

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



U.F.R Sciences et Technologies

Département de physique

Mémoire de Master 2

Mention Physique et Applications

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

Étude de la distribution régionale du niveau de la mer

Présenté par : **Thierno A. Diallo**

Sous la direction de Dr Habib Boubacar DIENG et sous la supervision de Pr Bamol Ali SOW

Soutenu publiquement le 24/07/2023 à l'UASZ devant le jury composé de

Prénoms et Noms	Grades	Qualité	Etablissement
Samo DIATTA	Maître de conférences	Président	UFR-ST/UASZ
Ibrahima CAMARA	Chercheur	Rapporteur	LPAO/UCAD
Mamadou Lamine MBAYE	Maître-Assistant	Examineur	UFR-ST/UASZ
Joseph Sambasene DIATTA	Maître-Assistant	Examineur	UFR-ST/UASZ
Habib Boubacar DIENG	Assistant	Directeur de Stage	UFR-ST/UASZ
Bamol Ali SOW	Maître de Conférences	Superviseur de stage	UFR-ST/UASZ

Stage préparé au Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat



Remerciements

Par ce que tout se passe beaucoup mieux quand on est bien entouré, voici venu le moment de remercier ceux qui, de près ou de loin, m'ont permis de mener à bien ce Mémoire.

J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur de mémoire Dr Habib Boubacar DIENG, qui m'a initié et transmis une large connaissance dans le domaine de l'océanographie physique et spatiale. Je vous suis très reconnaissant pour tout ce que j'ai pu apprendre à vos côtés, tant sur le plan professionnel que personnel, et pour les nombreux échanges constructifs que nous avons eu et qui m'ont permis d'avancer au fur et à mesure. Merci également pour votre disponibilité, votre détermination, votre générosité, votre écoute ainsi que pour vos compétences scientifiques.

Je souhaite remercier aussi mon superviseur scientifique Pr Bamol Ali Sow pour ces conseils scientifiques très pertinents tout au long de ce stage. Ses nombreux conseils durant le stage, sa démarche, son ouverture d'esprit et son enthousiasme m'ont permis de progresser.

Enfin je remercie vivement les membres de mon jury (Dr Samo DIATTA, Dr Ibrahima CAMARA, Dr Mamadou lamine MBAYE et Dr Joseph DIATTA) pour l'intérêt qu'ils accordent à ce travail. Je remercie les enseignants chercheurs du département de Physique et plus particulièrement ceux de la formation sciences de l'atmosphère et de l'océan. Mes remerciements vont également à ma famille et à mes amis, en particulier à ma mère, mon père, ma tutrice et mes frères et sœurs pour leur aide et leur soutien à tous les instants. Un grand merci aux membres du laboratoire LOSEC particulièrement à mes camarades de promotion. Ainsi, je remercie toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce travail.

Dédicaces

A MA FAMILLE : Papa Hassimiou, Maman Mariama et RAMATOULAYE, Gueladio, shérif et Thiaroye.

Vous avez toujours offert soutien et réconfort, j'exprime envers vous une profonde admiration, reconnaissance et attachement inconditionnels. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

A MON AMI ET FRÈRE : DAOUDA THIAM.

En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je te dédie ce travail et je prie pour que le paradis soit ta demeure éternelle.

Résumé

L'élévation du niveau global et régional des océans représente une des conséquences du réchauffement climatique. Cette hausse entraîne une certaine conséquence néfaste pour les populations vivant près des côtes. L'objectif de notre étude est d'évaluer les variations régionales du niveau de la mer en termes de variabilités interannuelles et de tendances en lien avec la dynamique océanique régionale. Pour cela nous avons étudié l'évolution du niveau de la mer par bande de latitude de 30 degrés entre 90°N et 90°S à l'échelle globale et dans les différents bassins océaniques (Pacifique, Atlantique et Indien).

Les résultats obtenus montrent de fortes fluctuations interannuelles du niveau de la mer dans les régions polaires (60°N-90°N et 60°S-90°S) sur la période altimétrique 1993-2018 et qui peuvent être dues à la forte turbulence océanique liée aux vents forts notés dans ces zones. Cela montre que la dynamique océanique non permanente peut fortement influencer sur la variabilité interannuelle du niveau de la mer. Contrairement aux zones polaires, nous avons montré que les zones subtropicales (30°N-60°N et 30°S-60°S) et intertropicales (0°-30°N et 0°-30°S) présentent des fluctuations interannuelles moins marquées et qui peuvent être liées à la dynamique permanente de l'océan largement pilotée par les courants géostrophiques. Lorsqu'on a comparé la variabilité interannuelle du niveau de la mer dans les trois bassins océaniques (Pacifique, Atlantique et Indien), notre étude a mis en évidence de fortes fluctuations dans le bassin Pacifique et Indien contrairement au bassin Atlantique qui présente des fluctuations faibles du même ordre de grandeur que le Global Mean Sea Level (GMSL).

En termes de tendances, notre étude par bandes de latitudes a montré une augmentation d'environ 0.15mm/an de la tendance du niveau de la mer en allant vers le sud entre 60°N et 60°S. Nous avons aussi montré que la tendance du niveau de la mer dans l'océan pacifique (avec $3,5 \pm 0,12$ mm/an) est plus importante et supérieure à celle globale (GMSL qui est 3,4). Les océans Atlantique et Indien donnent des tendances du niveau de la mer, respectivement $3,05 \pm 0,05$ mm/an et $3,1 \pm 0,01$ mm/an) nettement inférieure à celle du GMSL.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux variations du niveau de la mer dans le bassin atlantique par bandes de longitudes pour vérifier les éventuelles différences de tendances et de variabilités interannuelles entre l'Est et l'Ouest du bassin. Nos résultats ont montré une diminution de la variabilité interannuelle du niveau de la mer par bandes de longitudes en allant vers l'Ouest du bassin et une uniformité des tendances du niveau de la mer dans les différentes bandes longitudinales.

Mots clés : variations régionales du niveau de la mer, tendances du niveau de la mer, variabilités interannuelles du niveau de la mer, bassins océaniques.

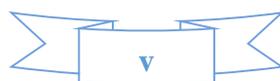
Abstract

The rise in the global and regional level of the oceans is one of the consequences of global warming. This increase has some negative consequences for populations living near the coast. The objectives of our study is to assess regional variations in sea level in terms of interannual variability and trends related to regional ocean dynamics. For this we studied the evolution of sea level by latitude band of 30 degrees between 90N and 90S on a global scale and in the different ocean basins (Pacific, Atlantic and Indian). The results obtained show strong interannual variability in sea level in the polar regions (60°N - 90°N and 60°S - 90°S) over the altimetric period 1993-2018 and which may be due to the strong turbulence oceanic linked to the strong winds noted in these areas. This shows that non-permanent ocean dynamics can strongly influence the interannual variability of sea level. Unlike the polar zones, we showed that the subtropical zones (30°N - 60°N and 30°S - 60°S) and equatorial (0° - 30°N and 0° - 30°S) show less marked interannual fluctuations which can be linked to the permanent dynamics of the ocean largely driven by geostrophic currents. When we compared the interannual variability of sea level in the three ocean basins (Pacific, Atlantic and Indian), our study highlighted strong fluctuations in the Pacific and Indian basin unlike the Atlantic basin which presents weak fluctuations, of the same order of magnitude as GMSL.

In terms of trends, our study by latitude band showed an increase of about 0.15mm/year in the sea level trend going south between 60°N and 60°S . We have also shown that the sea level trend in the Pacific Ocean (with 3.5 ± 0.12 mm/year) is greater and higher than the global ones (GMSL which is 3.4). The Atlantic and Indian oceans give sea level trends (3.05 ± 0.05 mm/year and 3.1 ± 0.01 mm/year respectively) significantly lower than that of the GMSL.

We then looked at variations in sea level in the Atlantic basin by longitude band to verify any differences in trends and interannual variability between the east and west of the basin. Our results showed a decrease in the interannual variability of sea level by longitude bands going west of the Atlantic basin and a uniformity of sea level trends in the different longitudinal bands.

Key words: regional, sea level, variations, trends, variability, ocean and basins.



Listes des figures

- Figure 1-1 : Répartition des marégraphes à travers le monde Source: Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL). 6
- Figure 1-2 : Principe de la mesure altimétrique du niveau de la mer Source: CNES 8
- Figure 2-1 : Carte des différentes bassins de la zone d'études 176
- Figure 2-2 : Les différents missions altimétrie spatiale depuis 1991(source : (Dieng, 2017) 187
- Figure 2-3 : Evolution temporelle du niveau moyen global de la mer estimée à partir des données de satellites altimétrique de produits CMEMS/DT2018: en bleu (SSH brut) et en rouge (SSH lissée). 168
- Figure 2.4 Bassins océaniques en lien avec les courants (source Open Univ, 1989)....18
- Figure 3.1.a : *Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement entre [90°N-60°N], [60°N-30°N], [0-30°N],[0-30°S], [30°S-60°S] et [60°S-90°S].* 22
- Figure 3.1.b : Tendances du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques CMEMS/DT2018 sur la période 1993-2019 en fonction des bandes latitudinales. Les lettres A, B, C, D, E et F représentent respectivement [90°N-60°N], [60°N-30°N], [30°N-0°N], [0°S-30°S], [30°S-60°S] et [60°S-90°S]. 25
- Figure 3.2.a : *Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans les Bassins : a)Pacifique, b) Indien et c)Atlantique comparé chacune à l'échelle globale (courbe bleu). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois mois.....* 27
- Figure 3.2.b : *Tendances du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques sur la période 1993-2019 en fonction des bassins océanique. Les lettres A, B et C représentent respectivement le Pacifique, l'Atlantique et l'Indien comparées à la tendance global.* 29

- Figure 3-3 : *Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans les blocs a) [0° 20°E], b) [0° 20°W], c) [20°W 40°W] et d) [40°W 70°W] sur le bassin Atlantique..... 31*

Listes des Tableaux

Tableau 2 -1 zones géographiques des différents bassins océaniques	15
<i>Tableau 3 -1 Les tendances moyennes et erreurs de calculs de tendances des différents bassins.</i>	
.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3-2 <i>Tendances et Erreurs de calculs du niveau de la mer en mm/an sur les</i>	
<i>différentes zones longitudinales dans le bassin atlantique</i>	30

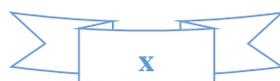
Acronymes

- CLS : Collecte Localisation Satellites
- CMEMS : Copernicus Marine Environment Monitorin Service
- CNES : Centre National d'Etudes Spatiales
- DORIS : Détermination d'Orbite et de Radio-Positionnement Intégrés par Satellite
- DT : Dynamique Topographique
- ENSO : EL Niño Southern Oscillation
- GMSL : Global Mean Sea Level
- GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- GPS : Global Positioning System
- NASA : National Aeronautics and Space Administration
- OMM : Organisation Météorologique Mondiale
- PSMSL : Permanent Service for Mean Sea Level
- PSU : Pratical Salinity Unit
- SSH : Sea Surface height
- SST : Sea Surface Temperature
- ZCIT : (Zone de Convergence InterTropicale)

