'évolution du niveau marin et la vulnérabilité des zones côtières.

2. Estimation avec la méthode Buble :

Cette méthode s'inspire de l'approche présentée par Buble, (Buble, Bennett and Hreinsdóttir, 2010). Dans notre étude, nous utilisons exclusivement les séries temporelles des marégraphes, analysées sur la période 1960-2021. L'estimation repose sur une méthode d'inversion statistique : en considérant simultanément plusieurs marégraphes d'une même région, il devient

possible de dissocier le signal commun, interprété comme la tendance régionale du niveau de la mer, des signaux locaux, qui traduisent principalement les mouvements verticaux relatifs du sol (VLM) ou d'autres effets spécifiques à chaque site.

Pour chaque période d'étude, les données sont d'abord agrégées en moyennes annuelles afin de lisser la variabilité saisonnière et de renforcer la robustesse de l'analyse. Ensuite, pour chaque station, une régression linéaire est ajustée sur la série annuelle afin d'estimer la tendance locale du niveau de la mer. La tendance locale observée à chaque station peut être modélisée comme :

$$SLR_{relatif,i} = SLR_{commun} + VLM_i \quad (Eq3)$$

Où :

- SLR_{commun} est la tendance régionale commune du niveau de la mer,
- VLM_i représente l'effet local relatif (mouvement vertical du sol ou autre particularité du site).

Cette formulation repose sur l'hypothèse que la tendance du niveau absolu de la mer est spatialement homogène à l'échelle de la région étudiée. En soustrayant cette composante commune estimée à partir de l'ensemble des stations, on obtient les écarts de tendance à chaque station, attribuables aux mouvements verticaux locaux du sol. Pour séparer ces deux composantes, nous utilisons une approche par projection matricielle similaire à celle décrite dans l'article de Buble et al. (2010). Concrètement, les séries temporelles centrées des différentes stations sont organisées en une seule matrice, sur laquelle sont appliquées des opérations d'inversion linéaire afin d'isoler d'une part la tendance moyenne régionale (composante commune), et d'autre part les écarts station par station (composante locale).

Deux estimations sont alors obtenues. La première correspond à la tendance du niveau relatif de la mer à chaque station, calculée directement par régression linéaire (analogue à la « méthode II » de Buble et al.). Elle reflète le signal total mesuré par le marégraphe, incluant à la fois la variation du niveau de la mer et le mouvement vertical du sol. La seconde estimation, déduite par soustraction de la tendance régionale commune, fournit l'anomalie locale propre à chaque station. Cette anomalie est interprétée comme une estimation du VLM relatif, c'est-à-dire du mouvement vertical du sol par rapport à la moyenne régionale.

Enfin, si l'on suppose que le niveau moyen absolu de la mer est constant dans la région ou connu par ailleurs (par exemple grâce à l'altimétrie), ces estimations locales peuvent être transformées en vitesses de VLM absolues, selon la relation suivante :

$$VLM_i = SLR_{relatif,i} - SLR_{commun} \quad (Eq4)$$

Cette approche permet ainsi d'obtenir, pour chaque période, une estimation robuste de l'élévation régionale du niveau de la mer et d'identifier les stations présentant des comportements atypiques, sans recours à des mesures GPS.

II. Résultats :

a. Cohérence des niveaux d'eau mesurés par les marégraphes et l'altimétrie :

Par suite de groupement des données choisi plus haut, nous avons décidé de représenter 3 stations se situant dans les 3 différentes zones : Rockport à l'est, Grand Isle au nord et Naples à l'ouest. Dans un premier temps nous représentons les séries brutes sur la Figure 5, qui va nous donner un aperçu de la cohérence globale et les différences de variabilité entre les marégraphes et les séries altimétriques.

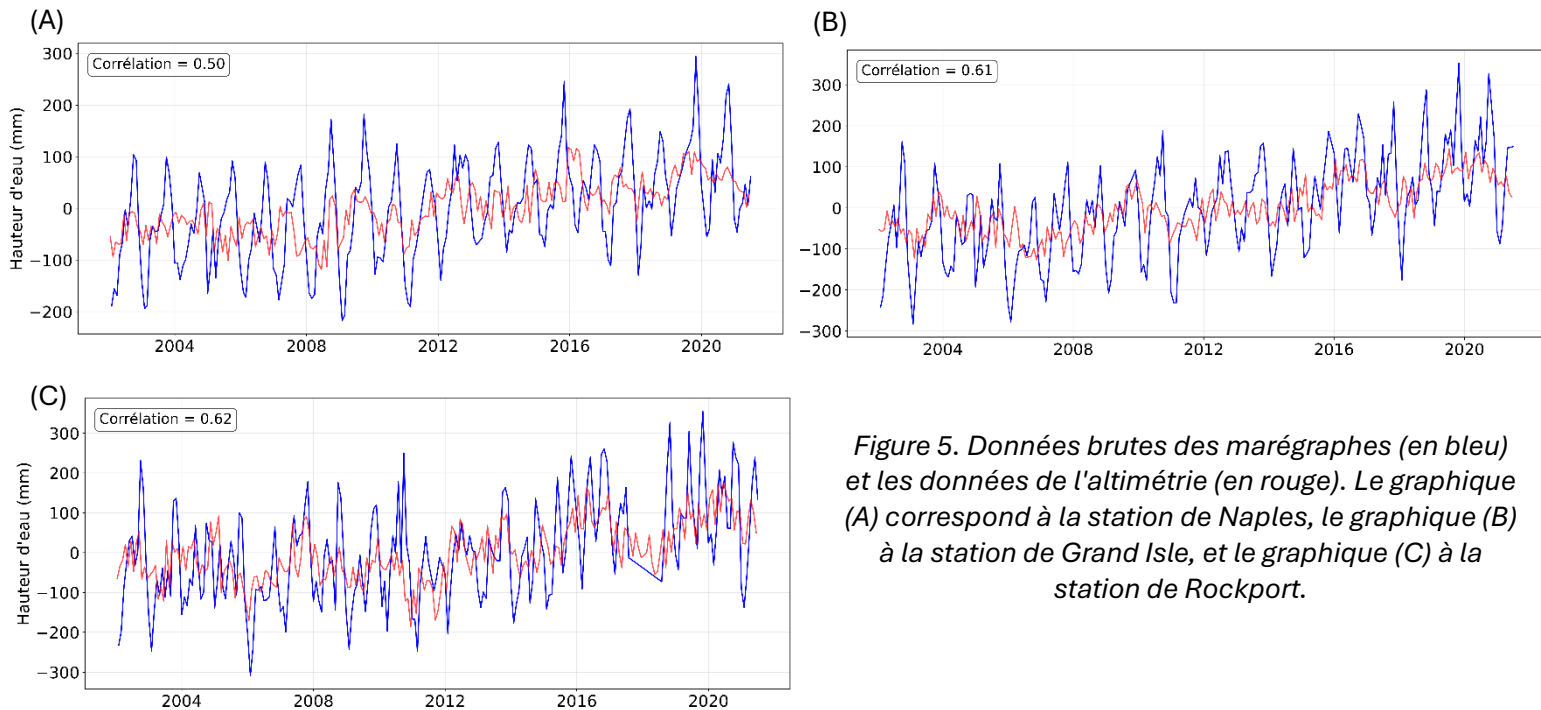


Figure 5. Données brutes des marégraphes (en bleu) et les données de l'altimétrie (en rouge). Le graphique (A) correspond à la station de Naples, le graphique (B) à la station de Grand Isle, et le graphique (C) à la station de Rockport.

La Figure 5 met en évidence une variabilité temporelle similaire entre les séries, caractérisée par des fluctuations saisonnières et interannuelles marquées mais très différentes en termes de leurs variances. Les données issues des marégraphes présentent toutefois une variabilité plus forte, avec des pics et des creux plus accentués que ceux observés dans les séries altimétriques, qui apparaissent légèrement plus lissées. La variance des marégraphes tourne autour de 10^4 mm^2 tandis que la variance des séries altimétriques tourne autour $3 * 10^3 \text{ mm}^2$. Malgré ces différences d'amplitude, l'évolution des deux courbes reste globalement cohérente. Cette distinction est quantifiée dans les colonnes « Variance brute » dans le Tableau 5, qui montre que la variabilité mesurée par les marégraphes est nettement supérieure à celle relevée par l'altimétrie sur l'ensemble des stations étudiées. Voir ANNEXE 1 : pour les autres stations.

Il est maintenant intéressant de comparer les variations interannuelles du niveau de la mer enregistrées par les marégraphes et par l'altimétrie. Nous utilisons deux méthodes, afin de séparer les modes de basse des modes de haute fréquence : SSA et EMD.

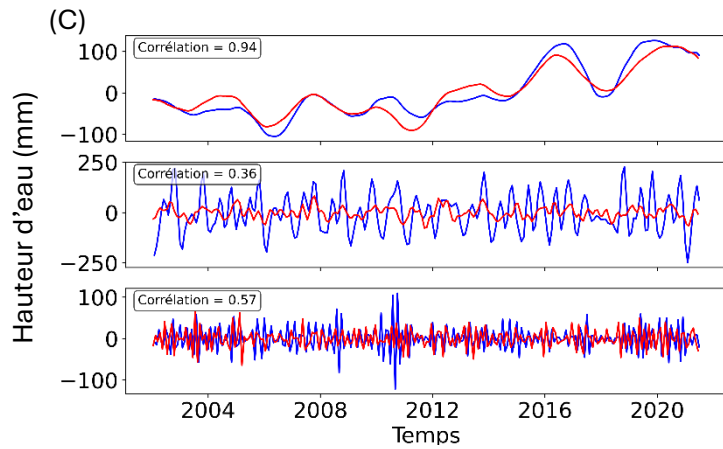
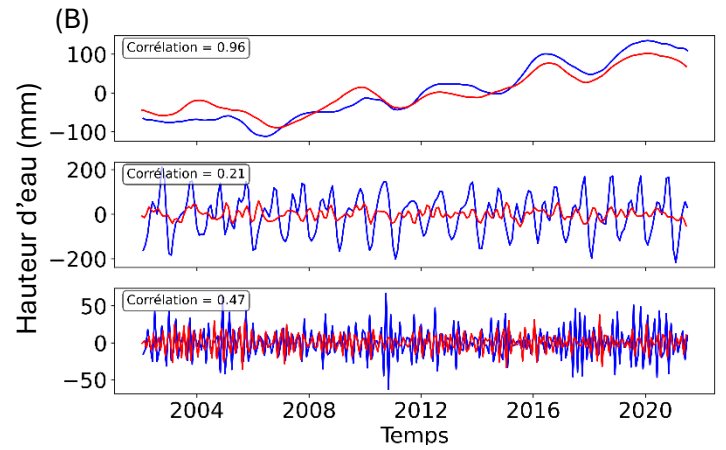
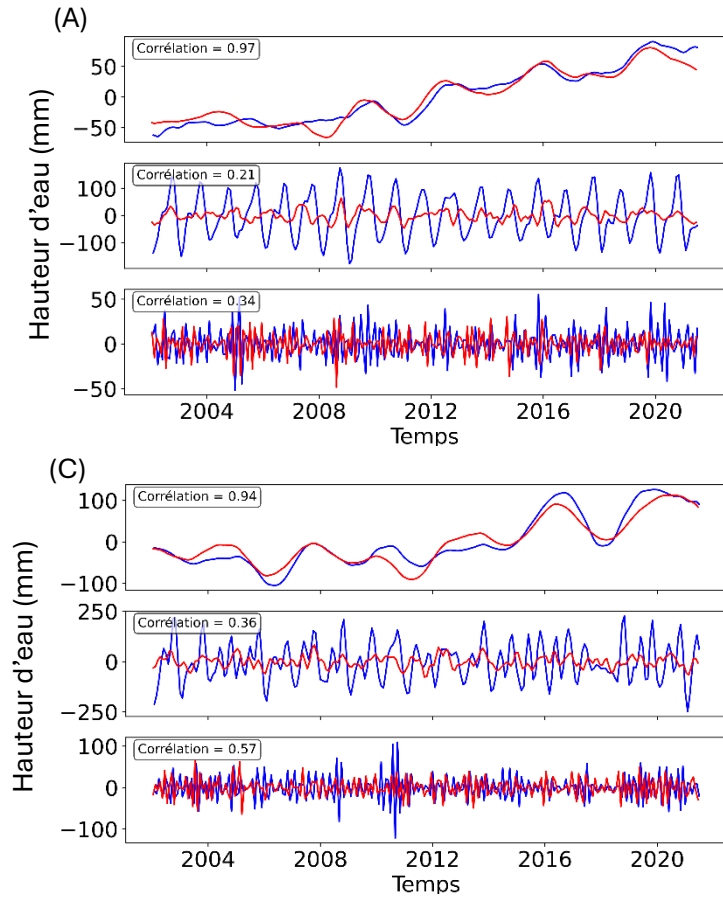


Figure 6. Décomposition des modes à l'aide de la technique SSA : les données marégraphiques sont représentées en bleu, tandis que les séries altimétriques sont indiquées en rouge. (A) la station de Naples, (B) la station de Grand Isle et (C) la station de Rockport.

La Figure 6 montre que, pour chaque station, le SSA décompose le signal en trois modes distincts. Les panneaux supérieurs illustrent la composante de tendance, les panneaux centraux présentent la composante périodique généralement associée à la saisonnalité ou à des cycles réguliers, et les panneaux inférieurs affichent la composante résiduelle, c'est-à-dire ce qui subsiste après l'extraction de la tendance et de la périodicité. Nous pouvons remarquer que les modes de plus basse fréquence, composé d'une tendance non-linéaire et des variations interannuelles observées par les marégraphes et par l'altimétrie sont beaucoup plus proches que leurs parties en hautes fréquences : le coefficient de corrélation dépasse 90%. La méthode EMD également révèle une cohérence entre les variations interannuelles et décennales du niveau de la mer enregistrées par l'altimétrie et les marégraphes (Figure 7)

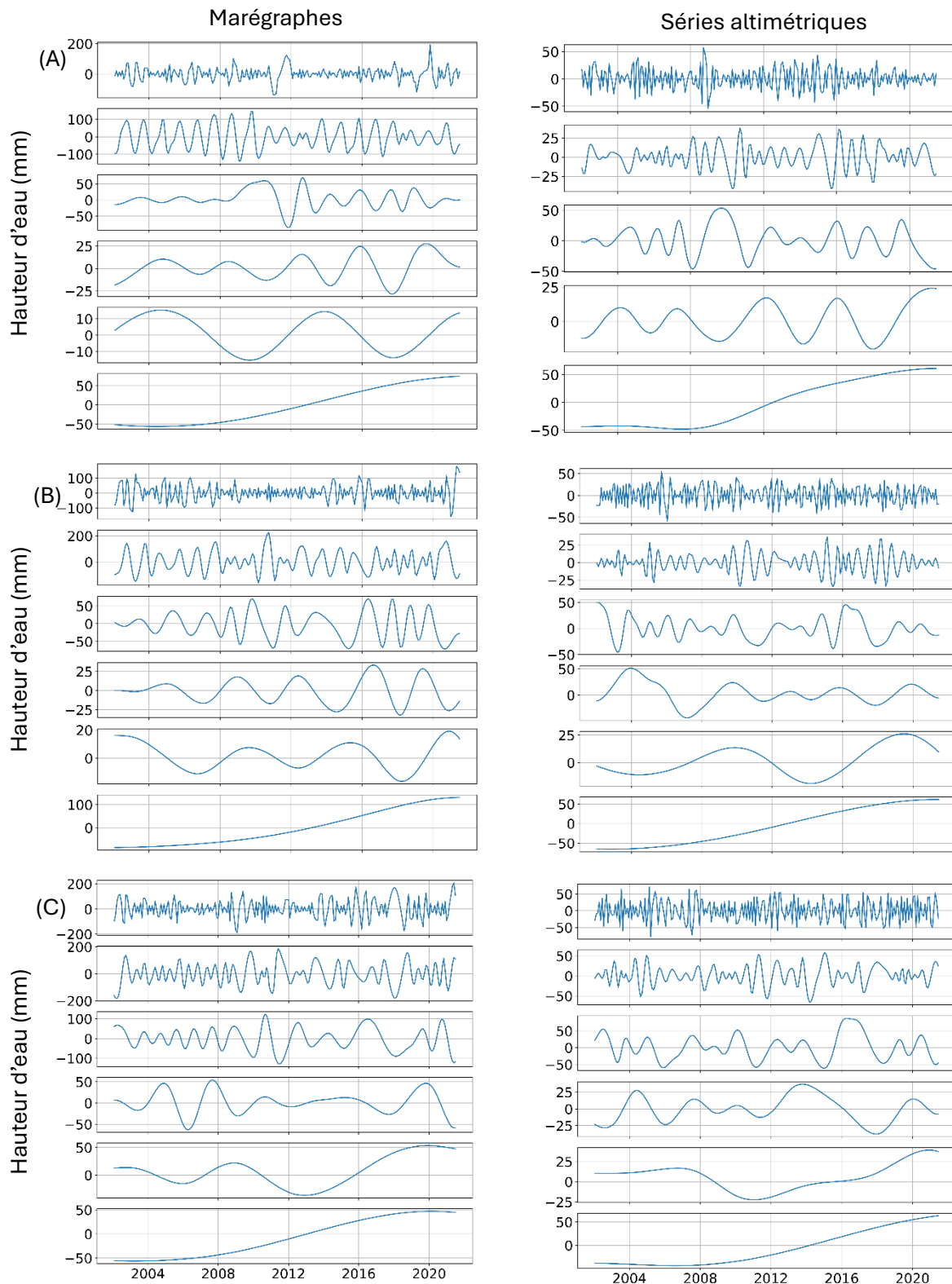


Figure 7. Décomposition des modes à l'aide de la technique EMD : nous retrouvons les données marégraphiques à gauche, tandis que les séries altimétriques sont à droite. (A) la station de Naples, (B) la station de Grand Isle et (C) la station de Rockport.

La Figure 7 présente la décomposition des marégraphes (à gauche) et de l'altimétrie (à droite). Il est notable que le nombre de modes décomposés varie légèrement en fonction des stations et des séries. Dans ce contexte, nous utilisons systématiquement le dernier mode, représenté par les derniers panneaux, car il correspond au mode de plus basse fréquence et donc à la tendance générale sur la période 2002-2021. Une fois nos séries filtrées, nous pouvons évaluer les cohérences entre les signaux.

Pour vraiment connaître l'efficacité des méthodes de décomposition pour isoler la variabilité de basse fréquence dans les séries du niveau de la mer, pour cela nous allons comparer les variances brutes et les variances après filtrage.

Station	Marégraphe			Altimétrie		
	Variance brute (mm ²)	Variance EMD (mm ²)	Variance SSA (mm ²)	Variance brute (mm ²)	Variance EMD (mm ²)	Variance SSA (mm ²)
KEY WEST	9177±848	1723±153	1909±177	2386±221	1623±150	1594±147
NAPLES	8919±825	2211±204	2044±189	2593±240	1654±153	1708±158
FORT MYERS	9992±924	2465±228	1859±172	2165±200	1367±126	1388±128
ST. PETERSBURG	9167±847	1305±121	1771±164	3650±338	2679±248	2692±249
CEDAR KEY	12820±1185	2515±233	3216±297	2480±229	941±87	1146±106
APALACHICOLA	11516±1065	3109±287	2345±217	2814±260	1982±183	1952±180
PENSACOLA	12838±1187	2113±195	2705±250	2465±228	1186±110	1472±136
DAUPHIN ISLAND	14607±1350	4754±440	5173±478	3317±307	1890±175	1858±172
GRAND ISLE	14223±1315	5416±501	5172±478	3735±345	2076±192	2792±258
GALVESTON II	18179±1681	5229±483	6681±618	5416±501	626±58	3143±291
FREEPORT	14125±1306	9302±860	5726±529	4587±424	1841±170	2856±264
ROCKPORT	14830±1371	1526±141	3914±362	5127±474	1341±124	2945±272

Tableau 5. Analyse comparative des variances du niveau de la mer (mm²) issues des marégraphes et de l'altimétrie.

Le Tableau 5 met en évidence l'efficacité des méthodes EMD et SSA pour filtrer la variabilité de haute fréquence des séries du niveau de la mer, en réduisant fortement la variance brute. Après filtrage, la variance résiduelle, essentiellement due aux composantes de très basse fréquence (tendances et cycles lents), devient comparable entre marégraphe et altimétrie. Les différences observées entre les deux méthodes de filtrage restent modérées et reflètent leur sensibilité respective à la structure des séries. Enfin, la robustesse des estimations est confirmée par la faible incertitude associée à chaque valeur de variance.

Pour garantir la cohérence des séries, nous allons également prendre en compte leurs corrélations et leurs biais. Le biais moyen représente la différence moyenne entre les deux séries. Nous appliquons la méthode des moindres carrés ordinaires (OLS) afin d'établir les corrélations avec leurs p-value pour chaque technique, ce qui permet de les comparer et de déterminer s'ils diffèrent ou non. Une p-value inférieure à 0,05 indiquera une corrélation statistiquement significative.

Station	Corrélation EMD	p-value EMD	Corrélation SSA	p-value SSA
KEY WEST	93%	****	90%	****
NAPLES	99%	****	97%	****
FORT MYERS	96%	****	95%	****
ST. PETERSBURG	93%	****	94%	****
CEDAR KEY	91%	****	85%	****
APALACHICOLA	97%	****	93%	****
PENSACOLA	98%	****	94%	****
DAUPHIN ISLAND	90%	****	89%	****
GRAND ISLE	99%	****	96%	****
GALVESTON II	94%	****	94%	****
FREEPORT	93%	****	93%	****
ROCKPORT	97%	****	94%	****

*Tableau 6. Comparaison analytique des corrélations et des p-values entre les séries marégraphiques et altimétriques en utilisant les méthodes EMD et SSA pour chaque station. Les **** correspond à une p-value inférieur à 0.001.*

D'après le Tableau 6 , les corrélations obtenues pour l'ensemble des stations sont très élevées (à l'exception de Cedar Key pour SSA) : elles dépassent 90% quelle que soit la méthode utilisée. Les corrélations entre les séries marégraphiques et les séries altimétriques filtrés par SSA, sont plus faible que les corrélations trouver par la méthode EMD. On observe que, pour la majorité des stations, la corrélation obtenue avec la technique EMD est légèrement supérieure à celle obtenue avec la SSA. Ces corrélations sont associées à des p-values extrêmement faibles, indiquant que la probabilité d'obtenir de tels résultats par hasard est quasiment nulle : les signaux sont donc très fortement corrélés d'un point de vue statistique.

b. Estimation du VLM sur la période 2002-2021 :