Table des matières

Remerciements	ii
Dédicaces	iii
Résumé	v
Abstract	vi
Acronymes	vii
Liste des figures	viii
Introduction	1
Chapitre 1 : Généralités sur les variations du niveau de la mer	3
1. Les variations passées du niveau de la mer	3
1.1 Sur des temps géologiques	3
1.2 Du dernier maximum glaciaire aux premières mesures Marégraphiques	4
2. Les variations du niveau de la mer : la période post-industrielle	4
2.1 Les marégraphes (~1750 - présent)	4
2.2 L'altimétrie spatiale (~1990-présent)	6
3. Les causes des variations actuelles du niveau de la mer	8
3.1 A l'échelle globale	8
3.2 Echelle régionale et locale	11
4. Les conséquences prévisibles de la remontée du niveau marin	12
Chapitre 2 : Domaine d'études, données et méthodes utilisées	14
1. Présentation de la zone d'étude	14
2. La description des différentes données et traitements utilisés	16
2.1 La description des données	16
2.2 Traitements utilisés	18
Chapitre 3 : Résultats et discussions	21

3.1 Variations du niveau de la mer par bandes latitudinales	21
3.1.a Comparaison en terme de variabilités interannuelles.....	21
3.1.b Comparaison en termes de tendances du niveau de la mer.....	24
3.2 Variation du niveau de la mer sur les trois grands bassins océaniques.	25
3.2.a Comparaison en termes de variabilités interannuelles.....	25
3.2.b Comparaison en termes de tendance du niveau de la mer.	28
3.3 Variations du niveau de la mer dans le bassin Atlantique par bandes longitudinales.	29
3.3.a Comparaison en termes de variabilités interannuelles	29
3.3.b Comparaison en termes de tendances du niveau de la mer.....	30
Conclusion Général et perspectives	32
Bibliographie	34



Introduction

Au cours de l'histoire de la Terre, le niveau de la mer a fluctué sur des échelles de temps diverses. Les observations ont permis de mettre en évidence ces variations. On estime lors du dernier maximum glaciaire (il y a 21000 ans) que le niveau marin était de 130 mètres inférieur à celui que nous connaissons actuellement, une grande partie de l'eau terrestre se trouvant sous forme de glace continentale. Il est ensuite progressivement remonté avec la déglaciation (entre 20000 et 6000 ans) puis s'est stabilisé il y a environ 3000 à 2000 ans (Lambeck et al., 2010). Depuis lors, le niveau des océans a peu varié durant plusieurs millénaires et il ne s'est pas élevé à plus de 0.5 millimètres par an au maximum (Masson-Delmotte et al., 2013; Meyssignac, 2012).

Au cours du $XX^{ième}$ siècle, après l'ère industrielle, les enregistrements marégraphiques ont révélé une hausse du GMSL (Global Mean Sea Level) d'environ 1,71 mm/an (Douglas et al, 2001 ; Kemp et al, 2011) soit une tendance trois à quatre fois supérieure à celle des millénaires passés. Durant ces trois dernières décennies, les résultats scientifiques obtenus grâce aux satellites altimétriques notamment les missions Topex/Poseidon (T/P), Jason (1/2), ERS (1/2) et Envisat ont montré une hausse d'environ 3,4 mm/an \pm 0,4 mm/an du niveau global de la mer (Dieng, 2017) soit le double de ce qui a été observé avec les marégraphes. Les projections scientifiques montrent que le niveau mondial des océans continuera d'augmenter au cours du $XXI^{ième}$ siècle. En utilisant des modèles de climat, plusieurs articles récents illustrent une hausse du GMSL de l'ordre de 0.5 m à 1 m à l'horizon 2100, avec une forte variabilité régionale (Church et al., 2013) .

De nos jours, les populations vivent en grande partie sur les zones côtières. Ainsi, des variations même faibles du niveau de la mer peuvent avoir des conséquences importantes tant sur les habitants que sur les activités économiques. De ce fait, les études des variations du niveau des océans et de ses causes (réchauffement de l'océan, fonte actuelle des glaces continentales) sont d'une importance capitale pour la compréhension du climat mais aussi pour anticiper les conséquences socio-économiques de la hausse du niveau de la mer dans les régions côtières.

Jusqu'à une date récente, la hausse du niveau de la mer ne constituait pas une véritable préoccupation. Aujourd'hui, force est de constater que les pertes en terre par inondation et érosion, l'exode des populations côtières, la salinisation des eaux souterraines littorales, etc.,

Introduction

sont les conséquences que de nombreux états côtiers, notamment les plus vulnérables (Les Philippines, l'Indonésie et les Caraïbes, le Sénégal...) sont entrain de payer.

Alors que de nombreuses études ont été faites sur les variations actuelles du niveau de la mer à l'échelle globale (Dieng, 2017; Llovel, 2010; Meyssignac, 2012), peu d'études sont consacrées à des régions bien déterminées. Cependant les variations du niveau de la mer à l'échelle globale ne suffisent pas pour décrire la hausse du niveau moyen de la mer observée étant donné que cette hausse n'est pas uniforme et que chaque région présente des processus spécifiques. L'étude préliminaire sur la sensibilité des différentes zones côtières, basée sur des critères environnementaux et socio-économiques (Niazi, 2007), ont montré que les villes littorales côtières font partir des zones les plus sensibles à l'élévation du niveau de la mer.

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer les variations du niveau de la mer en terme de variabilités interannuelles et de tendances par bandes de latitudes de 30 degrés à l'échelle globale et dans les différents bassins océaniques (Pacifique, Atlantique et Indien), en lien avec la dynamique océanique régionale. Pour se faire, notre travail est structuré en trois chapitres.

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique pour mieux comprendre : les variations du niveau de la mer des temps géologiques à nos jours, les causes de la hausse du niveau de la mer aux échelles globale, régionale et locale et les conséquences de cette montée des eaux sur l'environnement côtier et sur la population.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons, la technique de mesures des variations du niveau de la mer par altimétrie spatiale, la zone d'étude et la description des différentes données utilisées et les traitements appliqués.
- Le troisième chapitre concerne la présentation et la discussion de nos résultats.

Chapitre 1 : Généralités sur les variations du niveau de la mer

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des connaissances actuelles sur les variations du niveau de la mer des temps géologiques à nos jours. Ce chapitre résume les principaux résultats sur le sujet que l'on trouve dans la littérature.

1. Les variations passées du niveau de la mer

1.1 Sur des temps géologiques

Les variations passées (avant la période des mesures instrumentales) du niveau de la mer sont estimées de manière indirecte, à partir d'informations issues d'archives sur les fossiles (récifs coralliens, débris de plages émergées), les sédiments (sédiments marins) et les fouilles archéologiques (structures portuaires). La combinaison des trois sources d'informations est utilisée pour reconstruire les variations passées du niveau de la mer sur plusieurs dizaines de millions d'années (Masson-Delmotte et al., 2013) :

- La datation précise des récifs coralliens permet d'obtenir des enregistrements du niveau de la mer qui remontent sur plusieurs centaines de milliers d'années avec une précision de ± 5 m (Bard et al., 1991, 2010).
- La mesure de l'isotope O^{18} de l'oxygène dans les sédiments marins donne une estimation du volume des glaces continentales et donc des variations de masse des océans (Siddall et al., 2003). En effet la glace emmagasine préférentiellement l'isotope O^{16} de l'oxygène qui est plus léger, ainsi les formations/disparitions de calottes continentales se traduisent par des augmentations/diminutions de la proportion en isotope O^{18} dans les sédiments marins. Par cette technique, sont obtenues des mesures de variation du volume d'eau des océans qui remontent à -80 millions d'années sous réserve que les données soient corrigées des variations de température de l'océan (Cramer et al., 2009).
- La stratigraphie séquentielle quant à elle, permette d'estimer les dépôts sédimentaires qui se produisent sur les marges continentales lors des fluctuations successives du niveau de la mer. Ces marges continentales enregistrent ainsi les variations des lignes

de rivage, donc du niveau de la mer relatives sur les dernières centaines de millions d'années (Haq & Schutter, 2008).

1.2 Du dernier maximum glaciaire aux premières mesures Marégraphiques

Lors du dernier maximum glaciaire, il y a environ 21 000 ans, le niveau de la mer global se situait à ~130 m plus bas que le niveau actuel. Puis la fonte des calottes polaires de l'hémisphère Nord a provoqué une augmentation du niveau de la mer qui a duré plus de 10 000 ans, soit une hausse de 10 mm/an (Lambeck et al., 2002). Sur la période allant de -7000 à -3000 ans, le niveau de la mer a augmenté moins vite (de 2 à 3m) (Masson-Delmotte et al., 2013), avec des fluctuations de moins de 25 cm sur quelques siècles (Woodroffe et al., 2012), puis s'est stabilisé il y a environ 2000 à 3000 ans (Lambeck et al., 2010; Milne & Mitrovica, 2008). Au cours des 2000 dernières années avant le début de l'ère industrielle (au milieu du 18^{ème} siècle), l'analyse des sites archéologiques (Lambeck et al., 2004) et la datation des microfossiles de marais maritimes (Kemp et al., 2011; Miller et al., 2009) montrent que le niveau de la mer global n'a pas connu de fortes variations (la tendance ne dépasse pas les 0.5 à 0.7 mm/an).

2. Les variations du niveau de la mer : la période post-industrielle

Pour le XX^{ième} siècle et les deux dernières décennies, nous disposons de deux principaux moyens d'observation du niveau de la mer: les marégraphes et les satellites altimétriques. Les enregistrements marégraphiques disponibles depuis environ un siècle permettent d'étudier les variations à long terme du niveau de la mer (variations multi-décennales). Cependant, étant principalement fixes à la côte, ces instruments mesurent un niveau de la mer relatif. Il est donc nécessaire de corriger ces données des mouvements verticaux de la croûte afin d'avoir accès aux données absolues. Les satellites altimétriques, quant à eux, fournissent des observations globales du niveau de la mer depuis plus de 30 ans maintenant. Contrairement aux marégraphes, les altimètres embarqués sur les satellites mesurent directement le niveau de la mer absolu par rapport au centre de masse de la Terre.

2.1 Les marégraphes (~1750 - présent)

Les mesures des marégraphes historiques sont utilisées pour étudier les variations du niveau de la mer durant le siècle passé. Les premières mesures marégraphiques remontent au XVIII^{ième} siècle. Ces enregistrements fournissent de longues séries temporelles très précieuses pour l'estimation des variations à long terme du niveau de la mer. Malheureusement, une

vingtaine de stations seulement fournissent des données au cours du $XX^{ième}$ siècle et, ces dernières sont situées principalement dans l'hémisphère nord le long des côtes d'Europe et d'Amérique du Nord (ce qui entraîne une résolution spatiale très limitée des données marégraphiques).

Les estimations les plus récentes de la hausse séculaire observée du niveau marin déduites des enregistrements marégraphiques sont de l'ordre de 1.5 à 2 mm/an au cours du $XX^{ième}$. Les différentes estimations réalisées sont basées sur l'analyse des données historiques du Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) (Woodworth & Player, 2003).

➤ **Avantage**

Les marégraphes permettent de suivre les variations du niveau de la mer sur une très longue période autrement dit les variations multi-décennales.

➤ **Inconvénients**

Bien qu'il y ait plus de deux mille (2000) marégraphes actuellement répartis dans plus de deux cents (200) pays, le GMSL peut être faux du fait que la répartition spatiale des marégraphes n'est pas homogène, par ce que majoritairement situés dans l'hémisphère Nord (Europe et Amérique du Nord) et que leur résolution spatiale est très faible comme le montre la figure (1.1) mettant en relief la répartition géographique des marégraphes (Source : site du Permanent Service for Mean Sea Level). Ce moyen de mesure ne permet pas de mettre en évidence la variabilité régionale du niveau de la mer qui fait l'objet de notre étude. En plus fixé à la Terre, le marégraphe suit les mouvements de cette dernière et mesure le niveau de la mer relatif donc il faut impérativement corriger les erreurs liées aux mouvements verticaux terrestres (mouvements tectoniques, rebonds postglaciaires, volcanisme).



Figure 1-1 Répartition des marégraphes à travers le monde Source: Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL).Image du 02 février 2023.

2.2 L'altimétrie spatiale (~1990-présent)

Depuis plus de 30 ans maintenant, avec les missions altimétriques de haute précision, principalement Topex/Poséidon (lancé en août 1992), ses successeurs Jason-1 (lancé en décembre 2001), Jason-2 (lancé en Juin 2008) et Jason-3 (lancé en Juin 2016), la hauteur de la surface des océans est mesurée avec une très grande précision de l'ordre de 1 à 2 cm en variations absolues du niveau de la mer, et avec une couverture quasi complète du domaine océanique (entre +/- 66° de latitude) ce qui permet d'en déduire l'évolution du niveau de la mer avec une précision de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre par an.

➤ Principe de la mesure altimétrique : mesure du niveau de la mer absolu

Le satellite altimétrique embarque à son bord un radar altimétrique qui émet un signal électromagnétique de très haute fréquence (plus de 1700 impulsions par seconde) à la verticale en direction de la surface des océans. Il reçoit en retour un signal réfléchi par la surface de la

mer : écho radar. L'analyse de l'écho radar permet d'obtenir de façon très précise la durée (T) du trajet entre le satellite et la surface de la mer, mais également la hauteur des vagues et la vitesse du vent. La multiplication de la durée du trajet par la vitesse de la lumière (vitesse de propagation des ondes électromagnétiques $C = 3.108 \text{ m/s}$) donne la distance (R) entre le satellite et la surface de l'océan. Ce pendant le signal durant son traversé de l'atmosphère peut être ralenti par des effets météorologiques tels que le taux d'humidité et d'ionisation etc. Ainsi après avoir appliqué les corrections nécessaires pour prendre en compte ces phénomènes physiques, la distance (R) entre le satellite et la surface de l'océan est calculée par la formule(1) suivante :

$$R = C * T/2 \quad \text{Eq.1}$$

Le but est de déterminer le niveau de la mer par rapport à un référentiel terrestre. L'ellipsoïde de référence (qui est la forme la plus proche de la Terre) utilisé pour l'étude des océans et le géoïde (correspondant au niveau moyen de la mer autrement dit la « surface des eaux tranquilles ») sont les surfaces de référence terrestres. Plusieurs méthodes sont utilisées pour localiser les satellites. Pour le cas des missions qui nous concernent, ils sont suivis par le système de détermination d'orbite et de radio-positionnement intégrés par satellite (DORIS), le GPS et les stations laser qui reposent sur un réseau de plus de cinquante (50) balises émettant en direction des satellites. Un tel réseau permet après analyse de connaître la position (altitude S) du satellite par rapport à l'ellipsoïde. Après toutes les corrections nécessaires, le niveau de la mer (H) est ensuite obtenu en faisant la différence entre l'orbite (S) du satellite et la distance (R) donné par l'équation (2)

$$H = S - R \quad \text{Eq.2}$$

➤ **Avantages**

Contrairement au marégraphe, le satellite altimétrique fournit le niveau de la mer absolu, en tout temps et tout lieu et permet également de mettre en évidence la variabilité régionale.

➤ **Inconvénients**

Étant un moyen de mesure récent, le satellite altimétrique ne permet pas d'avoir les variations du niveau de la mer des siècles passés : sa série temporelle est courte comparée à celle des marégraphes.

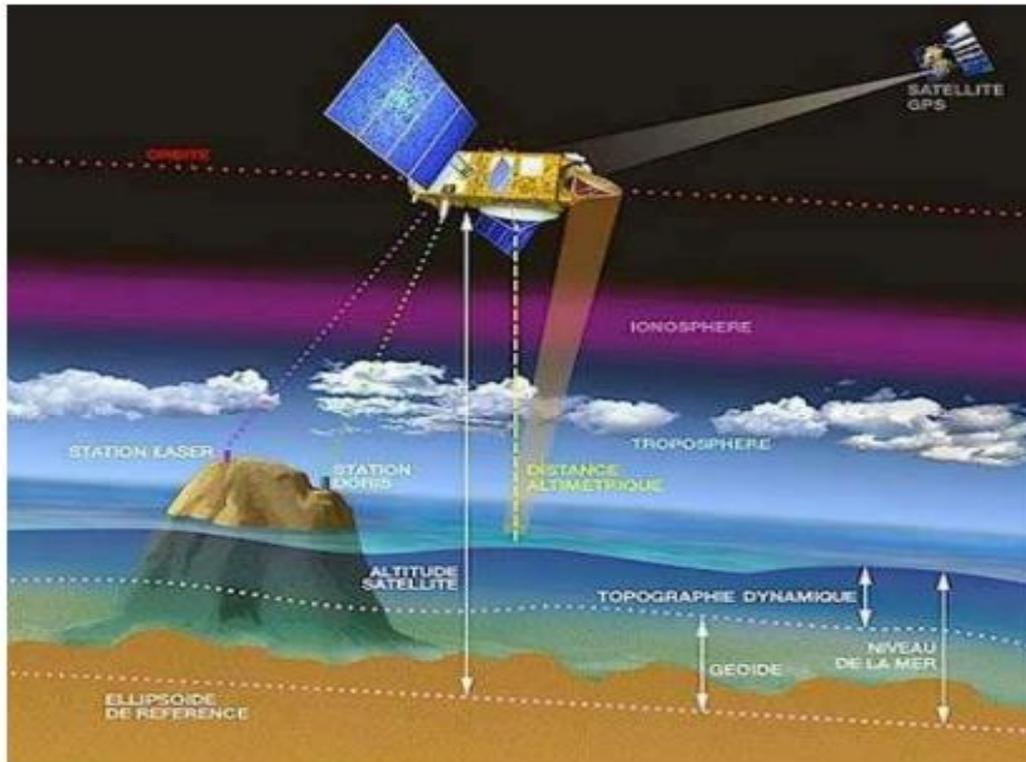


Figure 1-2 Principe de la mesure altimétrique du niveau de la mer Source: CNES

3. Les causes des variations actuelles du niveau de la mer

3.1 A l'échelle globale

Aux échelles de temps interannuelles et décennales, les variations du niveau de la mer en moyenne globale sont expliquées par :

- les variations du niveau de la mer stérique (variations de température et de salinité)
- les échanges des masses d'eaux entre les divers réservoirs terrestres (océans, atmosphère et réservoirs continentaux).

L'équation (3) suivante résume les contributions (liées au réchauffement climatique d'origine anthropique) impliquées dans les variations actuelles du niveau de la mer.

$$\Delta H_{\text{Total}} = \Delta H_{\text{Steric}} + \Delta H_{\text{Mass}} \quad \text{Eq.3}$$

Dans cette équation :

ΔH_{Total} : Représente les variations totales du niveau de la mer observées par altimétrie.

ΔH_{Steric} : Les variations du niveau de la mer stérique.

ΔH_{Mass} : Les variations de masse des océans, principalement liées aux apports d'eaux douces des continents par la fonte des glaces continentales et les stocks d'eaux dans les bassins hydrologiques.

➤ Evolution de la hauteur stérique du niveau de la mer

L'utilisation des « hauteurs stériques » en océanographie correspond à la composante du niveau de la mer due à la dilatation/contraction de la colonne d'eau sous l'effet des variations de température et de salinité de l'océan (Antonov et al., 2002). Le calcul de la hauteur stérique d'une colonne fluide est défini par l'équation (4) suivante :

$$H(0, z_{\text{ref}}) = \int_0^{z_{\text{ref}}} \frac{\rho(z) - \rho_{\text{ref}}(z)}{\rho_{\text{ref}}(z)} dz \quad \text{Eq.4}$$

Elle correspond à l'élévation d'une colonne d'eau de densité $\rho(z)$ par rapport à la hauteur qu'aurait une colonne d'eau de densité de référence ρ_{ref} pour $T=0^\circ\text{C}$, et $S=35$ PSU (Practical Salinity Unit). La hauteur stérique a la dimension d'une profondeur $z_{\text{ref}} = 2000\text{m}$ (profondeur couverte par les observations). Cependant, cette « hauteur stérique » peut être décomposée en deux composantes :

- Dilatation thermique des océans : la densité de l'eau diminue lorsqu'elle se réchauffe et le volume de l'eau augmente. En effet, l'eau change de volume selon la température : elle se dilate avec la chaleur. Les observations depuis 1961 montrent que la température moyenne de l'océan mondial a crû jusqu'à des profondeurs d'au moins 3000m (ETRANGERES et al., 2007). L'accumulation de chaleur dans le système climatique est principalement stockée dans l'océan (93%, soit 15 à 20 fois plus que l'atmosphère et les terres émergées) (Hansen et al., 2011; Levitus et al., 2009). Un tel réchauffement provoque une expansion de l'eau de mer, contribuant à l'augmentation du niveau de la mer. La formule (5) permet de calculer les variations du niveau de la mer dues à l'expansion thermique d'une colonne d'eau à pression constante :

$$\Delta H = \alpha * H_1 * \Delta T \quad \text{Eq.5}$$

ΔH : Variation du niveau de la mer

α : Coefficient de dilatation thermique= constante ($\alpha = 2.610^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) pour l'eau

H_1 : Hauteur initiale de l'eau de mer

ΔT : Variation de la température

- composante « halostérique » : Les variations de salinité de l'océan n'affectent pas les variations du niveau global de la mer (Bindoff et al., 2007), en revanche elles génèrent de la variabilité régionale dans le niveau de la mer. Cependant, les variations de salinité bien qu'elles puissent être régionalement importantes, n'ont pas d'impact significatif sur le niveau de la mer à l'échelle globale mais elles sont un indicateur des apports d'eau douce à l'océan et donc des variations de sa masse (Antonov et al., 2002). Contrairement à la température, lorsque la salinité diminue (la densité diminue), l'eau de mer se dilate et le niveau de l'océan s'élève.