1. Méthode directe :

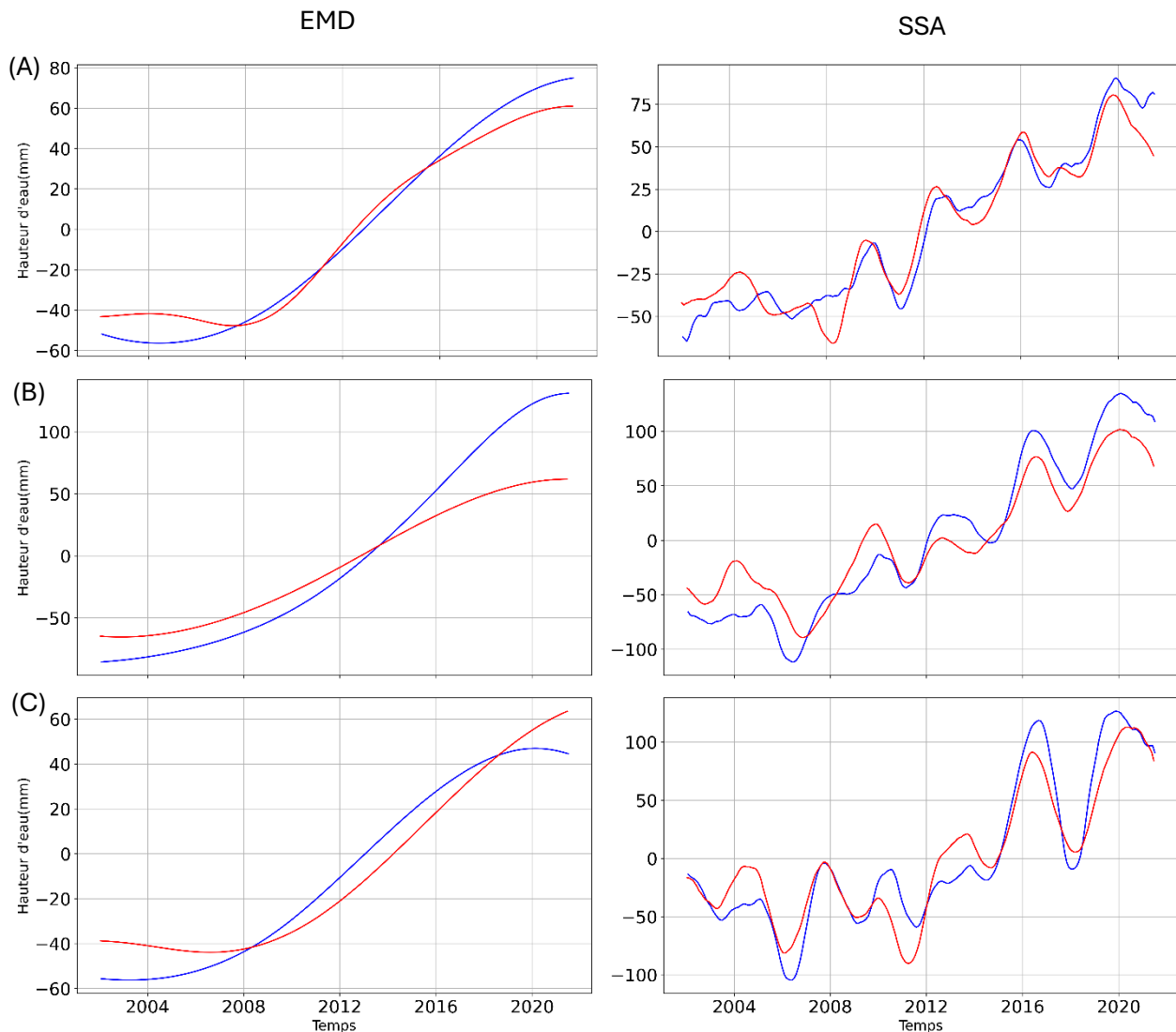


Figure 8. Comparaison EMD vs. SSA : Graphiques de gauche filtrés par EMD, de droite par SSA. Bleu pour marégraphes, rouge pour séries altimétriques. (A) Naples, (B) Grand Isle, (C) Rockport.

Les graphiques de gauche, présentés à la Figure 8 et obtenus par la méthode EMD, révèlent une tendance non linéaire prononcée : nous observons que le niveau de la mer reste assez inchangé entre 2002 et 2009 et nous pouvons voir qu'après 2009 il y a une augmentation rapide du niveau marin absolu. Les graphiques de droite, également illustrés à la Figure 8 sont issus du filtrage par SSA, suggère une tendance également non-linéaire à laquelle se superposent les fluctuations interannuelles du niveau de la mer. La méthode SSA semble maintenir les structures temporelles du signal tout en extrayant une tendance générale. Dans les deux méthodes les marégraphes et les séries altimétriques sont cohérents et évoluent de la même façon. Voir ANNEXE 2 :pour les autres stations.

A partir de ces reconstructions, nous estimons les VLM, que nous retrouvons dans le tableau 7 ci-dessous.

Station	EMD		SSA		EMD	SSA
	Tendance TG (mm/an)	Tendance alti (mm/an)	Tendance TG (mm/an)	Tendance alti (mm/an)	VLM (mm/an)	VLM (mm/an)
KEY WEST	7.32±0.06	6.54±0.19	7.33±0.17	6.04±0.24	-0.78±0.20	-1.28±0.30
NAPLES	8.15±0.12	6.89±0.14	7.60±0.17	6.63±0.21	-1.26±0.18	-0.97±0.27
FORT MYERS	8.24±0.21	6.28±0.13	6.80±0.23	6.02±0.18	-1.96±0.24	-0.78±0.29
ST. PETERSBURG	6.20±0.11	7.48±0.35	6.94±0.18	7.95±0.31	1.28±0.37	1.01±0.36
CEDAR KEY	8.71±0.12	4.47±0.20	9.57±0.21	4.52±0.26	-4.23±0.24	-5.05±0.33
APALACHICOLA	8.53±0.33	7.10±0.23	6.98±0.33	7.12±0.22	-1.43±0.40	0.13±0.39
PENSACOLA	7.78±0.16	5.84±0.12	7.86±0.32	5.64±0.25	-1.94±0.20	-2.22±0.41
DAUPHIN ISLAND	12±0.16	6.35±0.29	11±0.43	6.01±0.31	-5.66±0.33	-4.98±0.53
GRAND ISLE	12.73±0.19	7.99±0.08	12±0.29	8.26±0.29	-4.73±0.21	-3.74±0.41
GALVESTON II	12.05±0.29	4.43±0.02	12.81±0.45	8.26±0.36	-7.62±0.29	-4.55±0.58
FREEPORT	15.58±0.47	6.96±0.20	12.05±0.39	7.76±0.36	-8.62±0.51	-4.29±0.53
ROCKPORT	6.80±0.0.9	6.11±0.15	8.85±0.44	7.30±0.41	-0.69±0.17	-1.56±0.60

Tableau 7. Comparaison des tendances du niveau marin et des vitesses de déplacement vertical mesurées par EMD et SSA dans différentes stations (mm/an) sur la période 2002-2021.

Selon les estimations présentées dans le Tableau 7, les tendances du niveau marin varient selon les stations, tant pour les données marégraphiques que pour les données altimétriques, ainsi qu'en fonction de la méthode d'analyse appliquée. Les vitesses de déplacement vertical montrent également des différences significatives entre les stations et les méthodes. Les incertitudes associées sont généralement inférieures à 1 mm/an pour la plupart des stations, bien que certaines valeurs (notamment pour SSA) puissent être plus élevées. Les valeurs de déplacement vertical du sol (VLM) obtenues par les méthodes EMD et SSA sont comparables pour la majorité des stations. Les écarts entre les deux méthodes restent généralement inférieurs à 1 mm/an, ce qui indique une bonne concordance des estimations, à l'exception de deux stations : Galveston II et Freeport, où les écarts sont plus prononcés.

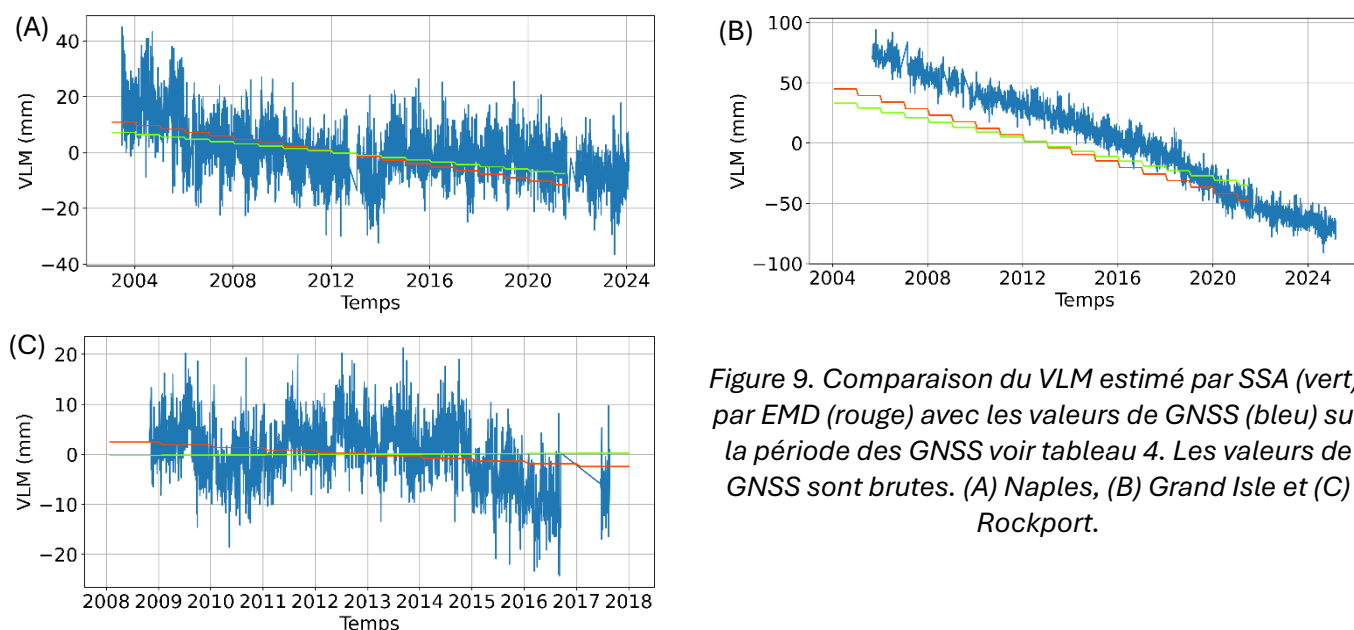


Figure 9. Comparaison du VLM estimé par SSA (vert), par EMD (rouge) avec les valeurs de GNSS (bleu) sur la période des GNSS voir tableau 4. Les valeurs de GNSS sont brutes. (A) Naples, (B) Grand Isle et (C) Rockport.

Dans l'ensemble, la Figure 9 montre que les deux méthodes (SSA et EMD) parviennent à restituer la tendance générale du mouvement vertical observé par GNSS. Toutefois, des écarts sont visibles selon les sites étudiés, ce qui suggère une sensibilité variable des méthodes aux caractéristiques locales des séries temporelles. Il est important de noter que les séries GNSS présentées ici sont des données brutes, qui n'ont pas été retraitées avec la solution ULR8. Cela pourrait en partie expliquer les différences observées entre les tendances estimées et les mesures GNSS. Globalement, malgré ces écarts, les deux méthodes reproduisent correctement la dynamique du signal GNSS, mais la qualité du traitement initial des données GNSS reste un facteur déterminant dans l'interprétation des résultats. Voir ANNEXE 3 :pour les autres stations.