➤ **Variation de masse de l'océan**

Durant ces dernières décennies les variations de masse de l'océan sont provoquées par :

- La fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires (Antarctique et Groenland) qui participent par des apports en eau douce pour les océans entraînant la montée du niveau des eaux. Une hausse du niveau moyen des océans de +/-7 cm est impliquées par la fonte intégrale des 150 000 glaciers et étendues de glace dans le monde (Radić & Hock, 2010).
- Échanges entre l'océan, l'atmosphère et les surfaces continentales (précipitations, évaporations et ruissellements) et entre l'océan et les réservoirs d'eau douce tels que les rivières et les fleuves. Ces échanges d'eau influent de façon importante sur le niveau de la mer (Cazenave, Delecluse, et al., 2012; Dieng et al., 2014).

En dehors des effets majeurs des changements climatiques, on peut par exemple ajouter la variabilité interne du climat comme par exemple l'influence des phénomènes ENSO (EL Niño Southern Oscillation) et la déformation des bassins océaniques due à la redistribution des masses de glace. La Niña de 2010-2011 par un déficit /excès pluviométrie respectivement sur

les océans/continents avait entraîné une baisse temporaire de la masse de l'océan global donc du niveau de la mer (Dieng et al., 2015).

3.2 Echelle régionale et locale

En plus des variations régionales de la composante stérique et de masse de l'océan, d'autres phénomènes interviennent également à l'échelle régionale ou locale :

- Le changement de l'intensité de la circulation thermohaline qui est accompagné d'un changement des courants océaniques et des redistributions de masse d'eau au sein des océans, entraînant des variations régionales rapides du niveau de la mer, dues à l'ajustement dynamique quasi instantané de la surface océanique.
- Le stockage de l'énergie dans l'océan génère l'essentiel de cette variabilité régionale du niveau de la mer. La chaleur de l'océan est redistribuée de manière inhomogène par la circulation océanique (Stammer et al., 2013).
- Les phénomènes anthropiques et même naturels intervenant aussi à l'échelle locale comme par exemple la construction de réservoirs et de barrages, l'irrigation, la déforestation, le pompage des nappes phréatiques, l'élévation du lit du fleuve en période de crue ou la surcharge de sédiments accumulés dans les deltas des grands fleuves.

La figure 1.3 montre la variabilité régionale de la hausse du niveau de la mer de 1993-2019 donnant également la signature des zones de hautes pressions (les anticyclones subtropicaux) marquées par de fortes tendances.

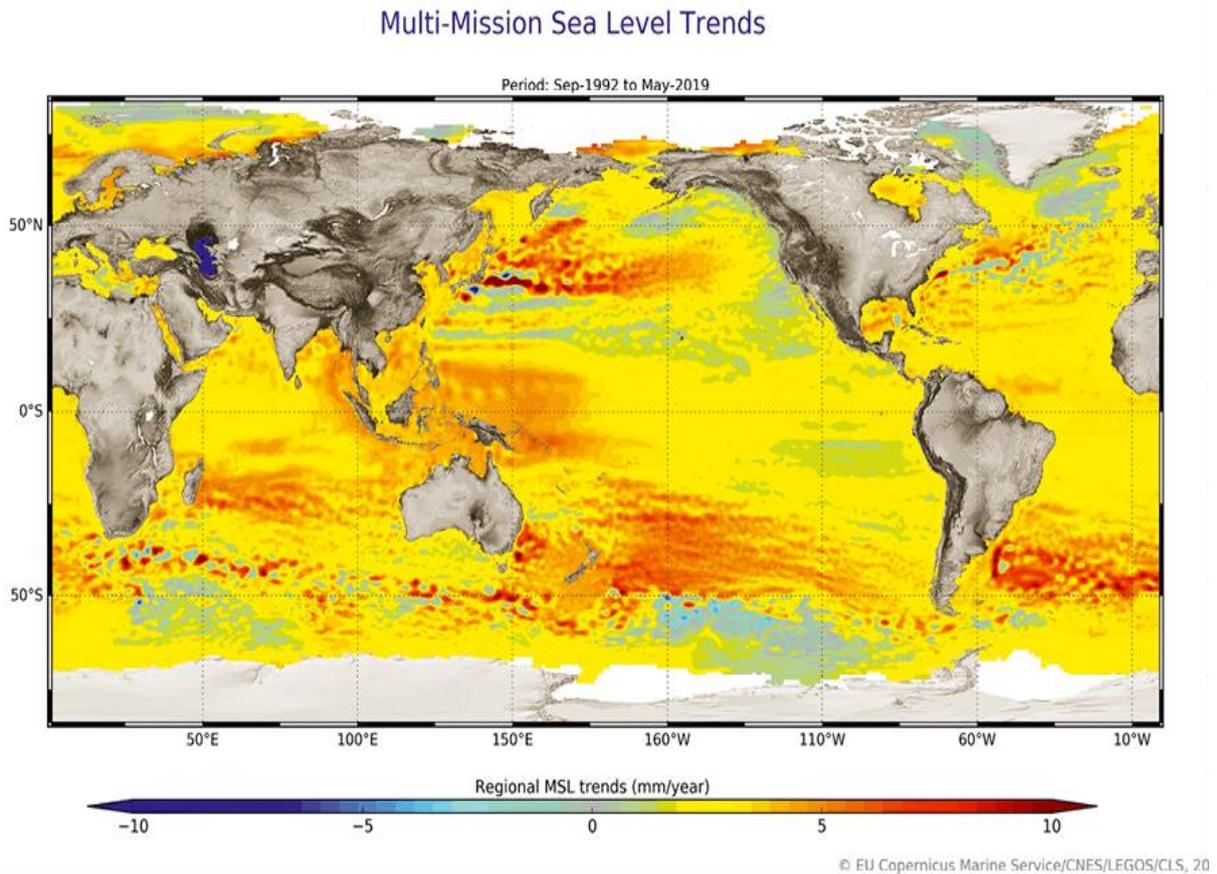


Figure 1-3 : Tendances régionales du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques sur la période (1993-2019) (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>).

4. Les conséquences prévisibles de la remontée du niveau marin

Les conséquences du réchauffement global en termes de hausse du niveau de la mer sont potentiellement inquiétantes pour de nombreuses populations vivant sur les côtes. L'ampleur et la rapidité de l'évolution du climat influeraient fortement sur les systèmes biophysiques et socio-économique (Burkett & Mimura, 2001) :

Impacts biophysiques :

- Inondations côtières plus étendues
- Accroissement de l'érosion côtière
- Intrusion d'eau salée dans les aquifères d'eau douce

- Hausse des inondations causées par des ondes de tempêtes (par exemple les tempêtes côtières provoquent souvent des ondes de tempêtes, où les vents violents poussent l'eau vers l'intérieur des terres).

- Pertes d'habitats côtiers

Impacts socio-économiques :

- Dommages aux infrastructures côtières dont celles utilisées pour le transport et loisirs (les littoraux, les espaces montagnards, les parcs d'attractions...).
- Pertes des propriétés accrues (propriétés des îles qui se forment naturellement dans les fleuves et rivières).
- Augmentations des risques de maladies par des vecteurs et le manque de disponibilité en eau potable etc.
- Accroissement des risques d'inondations et de perte de vie
- Perte de ressources (Cas des pêches).

Chapitre 2 : Domaine d'études, données et méthodes utilisées

Dans ce chapitre nous présentons le domaine d'étude, les différentes données utilisées et les méthodes de traitement appliquées à ces données.

Pour la technique de mesures des variations du niveau de la mer par altimétrie spatiale voir les pages 4-5 du *chap1* ci-dessus.

1. Présentation de la zone d'étude

Les océans couvrent une zone totale de 360 millions de kilomètres carrés (km²) soit 70% de notre planète. Ils redistribuent, avec l'atmosphère, l'énergie que notre planète reçoit du Soleil, et la rendent habitable. Ils sont le lieu de formation de nombreux phénomènes climatiques susceptibles d'avoir un impact sur les sociétés. Avec le changement climatique actuel le comportement des océans se modifie: réchauffement, fonte des glaces, montée du niveau de la mer, etc. Bien que l'océan soit géographiquement une seule masse d'eau, on peut le subdiviser en cinq grandes zones océaniques (Pacifique, Atlantique, Indien, Arctique et Australe). Dans notre étude nous nous focalisons sur l'étude des variations régionales du niveau de la mer (en termes de tendances et de variabilités interannuelles) sur les trois (3) plus grands bassins océaniques à savoir le Pacifique, l'Atlantique et l'Indien (illustrés par la figure 2.1).

- **L'océan Pacifique** est l'océan le plus vaste du globe terrestre avec une surface de 165 250 000 km (soit 43.5% de la surface des océans). Le Pacifique est le lieu de plusieurs systèmes météorologiques semi-permanents comme les anticyclones de l'île de Pâques et d'Hawaï. Près de son équateur on trouve la zone de convergence intertropicale animée par les alizés dont la position change avec les saisons, et qui ont un très grand rôle sur la répartition pluviométrique et la dynamique océanique équatoriale. Son vaste bassin est régulièrement traversé par le plus grand nombre de cyclones tropicaux. Cette région est le lieu de plusieurs modes de variabilité climatique plus particulièrement le phénomène ENSO (El-Nino et La Nina) qui a une grande influence sur la variabilité régionale des tendances du niveau de la mer (Dieng et al., 2014).

- **L'océan Atlantique** constitue le deuxième plus grand bassin océanique avec une superficie de 106 640 000 km² (soit 28% de la surface totale des océans). L'Atlantique est un peu particulier par rapport au pacifique car sa partie équatoriale est un peu étroite et cette zone est animée par une circulation océanique engendrant de forte chaleur mais aussi avec une salinité beaucoup plus important comparée aux autres bassins. Cette zone équatoriale présente une température superficielle assez chaude de l'ordre 25⁰C avec une salinité qui diminue légèrement par rapport au reste du bassin. La dynamique océanique est beaucoup importante dans ce bassin car elle constitue le moteur de la redistribution de l'énergie via le courant du Gulf Stream de l'équateur vers les pôles. Cette redistribution de l'énergie aura des conséquences sur les variations du niveau de la mer en lien avec les modes de variabilités climatiques (par exemple NAO -Oscillation Nord Atlantique, Nino-Atlantique, etc.).
- **L'océan Indien**, est un océan qui s'étend sur une surface de 70 560 000 km², soit près de 21 % de la surface des océans. Elle se situe entre l'Afrique, l'Inde et l'Australie. Bien que ses eaux bordent au sud de l'Antarctique glacé, la plupart de ses eaux sont tropicales (car contrairement aux autres océans, l'océan indien s'arrêt vers 30 degrés Nord ce qui fait réduire d'avantage sa surface), dotés de récifs coralliens. C'est un océan chaud et sa chaleur génère de nombreuses tempêtes tropicales pendant les mois d'été. Le tableau suivant illustre les différentes caractéristiques des bassins océaniques.

Tableau 2 -1 zones géographiques des différents bassins océaniques

Océan	Superficie (km ²)	Profondeur (m)	Largeur (km)	Zone Considéré
Océan Atlantique	106 460 000	8 605	6 757	77°W 20°E 66°S-66°N
Océan Pacifique	165 250 000	10 984	16 984	120°E-77W° 66°S-66°N
Océan Indien	70 560 000	7450	9 787	20°E-120°E 66°S-30°N



Figure 2-1 Carte des différents bassins de la zone d'étude.

2. La description des différentes données et traitements utilisés

2.1 La description des données

Dans notre étude nous avons utilisé deux produits qui mesurent les variations du niveau de la mer basés sur une combinaison des missions d'observations satellitaires : (1) le produit CMEMS/DT2018 fournit par «Copernicus Marine Environment Monitorin Service» (CMEMS) et (2) le produit GMSL/AVISO (-GMSL- Global Mean Sea Level) traité et fournit par le laboratoire « Collecte Localisation Satellites » (CLS).

Le produit CMEMS /DT2018 fournit des données d'élévations du niveau de la mer basées sur l'altimétrie spatiale de très haute précision et disponible dans tous les bassins océaniques avec un meilleur échantillonnage. Ce produit est mensuel et disponible sur des grilles de résolutions spatiales de $1/4^{\circ} * 1/4^{\circ}$ degrés et sur la période altimétrique de 1993-2018. Il est dédié à une étude régionale des variations du niveau de la mer et de la dynamique méso-échelle. De plus, beaucoup d'efforts ont été faits pour améliorer les données près de la côte. Les données CMEMS/DT2018 sont issues d'un ensemble de missions altimétriques fusionnant : les données de missions de références (Topex/Poséidon (1992-2006), Jason-1 (2001-2013), Jason-

2 (2008-2019) et Jason-3 (2016-2019)), et les missions complémentaires (ERS-1 (1991-2000), ERS-2 (1995-2011), ENVISAT (2002-2012), Sentinel-3A (2016-2019). Ces missions collectent à chaque cycle orbital (sur des traces altimétriques) environ 500 000 mesures, ce qui présente un taux d'acquisition de 95% (Dieng, 2017). La liste de ces missions est illustrée sur la figure 2.2 ci-après. Ces données sont validées de manière croisée, filtrées du bruit résiduel et des signaux à petite échelle (inférieur a un mois). Une interpolation optimale est finalement appliquée sur les données afin de calculer le niveau de la mer disponible sur des grilles 2D (Taburet et al., 2019). L'estimation de l'évolution temporelle à partir des données CMEMS/DT2018 sur la période altimétrie de 1993-2018 est illustrée par la figure 2.3.

Pour les données GMSL/AVISO, elles sont basées sur la combinaison des missions altimétriques de références (Topex/Poséidon, Jason-1, Jason-2 et Jason-3). Ces données non grillées sont fourni sous forme de séries temporelles après avoir fait une moyenne globale sur tous les océans. Elles sont disponibles sur la même période que les données CMEMS/DT2018 (1993-2018). Les données GMSL/AVISO permettent d'estimer la tendance et la variabilité interannuelle du GMSL avec une précision de 0,4 mm/an (Ablain et al., 2009). Pour plus de précision sur les traitements des données CMEMS/DT2018 voire (<http://marine.copernicus.eu>) et pour les donnes GMSL/AVISO voire (<http://www.aviso.altimetry.fr>).

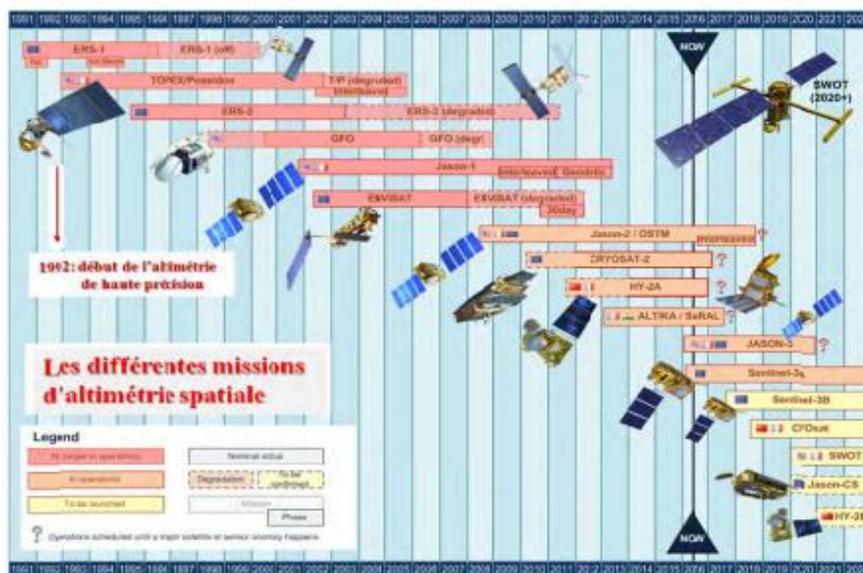


Figure 2-2 Les différents missions altimétrie spatiale depuis 1991(source : (Dieng, 2017))

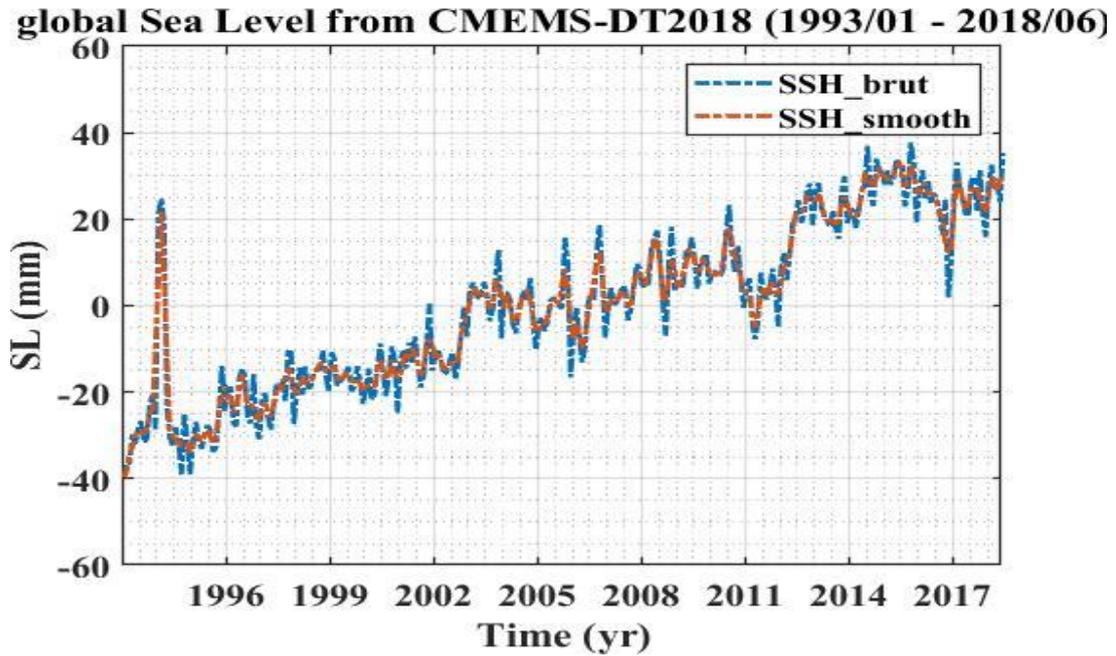


Figure 2-3 Evolution temporelle du niveau moyen global de la mer estimée à partir des données de satellites altimétrique de produit CMEMS/DT2018 : en bleu (SSH brut) et en rouge (SSH lissée).

2.2 Traitements utilisés

D'abord à l'aide du logiciel Google Earth nous avons délimité les différents bassins retenus dans la figure 2.1 et les limites des secteurs sont définies comme suit : (Océan Pacifique (66°S-66°N de latitude, 120°E-77°W de longitude); Océan Atlantique (66°S-66°N de latitude, 77°W-20°E de longitude) et Océan Indien (66°S-30°N de latitude, 20°E-120°E de longitude).

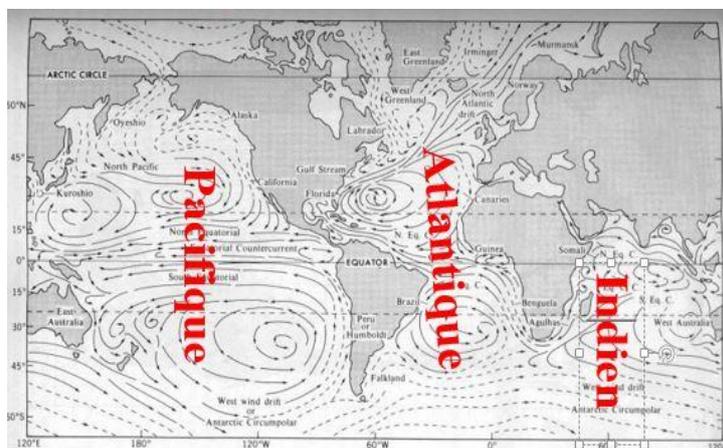
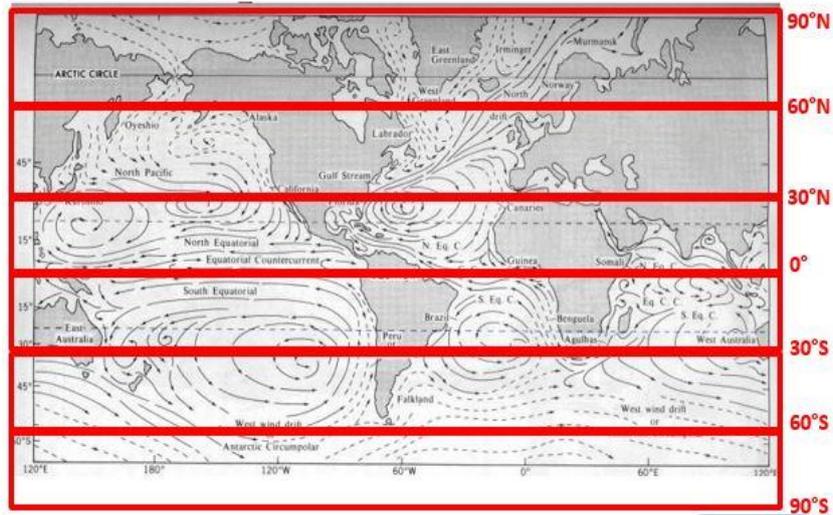
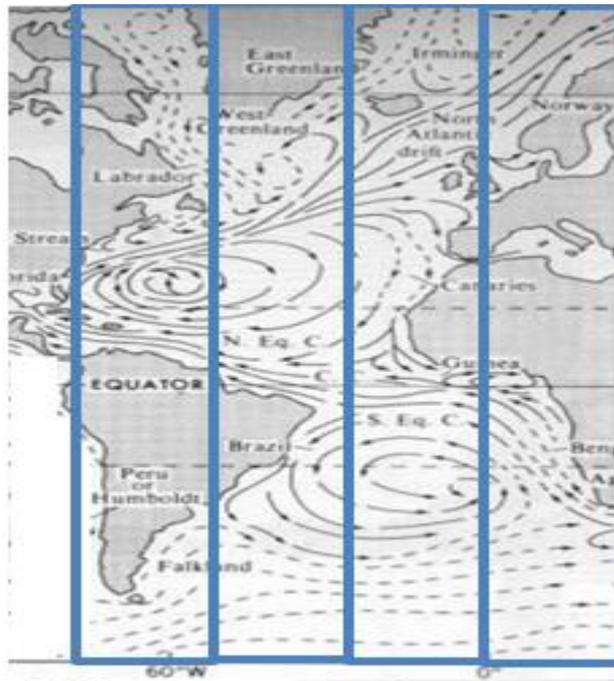


Figure 2.4 Bassins océaniques en lien avec les courants (source Open Univ, 1989)

Des pas de 30 allant du nord vers le sud avec comme latitudes 90°N-90°S ont été adoptés.