2. Méthode Buble (Buble, Bennett and Hreinsdóttir, 2010) :

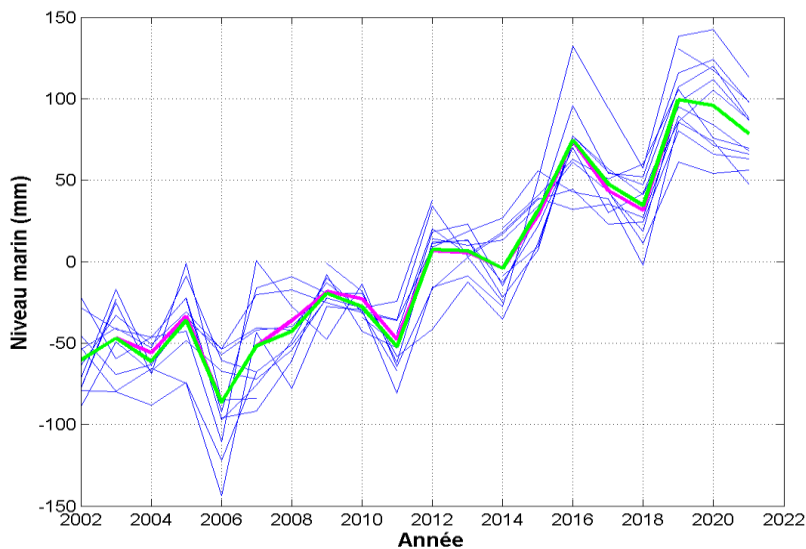


Figure 10. Evolution du niveau marin mesurée dans différentes stations marégraphiques. Les courbes bleues représentent les niveaux individuels par station, la courbe magenta correspond au mode commun selon Buble, et la courbe verte à la moyenne des séries.

Sur la période étudiée, 2002-2021, la Figure 10 met en évidence une tendance générale à la hausse, avec une accélération notable après 2010. Des variations interannuelles sont également visibles, caractérisées par des pics et des creux. Nous voyons une cohérence entre la moyenne des stations (courbe verte) et la moyenne calculée avec la méthode Buble (courbe magenta). Les écarts entre les différentes stations illustrent la variabilité spatiale des variations du niveau de la mer le long de la côte du Golfe de Mexique.

Station	Brute VLM (mm/an)	EMD VLM (mm/an)	SSA VLM (mm/an)	Buble VLM (mm/an)	VLM GNSS (mm/an)
KEY WEST	-3.88±2.01	-4.34±0.27	-4.11±0.40	-1.53	-1.78±0.38
NAPLES	-0.49±1.15	-1.24±0.17	-0.82±0.29	-1.13	-1.87±0.41
FORT MYERS	-0.12±1.23	-2.23±0.24	-0.60±0.31	-1.99	-1.64±0.26
ST. PETERSBURG	3.4±2.1	6±0.33	3.64±0.53	-1.65	-1.82±0.4
CEDAR KEY	-4.62±1.28	-4.23±0.24	-5.05±0.33	0.92	-
APALACHICOLA	-0.88±1.21	-1.43±0.4	0.13±0.39	-0.68	-
PENSACOLA	-3.57±1.45	-2.13±0.17	-2.71±0.43	-0.29	-0.99±0.35
DAUPHIN ISLAND	-1.47±2.5	-4.27±0.19	-2.69±0.67	0.68	-1.95±0.18
GRAND ISLE	-3.72±1.44	-5.42±0.19	-4±0.45	2.90	-7.06±0.22
GALVESTON II	-4.49±1.5	-7.62±0.29	-4.55±0.58	4.11	-4.1±0.37
FREEPORT	-3.01±1.48	-9.11±0.55	-3.34±0.56	-0.16	-1.94±0.34
ROCKPORT	-1.15±2.93	-1.23±0.17	-1.35±1.13	-1.19	-4.28±0.57

Tableau 8. Comparaison des vitesses de déplacement vertical (VLM) selon différentes méthodes d'estimation et mesures GNSS par station (mm/an).

Il est intéressant de comparer les estimations du VLM obtenues ci-dessus avec les mesures de GNSS. D'un côté, Les périodes d'observation de GNSS diffèrent d'une station à l'autre (Tableau 4) et, de l'autre, les tendances du niveau la mer sont fortement non-linéaires. Par conséquent, il est important de comparer les résultats de GNSS avec les différences des tendances linéaires marégraphiques et altimétriques évaluées sur la période d'enregistrement des stations GNSS (Tableau 4).

Le *Tableau 8* présente, pour chaque station, différentes estimations de la vitesse de déplacement vertical (VLM) obtenues par plusieurs méthodes d'analyse (série brute, EMD, SSA, Buble) ainsi que les mesures GNSS lorsqu'elles sont disponibles. Les VLM ont été estimés sur la même période que ceux du GNSS sauf pour Cedar Key et Apalachicola, où les tendances ont été estimés sur la période 2002-2021.

Nous observons que les estimations issues des méthodes avancées (EMD, SSA) sont généralement cohérentes entre elles pour certaines stations, mais peuvent présenter des écarts importants pour d'autres, comme pour St. Petersburg, Galveston et Freeport. Les valeurs obtenues à partir des séries brutes affichent souvent des incertitudes plus élevées. La méthode Buble donne, dans plusieurs cas, des valeurs moins négatives ou même positives, contrastant avec les autres méthodes. Les mesures GNSS, considérées comme une référence indépendante, permettent de situer les estimations issues des différentes méthodes : pour certaines stations, les valeurs obtenues sont proches de la référence GNSS, tandis que pour d'autres, des écarts notables apparaissent, tant en amplitude qu'en signe.

c. Estimation du VLM sur la période 1960-2021 :

1. Méthode directe :

Les mesures altimétriques côtières sont disponibles uniquement pour la période de 2001 à 2021. Nous visons à dissocier les variations du niveau absolu de la mer des mouvements du sol entre 1960 et 2021, en utilisant la méthode des EOFs ainsi que la méthode de Buble. En théorie, les

EOFs dérivées des données altimétriques sont employées afin de décomposer un ensemble de séries marégraphiques filtrées de la variabilité saisonnière et des tendances linéaires associées aux VLM.

Après le filtrage et la détendance des séries marégraphiques et altimétriques, l'analyse par décomposition en modes empiriques (EOF) appliquée aux séries altimétriques indique qu'un seul mode dominant permet d'expliquer la majorité de la variance pour chacun des groupes et les deux techniques. En utilisant ce mode principal, nous projetons ensuite les séries marégraphiques sur l'espace défini par ce mode EOF. Cette méthode permet d'identifier la part de la variabilité marégraphique qui est conforme à la structure spatiale et temporelle dérivée des données altimétriques.

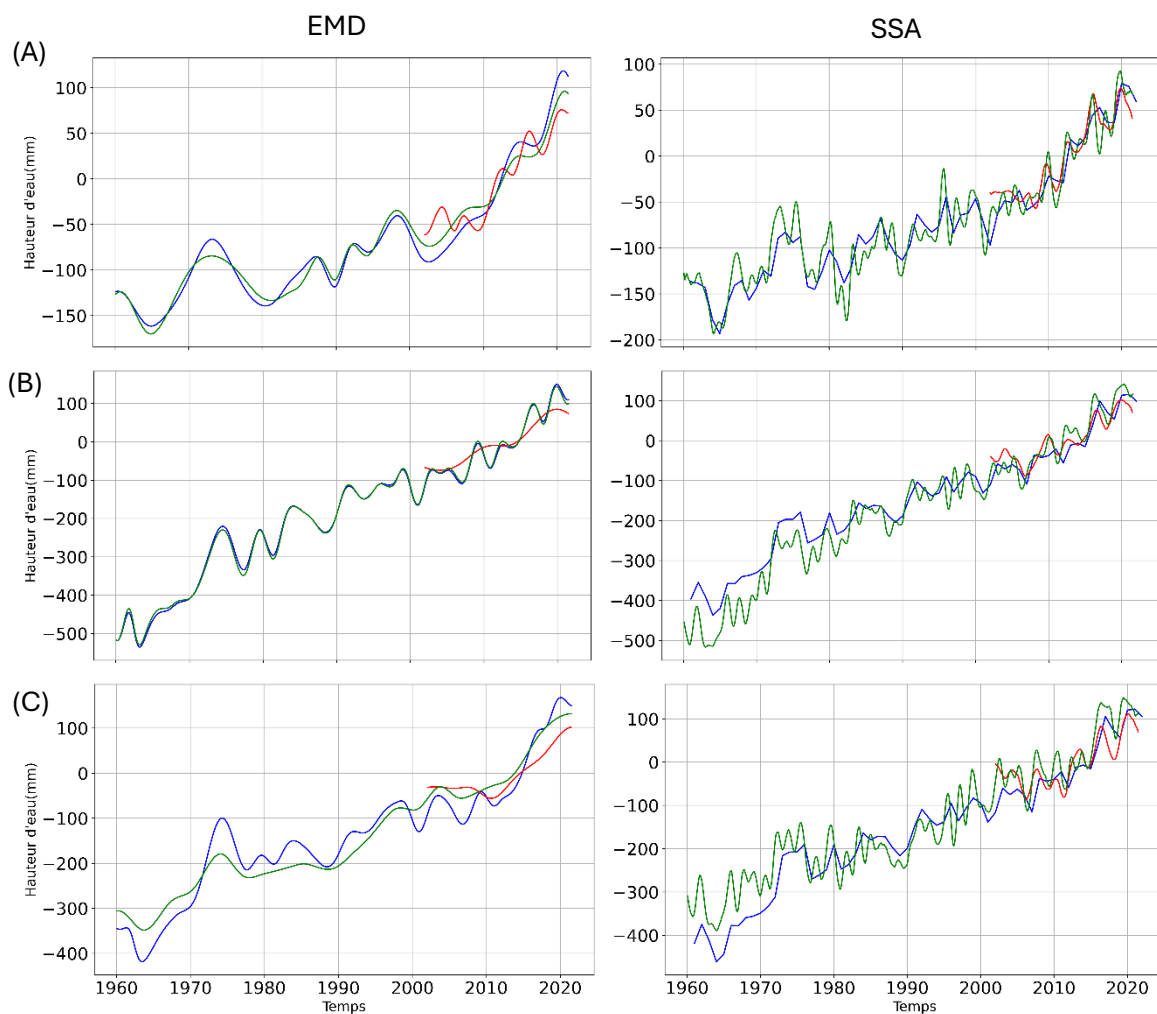


Figure 11. Comparaison des reconstructions historiques du niveau de la mer absolu. Sont représentées la reconstruction issue de la projection des marégraphes sur les EOFs altimétriques (en bleu), les mesures altimétriques corrigées (en rouge), et les séries marégraphiques filtrées (en vert). Les reconstructions sont présentées selon deux méthodes de filtrage : EMD (à gauche) et SSA (à droite). (A) Naples, (B) Grand Isle, (C) Rockport.

Grâce à la Figure 11 nous observons que, quelle que soit la méthode de filtrage, il y a une bonne correspondance générale des tendances entre les courbes sur la période commune. La courbe verte (marégraphe filtré) suit une évolution similaire à celle de la reconstruction (courbe bleue), notamment sur la période altimétrique récente (2002–2021).

La méthode EMD montre une tendance non linéaire du niveau de la mer. Les courbes verte (TG filtré) et bleue (reconstruction) convergent avec les récentes mesures altimétriques rouges, indiquant un renforcement du VLM. À Naples (A), la courbe reste constante et suit la tendance altimétrique de façon cohérente.