Ainsi on a fait focus sur l'Atlantique pour observer l'évolution de ces variabilités et tendances du niveau de la mer par des pas longitudinales de 20.



Et finalement avec le logiciel Matlab 2020, des masques ont été appliqués sur la grille ALTI CMEMS à chaque fois pour créer la carte de séries temporelles de la zone considérée, puis nous avons :

- ❖ Calculé la moyenne spatiale ;

- ❖ Supprimé les cycles saisonniers (pour cette fonction nous avons utilisé une fonction permettant d'appliquée des filtres de signaux annuels et semi-annuels. Cette fonction utilise la méthode des transformés de fourrier (FFT) qui permet d'éliminer deux sinusoïdes de période semi-annuel (6mois) et annuel (12mois) appliqués sur les données mensuelles ;

- ❖ Fait le retrait moyen temporel ;

- ❖ Fait un lissage sur trois mois ;

- ❖ Calculé les tendances des séries d'élévation du niveau de la mer (par la méthode de régression linéaire);

- ❖ Calculé les erreurs de calcul de tendances ;

- ❖ En définitive tracé les courbes d'évolution du niveau moyen régional de la mer.

Chapitre 3 : Résultats et discussions

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus.

3.1 Variations du niveau de la mer par bandes latitudinales

3.1.a Comparaison en terme de variabilités interannuelles

La figure 3.1.a. représente les variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans les zones $[90^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}]$, $[60^{\circ}\text{N}-30^{\circ}\text{N}]$, $[0^{\circ}-30^{\circ}\text{N}]$, $[0^{\circ}-30^{\circ}\text{S}]$, $[30^{\circ}\text{S}-60^{\circ}\text{S}]$ et $[60^{\circ}\text{S}-90^{\circ}\text{S}]$. Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois mois. Cette figure montre de fortes fluctuations interannuelles du niveau de la mer dans les zones polaires ($90^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}$) et ($60^{\circ}\text{S}-90^{\circ}\text{S}$). Cependant, ces fluctuations interannuelles sont plus marquées dans la zone polaire sud avec des pics assez élevés d'ordre de 50 mm même si on observe deux anomalies positives plus remarquable dans la bande Nord ($90^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}$) entre 2003-2004 et 2016-2017 qui peuvent être liés aux modes de variabilités naturelles du climat (Par exemple l'oscillation arctique, Oscillation Nord Atlantique etc.). Ces fortes fluctuations interannuelles du niveau de la mer observées au niveau des pôles peuvent être dues à la forte turbulence océanique liée aux vents forts notés dans la zone. Cela montre que la dynamique océanique non permanente (par exemple le courant d'Ekman) peut fortement influencer sur la variabilité interannuelle. Contrairement aux zones polaires, les zones subtropicales ($30^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}$ et $30^{\circ}\text{S}-60^{\circ}\text{S}$) et zones tropicales ($0^{\circ}-30^{\circ}\text{N}$ et $0^{\circ}-30^{\circ}\text{S}$) présentent des fluctuations interannuelles moins marquées. Cependant les bandes subtropicales présentent légèrement plus de variabilités interannuelles que dans les zones tropicales. Ces faibles variabilités peuvent être liées à la dynamique permanente de l'océan largement pilotée par les courants géostrophiques. Il faut aussi noter que dans les zones tropicales, nous observons trois pics (1997 /1998, 2010/2011 et 2015/2016) assez importants du niveau de la mer sur la période des 25 années d'observations par altimétrie. Sur ces trois pics, on note une anomalie positive du niveau de la mer en 1997 /1998 et 2015/2016 correspondant aux événements El-Niño et une anomalie négative entre 2010 et 2011 qui correspond à la période la Nina. Au préalable plusieurs études (Dieng et al., 2014; Cazenave, Delecluse, et al., 2012) ont montré l'influence des modes de variabilités

naturelles du climat (ENSO, Mode Equatorial etc.) sur les fluctuations interannuelles du niveau de la mer liées à la répartition de la température, de la salinité et du bilan précipitations-évaporations. Il est bon de préciser que l'impact El Niño est beaucoup plus marqué dans la partie équatoriale Nord que dans la partie équatoriale Sud du fait que la ZCIT se trouve légèrement dans l'hémisphère Nord (vers 5 degrés nord)

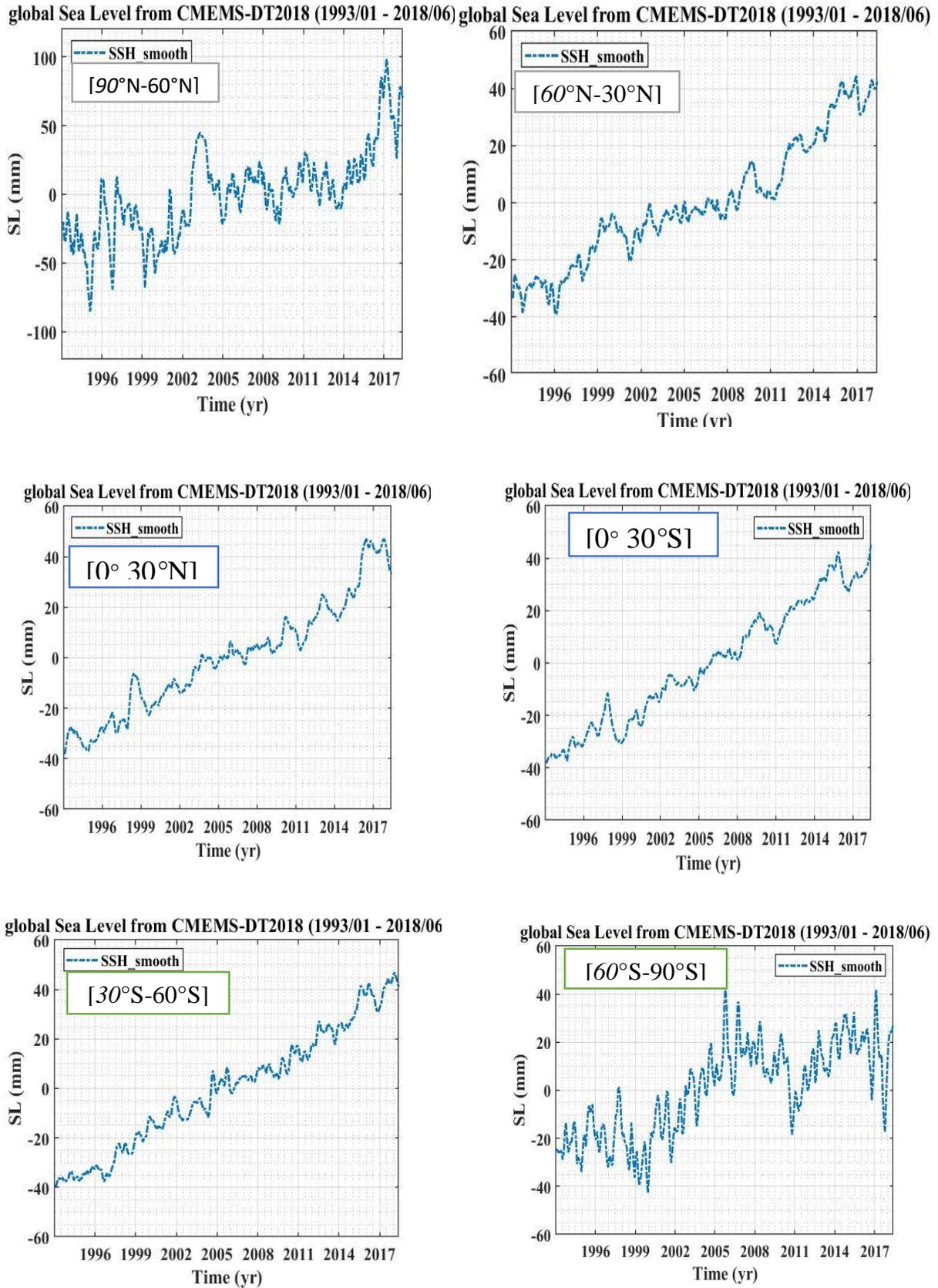


Figure 3.1.a. Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement entre [90°N-60°N], [60°N-30°N], [0°-30°N], [0°-30°S], [30°S-60°S] et [60°S-90°S].

3.1.b Comparaison en termes de tendances du niveau de la mer

Les tendances moyennes annuelles de la hausse du niveau de la mer sur la période 1993-2018 en fonction des zones latitudinales sont représentées ci-dessous par la figure 3.1.b. Les lettres A, B, C, D, E et F représentent respectivement les blocs $[90^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}]$, $[60^{\circ}\text{N}-30^{\circ}\text{N}]$, $[30^{\circ}\text{N}-0^{\circ}]$, $[0^{\circ}-30^{\circ}\text{S}]$, $[30^{\circ}\text{S}-60^{\circ}\text{S}]$ et $[60^{\circ}\text{S}-90^{\circ}\text{S}]$. En dehors des deux pôles, on observe une augmentation d'environ 0.15mm/an de la tendance du niveau de la mer en allant vers le sud c'est à dire entre 60°N et 60°S . Par contre nous observons une forte différence de tendance entre les zones polaires nord $[90^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}]$ et sud $[60^{\circ}\text{S}-90^{\circ}\text{S}]$, qui présentent respectivement une tendance maximale de 3.5 mm/an et une tendance minimale de 2.4 mm/an. Ce qui montre que les tendances du niveau moyen de la mer sont non uniformes dans les différents blocs. Cette représentation doit faire l'objet d'étude approfondie pour comprendre cette évolution de la tendance vers le sud. Comme décrit dans plusieurs études précédentes (Douglas et al., 2001 ; Meyssignac, 2012) c'est le stockage de l'énergie dans l'océan (composant thermoclinique du niveau de la mer) qui génère l'essentiel de cette variabilité régionale du niveau de la mer. La chaleur de l'océan est redistribuée de manière inhomogène par la circulation océanique (Stammer et al., 2013). Dans le cas d'un fort réchauffement climatique et d'une fonte accélérée des calottes polaires et des glaciers, il deviendra important et créera une amplification régionale de la hausse de la mer, en particulier dans les tropiques (Slangen et al., 2014). Enfin, le transfert de masse d'eau continent-océan change aussi le champ de gravité à la fois localement (par déplacement de la masse) et globalement (par son impact sur la rotation de la Terre et donc sur le géoïde) (Tamisiea & Mitrovica, 2011).