La méthode SSA, quant à elle, montre une variabilité interannuelle plus marquée dans les séries. Cela s'explique par le fait que le SSA conserve mieux les signaux périodiques, tandis que l'EMD extrait davantage la tendance de fond.

Maintenant nous pouvons comparer la reconstruction des séries marégraphiques avec les observations des marégraphes filtrées.

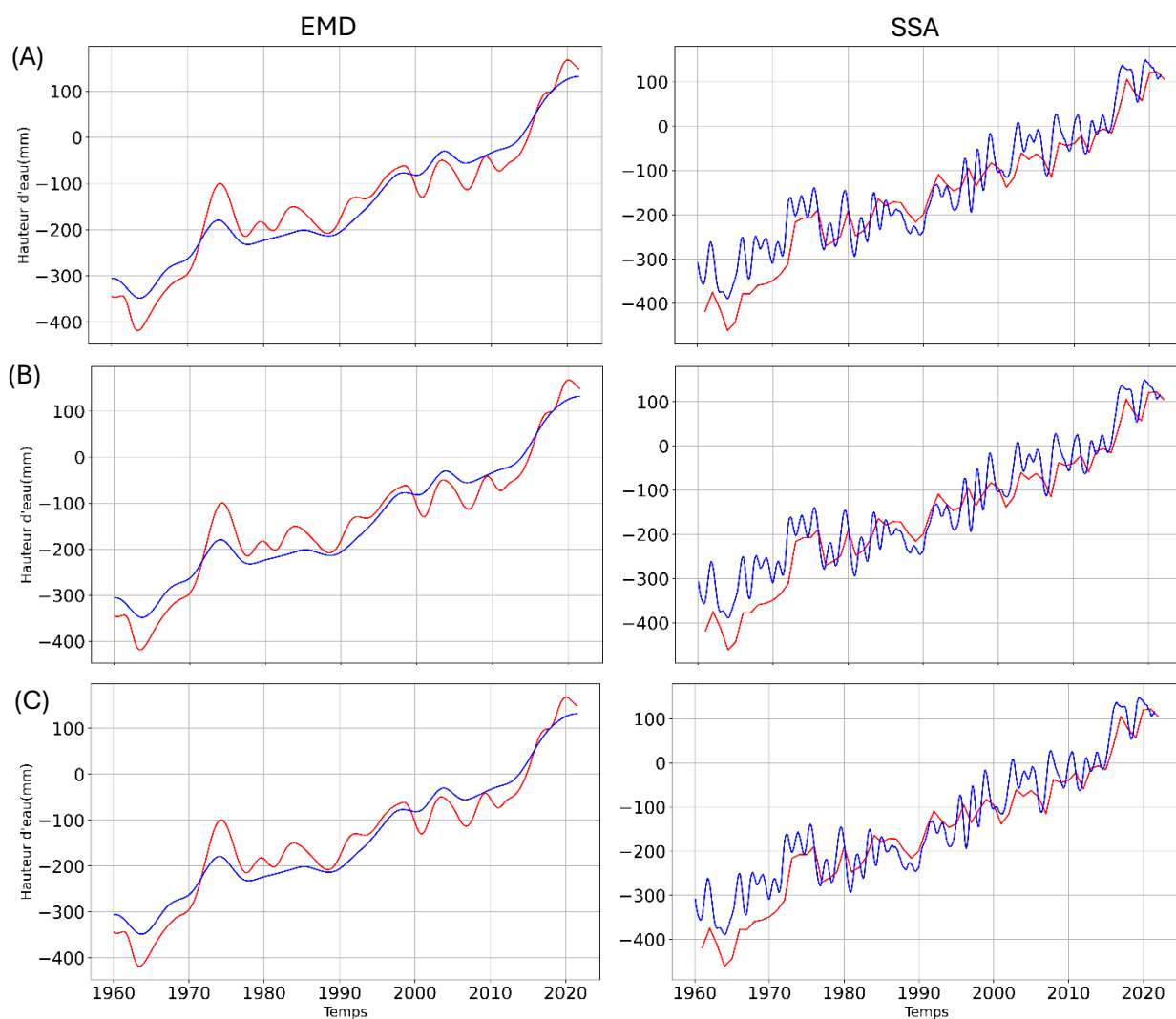


Figure 12. Comparaison des reconstructions historiques du niveau de la mer par filtrage EMD (gauche) et SSA (droite) : marégraphe filtré (bleu) vs marégraphe reconstruit par EOFs altimétriques (rouge). (A) Naples, (B) Grand Isle, (C) Rockport.

Les reconstructions des séries marégraphiques par projection sur les EOFs altimétriques, visibles sur la Figure 12, reproduisent globalement la dynamique observée dans les séries marégraphiques filtrées, quel que soit le type de filtrage appliqué. Les différences résiduelles entre les deux courbes traduisent les écarts entre la dynamique locale captée par le marégraphe et la dynamique spatiale extraite de l'altimétrie. Ces écarts peuvent également varier en fonction du choix du filtrage et de la méthode de reconstruction : le filtrage EMD met l'accent sur la tendance de fond, tandis que le SSA préserve davantage la variabilité naturelle du niveau de la mer. Voir ANNEXE 4 :pour les autres stations.

Station	EMD		SSA		VLM Oelsmann
	VLM (1960-2021)	VLM (1995-2020)	VLM (1960-2021)	VLM (1995-2020)	
KEY WEST	1.19±0.09	-1.81±0.26	0.95±0.18	-1.95±0.58	-1.31±0.50
NAPLES	0.49±0.10	-0.80±0.28	0.68±0.16	-1.57±0.45	-1.73±0.43
FORT MYERS	0.38±0.07	-0.98±0.23	0.65±0.13	-1.52±0.35	-1.17±0.69
ST. PETERSBURG	1.96±0.15	-5.01±0.43	1.48±0.21	-3.41±0.60	-1.40±0.43
CEDAR KEY	0.26±0.09	-1.19±0.28	0.79±0.19	-1.67±0.35	-
APALACHICOLA	0.46±0.11	-1.40±0.17	0.71±0.19	-1.79±0.27	-
PENSACOLA	0.83±0.15	-1.70±0.23	0.95±0.21	-1.82±0.33	-2.26±0.73
DAUPHIN ISLAND	1.36±0.18	-3.74±0.28	1.24±0.27	-4.05±0.44	-2.02±0.84
GRAND ISLE	2.34±0.20	-0.29±0.26	1.21±0.27	-0.79±0.64	-5.34±0.61
GALVESTON II	0.96±0.21	-0.08±0.37	1.81±0.33	-0.36±0.92	-5.13±1.08
FREEPORT	2.39±0.34	-5.48±0.42	0.89±0.36	-4.03±1	1.40±2.89
ROCKPORT	1.97±0.19	-0.56±0.31	2.76±0.34	-0.10±0.99	-4.83±1.10

Tableau 9. Comparaison des vitesses de déplacement vertical (VLM) estimées par polynôme de degré 2 selon différentes méthodes et périodes, avec référence Oelsmann (mm/an).

Le tableau 9 montre que les valeurs de VLM varient en fonction de la période analysée et de la méthode utilisée. Les vitesses de déplacement vertical du sol (VLM) ont été estimées à partir d'un ajustement par polynôme de degré 2 (régression quadratique), et non par une tendance linéaire classique.

Les vitesses de déplacement vertical du sol (VLM) estimées pour la période 1995-2020 par les méthodes EMD et SSA sont comparées avec les VLM calculés dans l'article d'Oelsmann. Nous observons que, pour la majorité des stations, les valeurs issues des méthodes EMD et SSA sont généralement éloignées de la référence, avec des écarts parfois importants en amplitude ou en signe. Par exemple, pour Ket West, la valeur SSA (-1,95 mm/an) et celle obtenue par EMD (-1.81 mm/an) sont proches de la référence (-1,31 mm/an), tandis que pour d'autres stations comme Grand Isle ou Galveston II, les deux méthodes restent très éloignées de la référence.

Sur la période 1960-2021, les deux méthodes fournissent systématiquement des valeurs positives pour toutes les stations, mais l'amplitude varie d'une méthode à l'autre. Par exemple, à Rockport, EMD donne 1,97 mm/an et SSA 2,76 mm/an, tandis qu'à St. Petersburg, EMD donne 1,96 mm/an et SSA 1,48 mm/an.

De manière générale, les VLM estimés sur 1995-2020 sont plus négatifs que ceux de la période 1960-2021, ce qui indique une accélération récente de la subsidence sur plusieurs stations, tendance particulièrement marquée avec la méthode SSA.

2. Méthode Buble (Buble, Bennett and Hreinsdóttir, 2010):

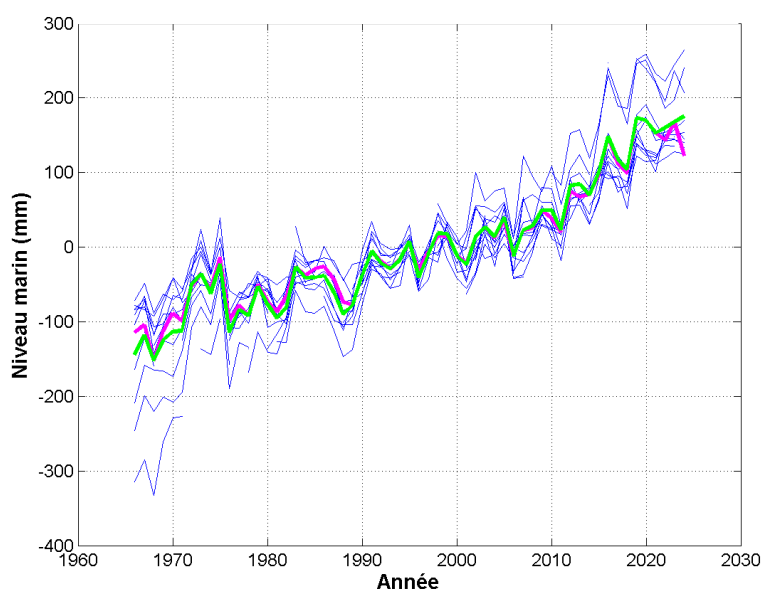


Figure 13. Évolution du niveau marin mesuré dans différentes stations marégraphiques entre 1960 et 2021. Les courbes bleues représentent les niveaux individuels par station, la courbe magenta correspond au mode commun selon Buble, et la courbe verte à la moyenne des séries.

La Figure 13 montre l'évolution du niveau marin mesurées entre 1960 et 2021 dans plusieurs stations marégraphiques. Les courbes bleues représentent les séries individuelles de chaque station, illustrant la variabilité spatiale des observations.

La courbe magenta correspond à la moyenne calculée selon la méthode proposée par (Buble, Bennett and Hreinsdóttir, 2010). Cette moyenne intègre les corrections liées aux mouvements verticaux de la croûte (subsidence ou soulèvement), fournissant ainsi une estimation plus représentative de la composante climatique de l'élévation du niveau marin. La courbe verte représente la moyenne arithmétique globale des niveaux mesurés, sans correction des mouvements verticaux. Ces deux courbes évoluent de façon cohérente.

L'ensemble des données met en évidence une élévation progressive du niveau de la mer depuis 1990, avec une accélération après 2000, en cohérence avec les impacts attendus du réchauffement climatique.

Station	VLM 1960-2021 (mm/an)	VLM 1995-2020 (mm/an)	VLM Oelsmann
KEY WEST	-0.99	-0.56	-1.31±0.50
NAPLES	-1.46	-1.07	-1.73±0.43
FORT MYERS	-0.78	-1.94	-1.17±0.69
ST. PETERSBURG	-0.66	-0.57	-1.40±0.43
CEDAR KEY	-1.23	-1.13	-
APALACHICOLA	-1.77	0.03	-
PENSACOLA	-0.69	-0.17	-2.26±0.73
DAUPHIN ISLAND	-0.83	-1.98	-2.02±0.84
GRAND ISLE	3.57	3.79	-5.34±0.61
GALVESTON II	2.67	3.29	-5.13±1.08
FREEPORT	1.73	0.61	1.40±2.89
ROCKPORT	0.45	-0.92	-4.83±1.10

Tableau 10. Vitesses de déplacement vertical (VLM) estimées par la méthode Buble sur deux périodes, avec comparaison à l'estimation (Oelsmann et al., 2024)(mm/an).

Le tableau 10 montre que les valeurs de VLM varient selon la période considérée et la station. Pour la majorité des stations, les estimations issues des deux périodes sont similaires, bien que des divergences puissent apparaître, notamment pour certaines stations où le signe ou l'amplitude diffère.

Une comparaison avec le tableau 9 révèle que les tendances VLM obtenues par la méthode Buble ont des écarts importants avec celles issues des autres méthodes selon la période et la station. La méthode Buble reste en général plus stable et plus cohérente avec les résultats d'analyse (Oelsmann *et al.*, 2024), tandis que les méthodes EMD et SSA montrent une forte sensibilité à la période et à la dynamique non linéaire du signal.

III. Discussion :

Les résultats obtenus dans cette étude confirment la pertinence de la combinaison des données marégraphiques, altimétriques et GNSS pour l'estimation du mouvement vertical du sol (VLM) sur les côtes du Golfe du Mexique

Les premières analyses ont révélé une bonne concordance entre les marégraphes et les données altimétriques sur la période 2002-2021, notamment après l'application de filtres adaptatifs tels que EMD et SSA. Les corrélations obtenues dépassent 90 % dans la majorité des cas (Tableau 6). Ces résultats confirment que les séries altimétriques retraitées peuvent être utilisées en complément des marégraphes pour reconstruire des signaux représentatifs du niveau de la mer dans la zone côtière, malgré les limites liées à la proximité des côtes. Les enregistrements marégraphiques et altimétriques montrent tous deux une tendance fortement non linéaire de l'élévation du niveau de la mer dans le Golfe du Mexique, avec une accélération significative à partir d'environ 2010.

Les estimations du VLM obtenues par la méthode directe (différence entre les tendances marégraphiques et altimétriques filtrées) sont généralement cohérentes avec les données GNSS, ce qui confirme les conclusions de (Wöppelmann and Marcos, 2016) sur la validité de cette approche pour quantifier le VLM. Des écarts apparaissent néanmoins pour certaines stations comme Galveston II ou Freeport, ce qui peut s'expliquer par des phénomènes locaux, comme le soulignaient déjà (Letetrel *et al.*, 2015) à propos de la subsidence induite par les activités humaines dans cette région.

La projection des séries marégraphiques sur les EOFs issus de l'altimétrie a permis d'estimer l'évolution du niveau de la mer absolu sur la période 1960–2021. Les reconstructions réalisées restituent correctement la variabilité observée, et mettent en évidence une évolution non linéaire du niveau de la mer absolu, avec une accélération notable au cours des dernières décennies, en particulier dans certaines stations comme Grand Isle ou Rockport. Cette dynamique contraste avec les résultats de (Oelsmann *et al.*, 2024), qui présentent des tendances linéaires sur des périodes similaires. Cette divergence peut être liée aux méthodes de filtrage utilisées (EMD ou SSA), aux spécificités locales du Golfe du Mexique en matière de subsidence, ou encore au choix des périodes d'analyse. Ainsi, bien que la méthodologie soit conceptuellement proche, les résultats de cette étude soulignent la pertinence d'un modèle évolutif du VLM plutôt qu'une tendance constante dans le temps.

En complément, la méthode de Buble a permis d'identifier une tendance régionale moyenne du niveau marin et d'estimer le VLM relatif de chaque station sans recourir à l'altimétrie ni au GNSS. Les résultats obtenus sont cohérents avec les autres méthodes pour les stations stables, mais affichent des divergences plus marquées dans les zones où la dynamique verticale est forte (ex.

Grand Isle). Ces écarts illustrent les limites de l'hypothèse d'homogénéité régionale sur laquelle repose cette méthode (Buble, Bennett and Hreinsdóttir, 2010), en particulier dans les environnements soumis à de fortes pressions anthropiques ou à une activité géodynamique locale.

IV. Conclusion :

Cette étude avait pour objectif d'estimer le mouvement vertical du sol (VLM) sur les côtes du Golfe du Mexique en combinant différentes sources de données (marégraphes, altimétrie satellitaire, GNSS) et en appliquant plusieurs méthodes de traitement et de reconstruction. Les résultats obtenus montrent que, pour la période récente, les estimations de VLM issues de la combinaison marégraphes-altimétrie sont globalement cohérentes avec les mesures GNSS, confirmant la validité de cette approche pour le suivi du VLM dans les zones peu instrumentées.

L'analyse sur la période 1960–2021, basée sur la projection des marégraphes sur les modes EOFs de l'altimétrie, révèle une évolution non linéaire du niveau de la mer absolu, avec une accélération marquée à partir des années 1990 dans certaines stations. La méthode régionale inspirée de Buble et al. (2010) complète ces résultats, tout en illustrant ses limites dans les environnements à forte dynamique verticale.

En réponse à la question posée en introduction, il apparaît donc possible d'estimer de manière fiable le VLM à partir de la combinaison des données marégraphiques et altimétriques, en particulier sur la période récente, et de prolonger cette estimation sur le long terme grâce aux méthodes de reconstruction. Cette démarche intégrée constitue un atout pour la surveillance des zones côtières vulnérables et l'anticipation des impacts du changement climatique.

Pour aller plus loin, l'intégration de nouvelles sources de données et le développement de méthodes de traitement plus robustes permettront d'affiner la compréhension des dynamiques verticales et d'améliorer la gestion des risques côtiers à l'échelle régionale et globale.

V. Bibliographie :

- Birol, F. *et al.* (2017a) 'Coastal applications from nadir altimetry: Example of the X-TRACK regional products', *Advances in Space Research*, 59(4), pp. 936–953. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.005>.
- Birol, F. *et al.* (2017b) 'Coastal applications from nadir altimetry: Example of the X-TRACK regional products', *Advances in Space Research*, 59(4), pp. 936–953. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.005>.
- Birol, F. *et al.* (2021) 'The X-TRACK/ALES multi-mission processing system: New advances in altimetry towards the coast', *Advances in Space Research*, 67(8), pp. 2398–2415. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.049>.
- Boesch, D.F. *et al.* (1994) 'Scientific Assessment of Coastal Wetland Loss, Restoration and Management in Louisiana', *Journal of Coastal Research*, pp. i–103.
- Buble, G., Bennett, R.A. and Hreinsdóttir, S. (2010) 'Tide gauge and GPS measurements of crustal motion and sea level rise along the eastern margin of Adria', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B2). Available at: <https://doi.org/10.1029/2008JB006155>.
- Cazenave, A. *et al.* (2022) 'Sea level along the world's coastlines can be measured by a network of virtual altimetry stations', *Communications Earth & Environment*, 3(1), p. 117. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00448-z>.
- Cipollini, P. *et al.* (2017) 'Satellite altimetry in coastal regions', in *Satellite altimetry over oceans and land surfaces*. CRC Press, pp. 343–380.
- CTOH (2023) 'X-TRACK-L2P Coastal along-track sea level anomalies: version 2022'. CNES. Available at: <https://doi.org/10.24400/527896/A01-2022.020>.
- Davis, R.A. (2011) *Sea-level Change in the Gulf of Mexico*. Texas A&M University Press.
- Flandrin, P. and Gonçalves, P. (2003) 'Sur la décomposition modale empirique', *Proc. Coll. GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images*, 1, pp. 149–152.
- Hassani, H. (2010) 'A brief introduction to singular spectrum analysis', *Optimal decisions in statistics and data analysis* [Preprint].
- Holgate, S.J. *et al.* (2012) 'New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level', *Journal of Coastal Research*, 29(3), pp. 493–504. Available at: <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1>.
- Leclercq, L. *et al.* (2025) 'Coastal sea level rise at altimetry-based virtual stations in the Gulf of Mexico', *Advances in Space Research*, 75(2), pp. 1636–1652. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.069>.
- Letetrel, C. *et al.* (2015) 'Estimation of vertical land movement rates along the coasts of the Gulf of Mexico over the past decades', *Continental Shelf Research*, 111, pp. 42–51. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.018>.
- Li, X., Han, G. and Yang, J. (2023) 'Chapter 9 - Application of satellite altimetry for storm surge research and simulations along the coast of China', in S. Vignudelli and N.H. Idris (eds) *Coastal*

Altimetry. Elsevier, pp. 159–175. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91708-7.00010-9>.

Oelsmann, J. *et al.* (2024) ‘Regional variations in relative sea-level changes influenced by nonlinear vertical land motion’, *Nature Geoscience*, 17(2), pp. 137–144. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01357-2>.

Passaro, M. *et al.* (2014) ‘ALES: A multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry’, *Remote Sensing of Environment*, 145, pp. 173–189. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.008>.

Santamaría-Gómez, A. *et al.* (2025) ‘Monitoring the Earth’s deformation with the SPOTGINS series’, *Earth System Science Data Discussions*, 2025, pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-2025-223>.

Schmitz, W.J., Jr. *et al.* (2005) ‘A synopsis of the circulation in the Gulf Of Mexico and on its continental margins’, *Geophysical Monograph Series*, 161, pp. 11–29. Available at: <https://doi.org/10.1029/161GM03>.

The Climate Change Initiative Coastal Sea Level Team *et al.* (2020) ‘Coastal sea level anomalies and associated trends from Jason satellite altimetry over 2002–2018’, *Scientific Data*, 7(1), p. 357. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00694-w>.

Vignudelli, S. *et al.* (2019) ‘Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone’, *Surveys in Geophysics*, 40(6), pp. 1319–1349. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09569-1>.

Wöppelmann, G. and Marcos, M. (2016) ‘Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability’, *Reviews of Geophysics*, 54(1), pp. 64–92. Available at: <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>.