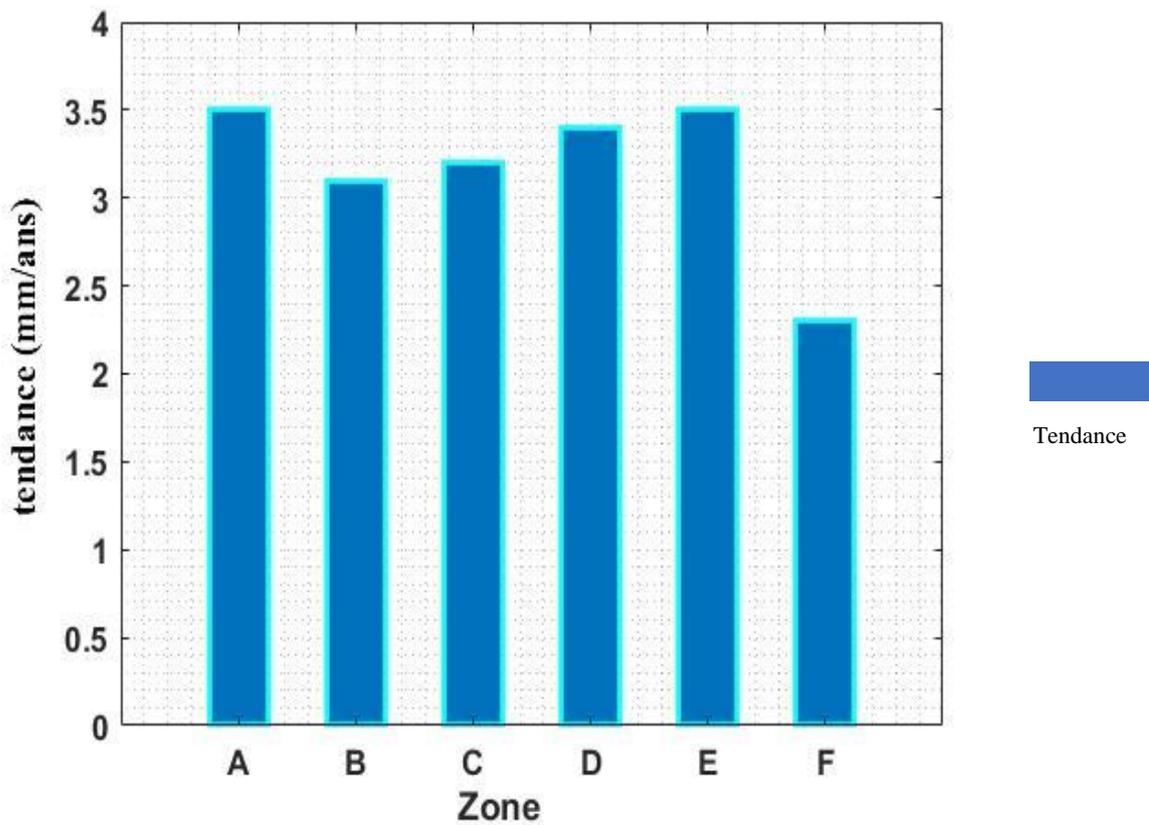


Figure 3.1.b Tendances du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques CMEMS/DT2018 sur la période 1993-2019 en fonction des bandes latitudinales. Les lettres A, B, C, D, E et F représentent respectivement $[90^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}]$, $[60^{\circ}\text{N}-30^{\circ}\text{N}]$, $[30^{\circ}\text{N}-0^{\circ}]$, $[0^{\circ}-30^{\circ}\text{S}]$, $[30^{\circ}\text{S}-60^{\circ}\text{S}]$ et $[60^{\circ}\text{S}-90^{\circ}\text{S}]$.

3.2 Variation du niveau de la mer sur les trois grands bassins océaniques.

3.2 .a Comparaison en termes de variabilités interannuelles

La figure 3.2.a décrit les variations du niveau moyen de la mer dans les bassins Pacifique, Atlantique et Indien comparées au niveau moyen global de la mer (GMSL). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois mois. Cette figure montre de fortes fluctuations interannuelles du niveau de la mer dans le bassin Pacifique et Indien et moins de fluctuations dans le bassin Atlantique. Ces fluctuations interannuelles du niveau de la mer peuvent être dues à la dynamique propre à chaque bassin, aux modes de variabilités du climat et à la taille de chaque bassin (le Pacifique qui est beaucoup plus importante que celles des autres bassins). La courbe du bassin Indien montre des pics du niveau de la mer moins forts que ceux observés dans la zone Pacifique. Contrairement au bassin Pacifique dans cette zone on

note deux anomalies positives en 1994 et en 2010-2011 suivie de quatre anomalies négatives en 1997, 2003, 2007 et 2016. L'Atlantique quant-a-elle montre de faibles anomalies positives/négatives comparé aux deux autres bassins. On y voit aussi une hausse quasi linéaire du niveau de la mer avec un pic beaucoup plus important en 2018. On peut noter le bon accord quantitatif entre les deux courbes (courbe de l'atlantique et du GMSL) sur certaines années et leurs évolutions qui ne cessent d'augmenter au fur du temps. Nos résultats sont en accord avec (Cazenave, et al., 2012), en terme de variabilités interannuelles et qui souligne que pour l'océan Atlantique, l'essentiel des variations interannuelles du niveau de la mer est d'origine stérique. Plusieurs études ont montré qu'en période El Niño, le transfert d'eau du Pacifique tropical vers l'océan Indien, via les détroits indonésiens, est réduit (Cazenave, Henry, et al., 2012). Nous observons aussi que les variations régionales du niveau de la mer présentent des fluctuations beaucoup plus importantes que le GMSL. Ces faibles fluctuations de ce dernier sont dues du fait que les anomalies observées sur les différents bassins se compensent lorsqu'on les additionne.

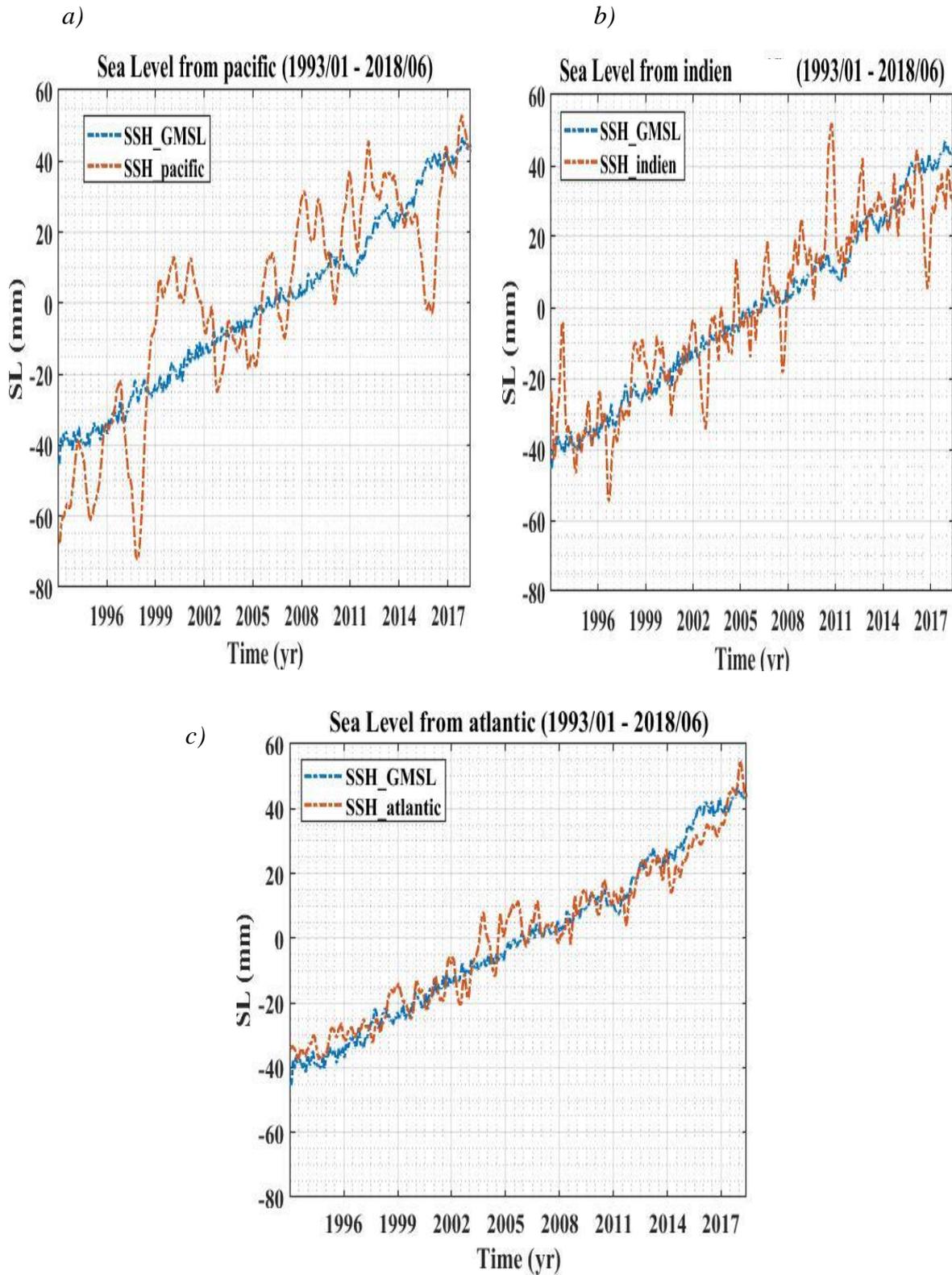


Figure 3.2.a Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans les Bassins : a) Pacifique, b) Indien et c) Atlantique comparé chacune à l'échelle globale (courbe bleu). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois mois.

3.2.b Comparaison en termes de tendance du niveau de la mer.

Le tableau suivant montre les tendances et erreurs de calcul des différents bassins océaniques.

Tableau 3 -1 Les tendances moyennes et erreurs de calcul de tendances des différents bassins.