VI. Annexe :

a. ANNEXE 1 :

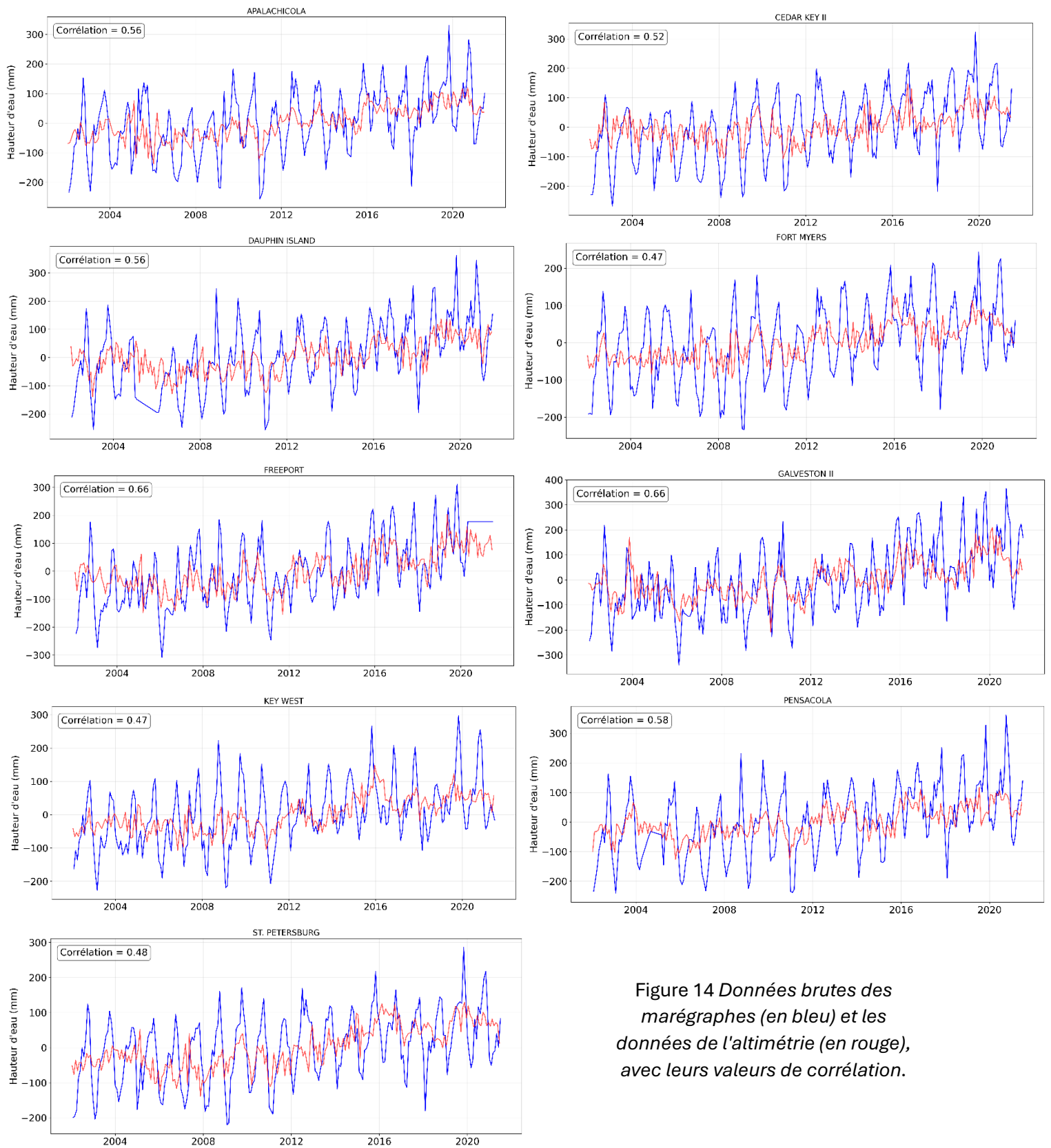


Figure 14 *Données brutes des marégraphes (en bleu) et les données de l'altimétrie (en rouge), avec leurs valeurs de corrélation.*

b. ANNEXE 2 :

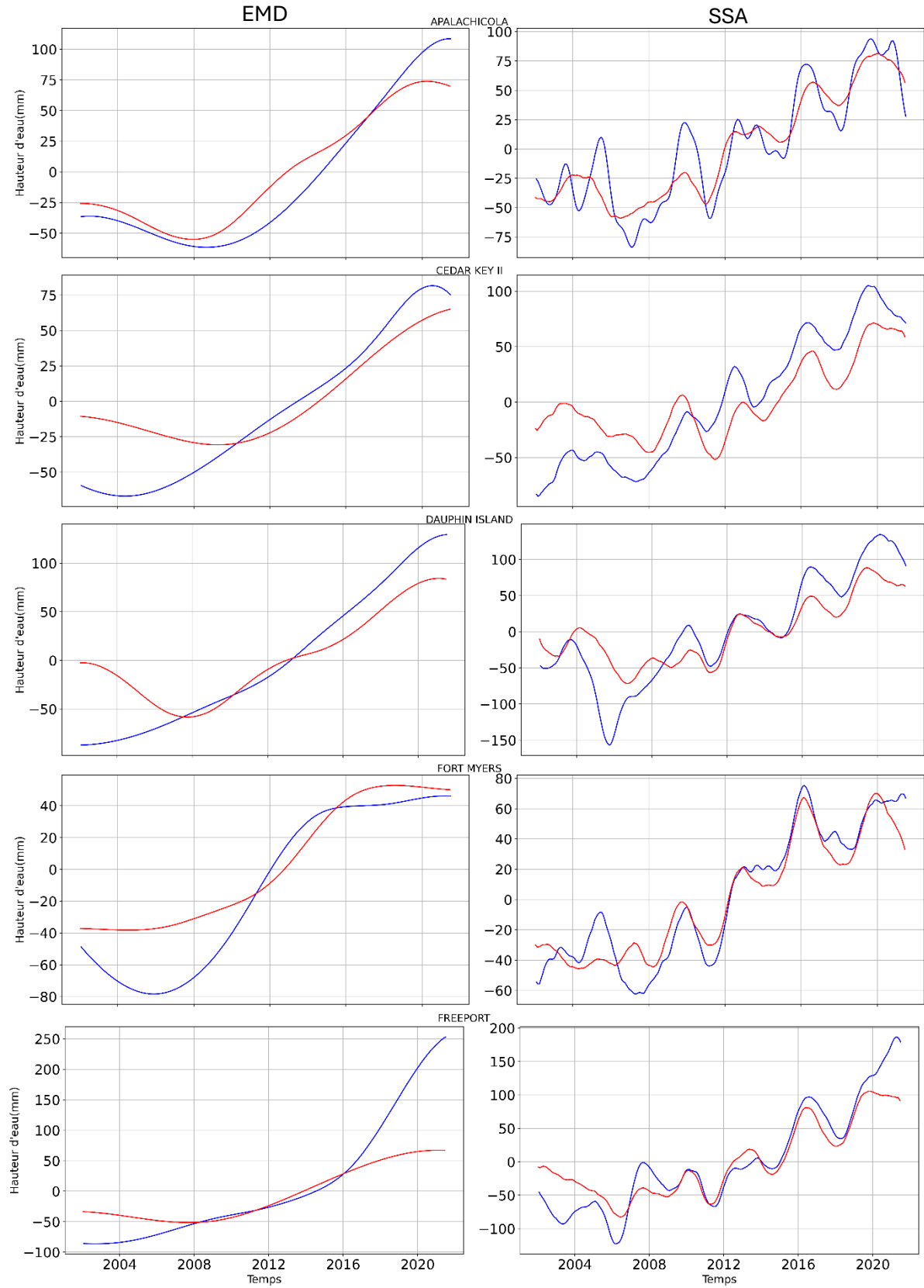


Figure 15. Comparaison EMD vs. SSA : Graphiques de gauche filtrés par EMD, de droite par SSA. Bleu pour marégraphes, rouge pour séries altimétriques.

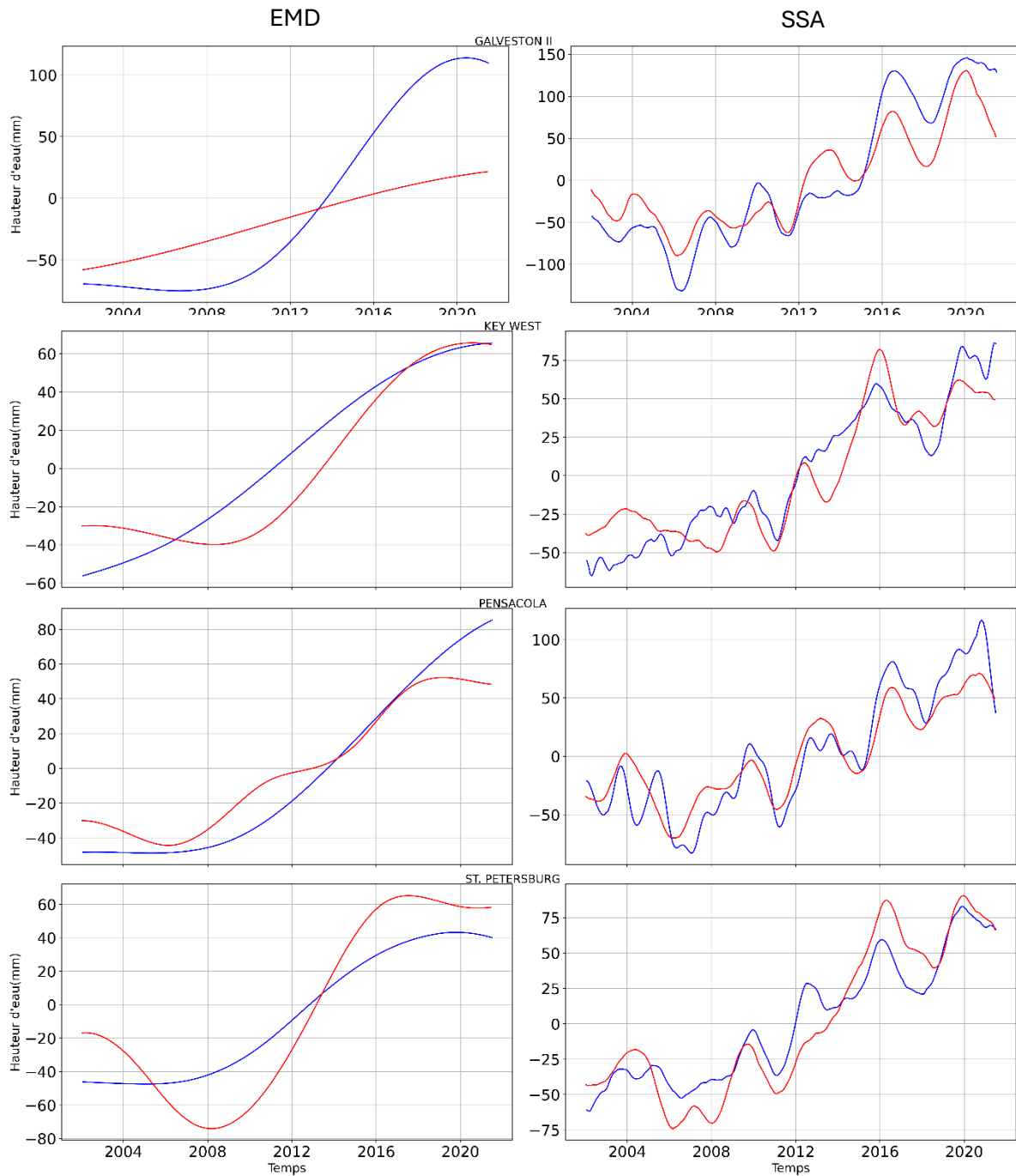


Figure 16. Comparaison EMD vs. SSA : Graphiques de gauche filtrés par EMD, de droite par SSA. Bleu pour marégraphes, rouge pour séries altimétriques.

c. ANNEXE 3 :

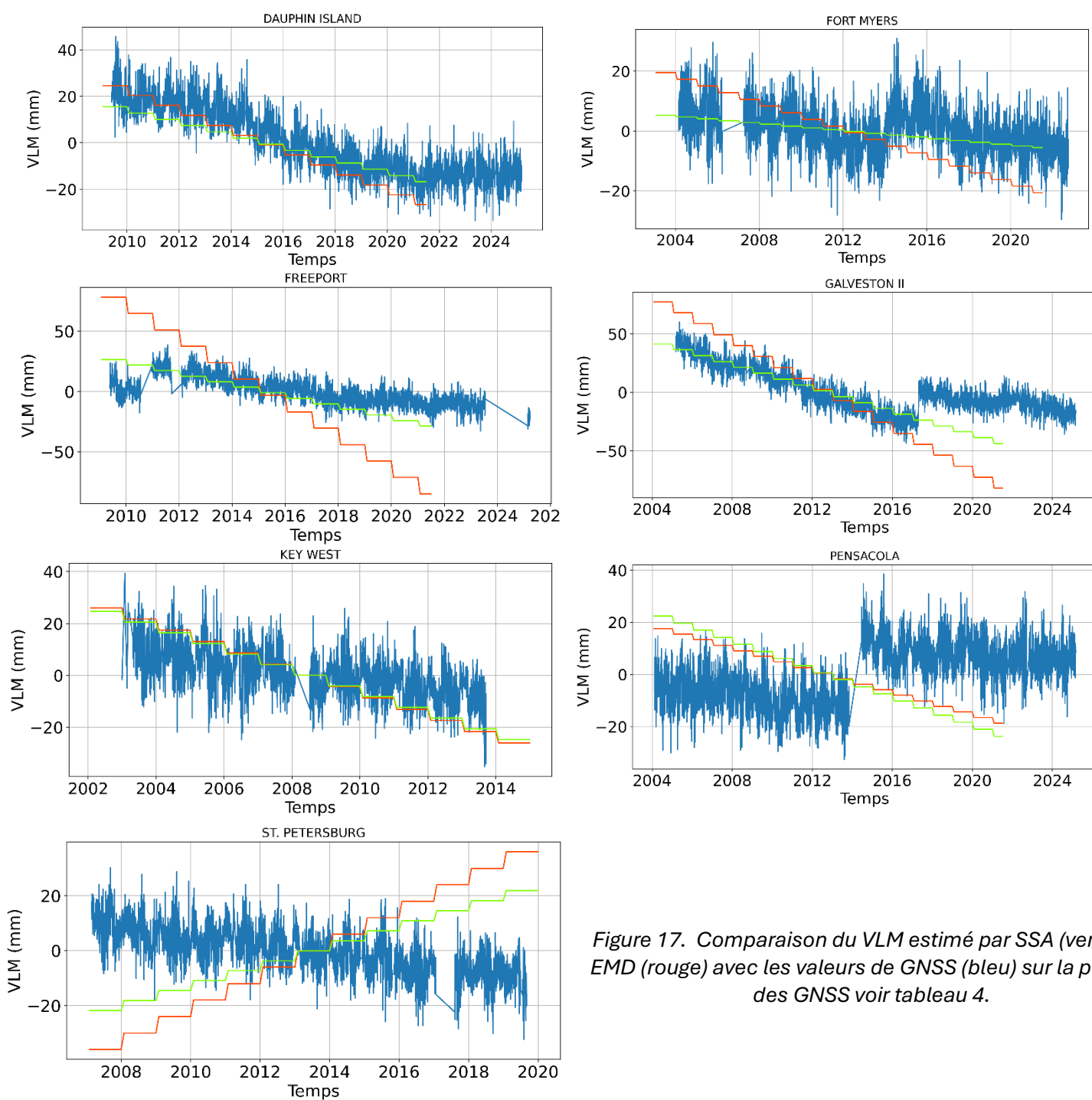


Figure 17. Comparaison du VLM estimé par SSA (vert), par EMD (rouge) avec les valeurs de GNSS (bleu) sur la période des GNSS voir tableau 4.

d. ANNEXE 4 :

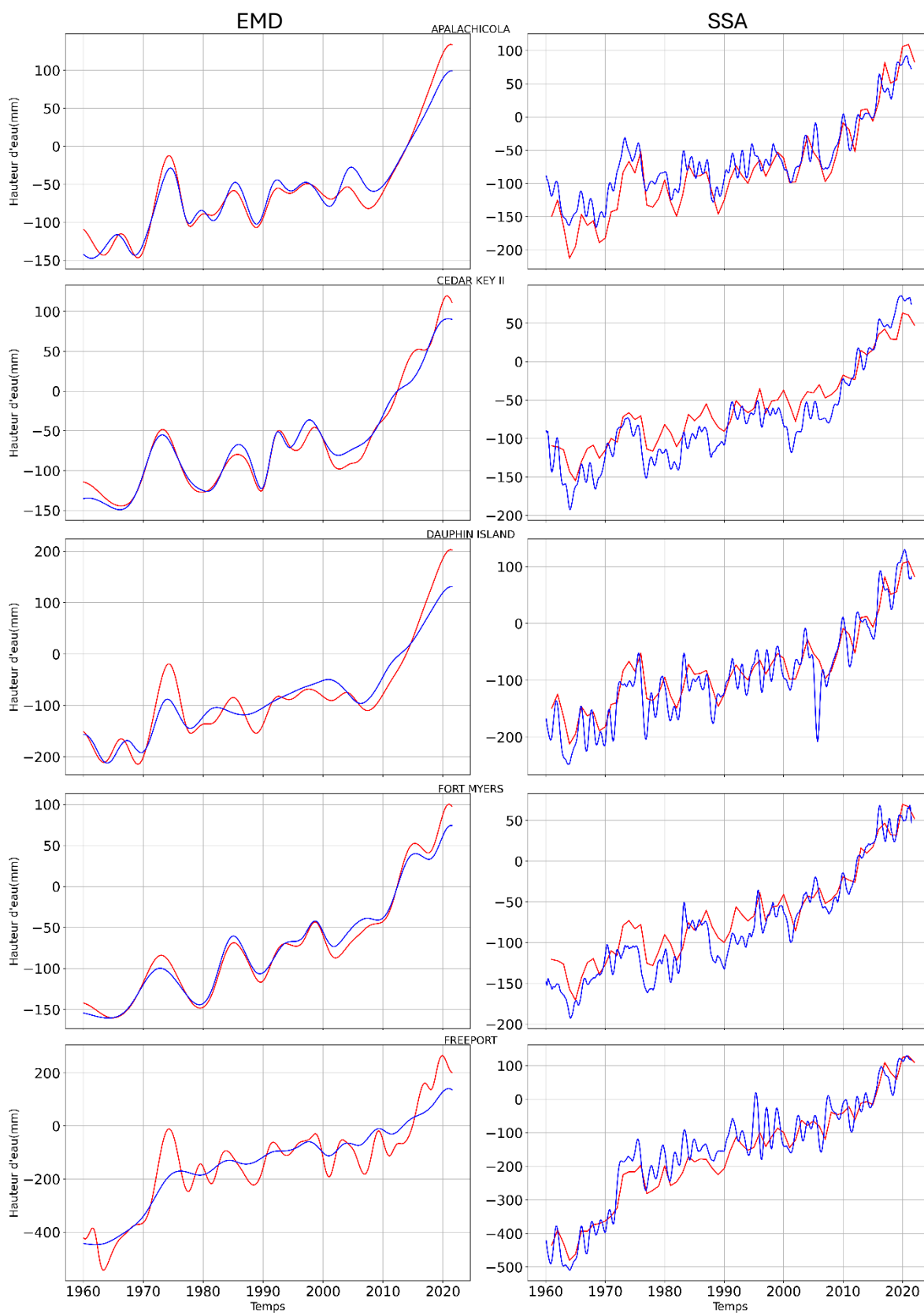


Figure 18. Comparaison des reconstructions historiques du niveau de la mer par filtrage EMD (gauche) et SSA (droite) : marégraphe filtré (bleu) vs marégraphe reconstruit par EOFs altimétriques (rouge).

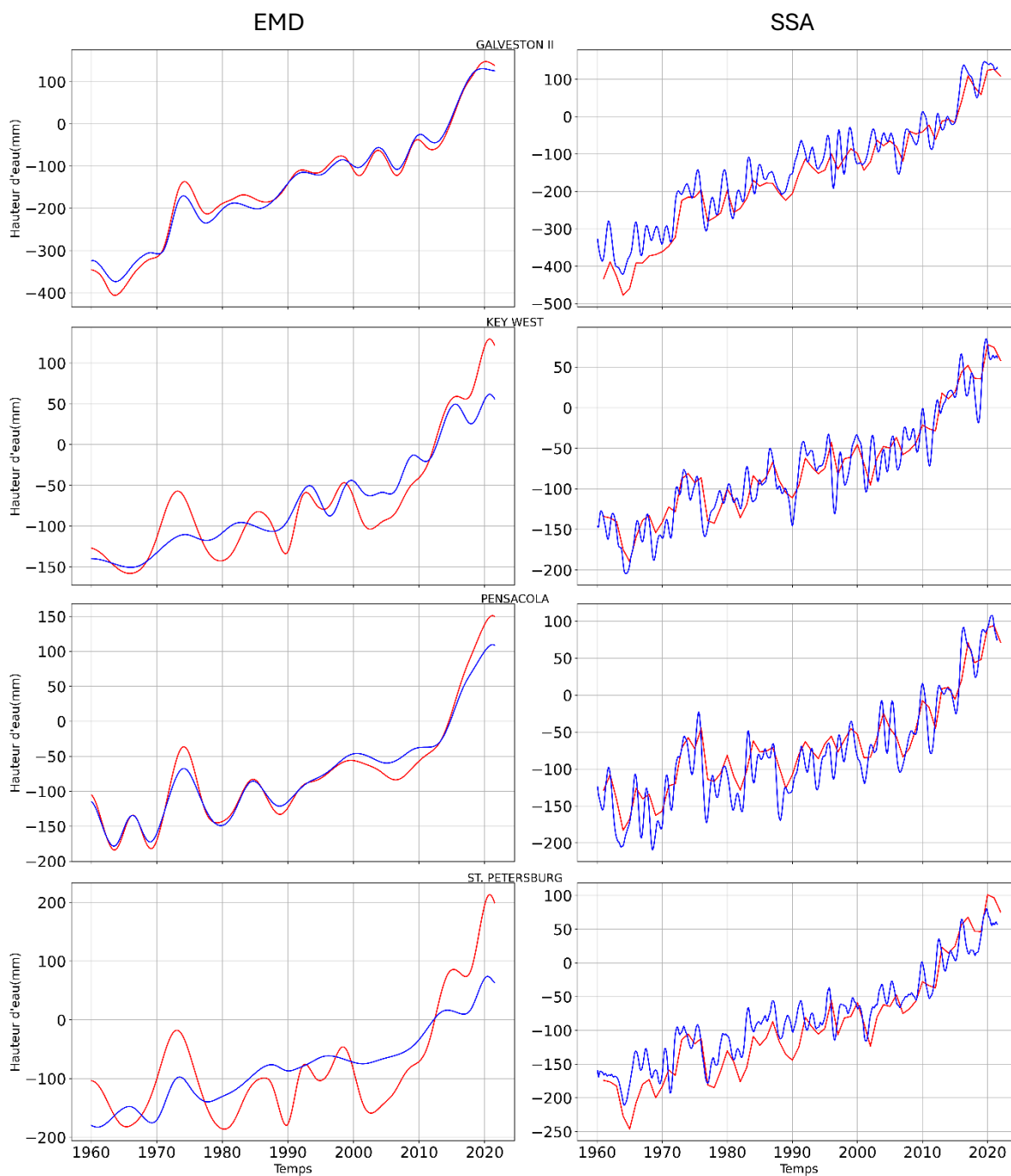


Figure 19. Comparaison des reconstructions historiques du niveau de la mer par filtrage EMD (gauche) et SSA (droite) : marégraphe filtré (bleu) vs marégraphe reconstruit par EOFs altimétriques (rouge).