ZONES	Pacifique	Atlantique	Indien	GMSL
Tendances (mm/ans)	3.5	3.05	3.1	3.4
Erreurs de calcul de tendance (mm/ans)	0.12	0.05	0.01	0.4

La figure 3.2.b représente les tendances moyennes annuelles de la hausse du niveau de la mer en mm/an pour les trois bassins (Pacifique, Atlantique et Indien, calculées à partir des données altimétriques CMEMS) comparées chacune à la tendance globale sur la période 1993-2018. Les lettres A, B et C représentent respectivement les bassins Pacifique, Atlantique et Indien. On a remarqué que les tendances positives du niveau moyen de la mer ne sont pas uniformes dans les différents bassins. La tendance dans le pacifique est de $3,5 \pm 0,12$ mm/an qui est beaucoup plus forte que celles du GMSL ($3,4 \pm 0,4$ mm/an) et des bassins Atlantique et Indien (qui présentent respectivement des tendances de $3,05 \pm 0,05$ mm/an et $3,1 \pm 0,01$ mm/an) qui à leur tour sont inférieure au GMSL. Il sera plus intéressant d'approfondir cette partie de l'étude pour comprendre les causes des différences de tendances en se posant des questions suivantes : est-ce que c'est la variation de la masse qui influe le plus sur la forte tendance de l'élévation du niveau de la mer ou c'est les variations stériques (thermostérique et halostérique) ?

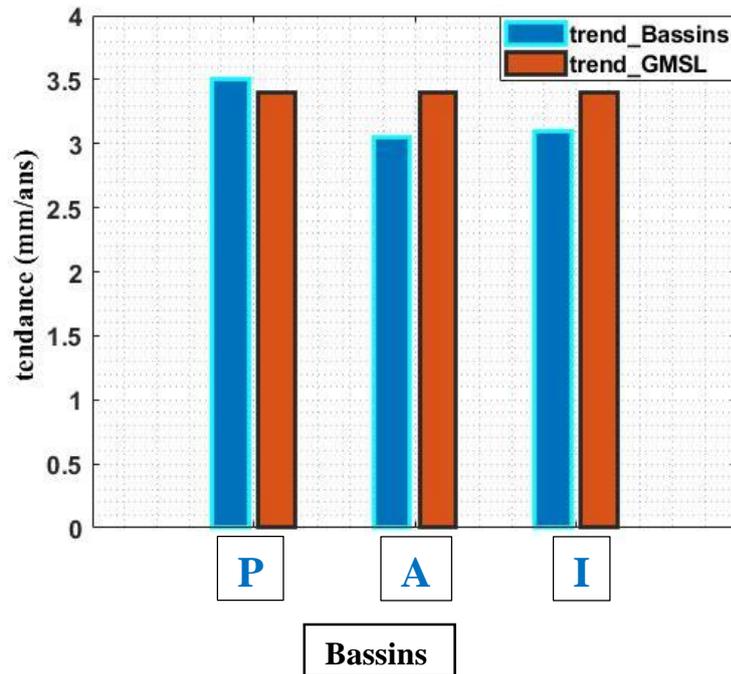


Figure 3-2.b Tendances du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques sur la période 1993-2018 en fonction des bassins océanique. Les lettres A, B et C représentent respectivement le Pacifique, l'Atlantique et l'Indien comparées à la tendance globale.

3.3 Variations du niveau de la mer dans le bassin Atlantique par bandes longitudinales.

3.3.a Comparaison en termes de variabilités interannuelles

La figure 3.3 représente les variations du niveau moyen de la mer dans le bassin Atlantique sur différentes bandes longitudinales. Les courbes *a*), *b*), *c*) et *d*) représentent respectivement les zones $[0^{\circ} 20^{\circ}E]$, $[0^{\circ} 20^{\circ}W]$, $[20^{\circ}W 40^{\circ}W]$ et $[40^{\circ}W 77^{\circ}W]$. Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois mois. La courbe *a*), qui couvre une bonne partie du Golfe de Guinée et des côtes Sud-Africaines de l'Atlantique, montre de fortes fluctuations interannuelles du niveau de la mer comparée aux autres bandes longitudinales de l'océan Atlantique. Quant à la courbe *b*), qui couvre les côtes de l'Europe de l'Ouest, de l'Afrique de l'Ouest, jusqu'au Sud de l'Atlantique, même s'il présente des fluctuations moins importantes que la bande $[0^{\circ} 20^{\circ}E]$, montre de fortes fluctuations comparer aux bandes longitudinales se trouvant à l'Ouest de l'Atlantique ($[20^{\circ}W 40^{\circ}W]$ et $[40^{\circ}W 77^{\circ}W]$) illustrées par les courbes *c* et *d*. Des anomalies positives associées à une hausse du niveau de la mer sont notées en 2003-

2004 et 2017 dans les deux blocs longitudinaux [0° 20°E] et [0° 20°W]. En somme nous constatons une diminution de la variabilité interannuelle du niveau de la mer dans le bassin Atlantique par bandes de longitudes en allant vers l'Ouest c'est-à-dire des côtes de l'Afrique de l'Ouest vers les côtes des Amériques. Nos résultats sont en accord avec Dieng et al.2019 qui avait déjà montré de fortes fluctuations interannuelles du Golfe de Guinée et la région de Benguela (côte Angola et Afrique du Sud). Ces différences de fluctuations interannuelles entre l'Est et l'Ouest du bassin Atlantique peuvent être liées par la dynamique océanique engendrée par les alizés venants d'Est.

3.3.b Comparaison en termes de tendances du niveau de la mer

On a constaté l'uniformité des tendances du niveau de la mer dans les différentes zones longitudinales de l'océan Atlantique. Cela est illustré dans le tableau 3-2. Les tendances observées dans ces zones sont du même ordre de grandeur que la tendance moyenne globale du bassin atlantique qui est de $3,05 \pm 0,05$. Cela voudrait dire que la différence de dynamique océanique longitudinale de l'Atlantique n'a pas d'influence significative sur la redistribution régionale du niveau de la mer par bandes de longitudes.

Tableau 3-2 Tendances et Erreurs de calcul du niveau de la mer en mm/an sur les différentes zones longitudinales dans le bassin atlantique.

Zones	Tendances et Erreurs de calculs (mm/an)
[0° 20°E]	3.06±0.11
[20°W 0°]	3.07±0.07
[20°W 40°W]	3.02±0.06
[40°W 77°W]	3.05±0.05

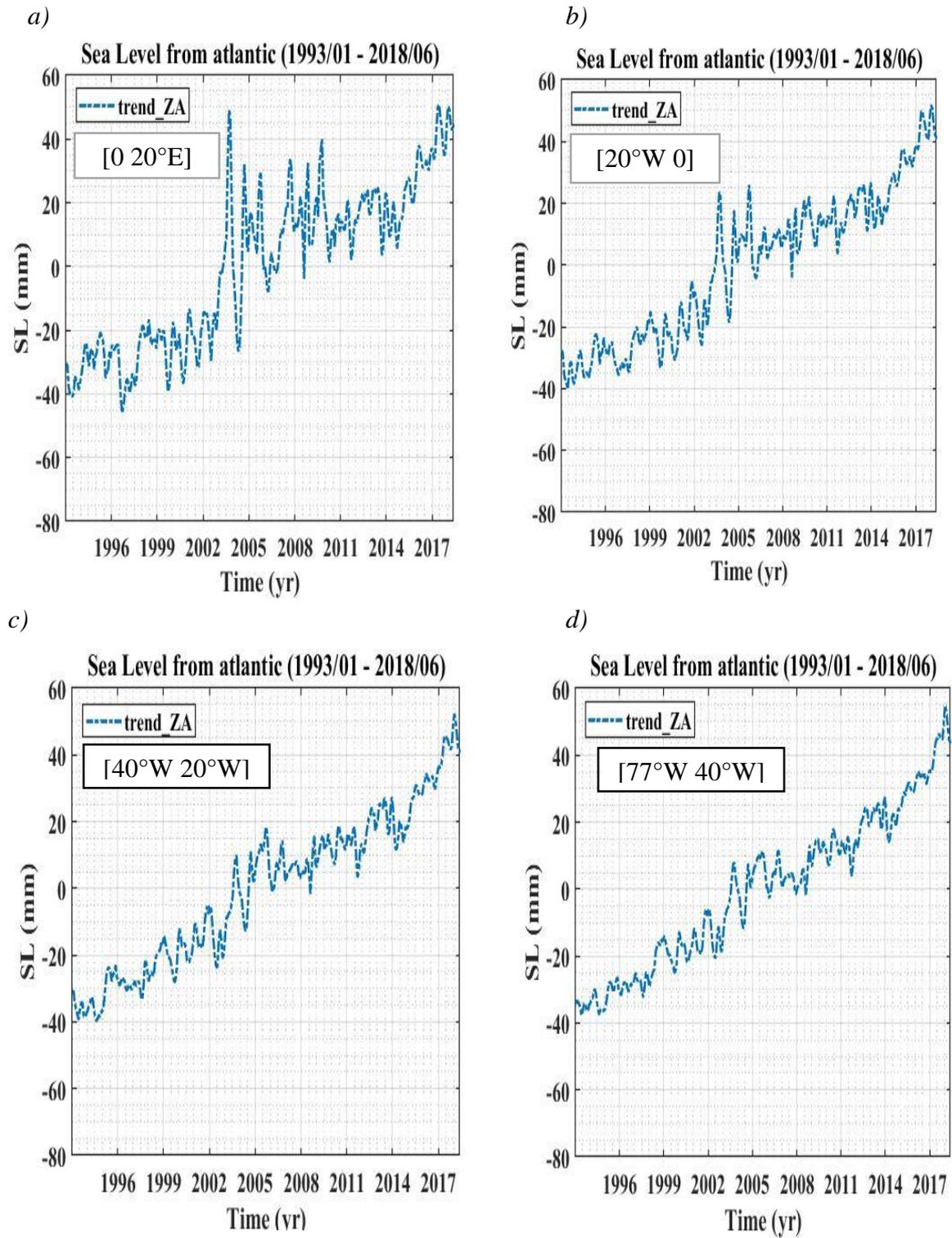


Figure 3-3 Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans les blocs a) [0° 20°E], b) [0° 20°W], c) [20°W 40°W] et d) [40°W 70°W] sur le bassin Atlantique.

Conclusion Général et perspectives

L'objectif de cette étude était d'évaluer les variabilités interannuelles et les tendances régionales du niveau de la mer par bandes de latitudes et dans les différents bassins océaniques en relation avec la dynamique océanique régionale.

En termes de variabilités interannuelles, nos résultats ont révélé de fortes fluctuations du niveau de la mer au niveau des pôles comparées aux zones tropicales et intertropicales sur la période altimétrique 1993-2018. Nous indiquons que ces fortes fluctuations interannuelles du niveau de la mer observées au niveau des pôles peuvent être dues à la forte turbulence océanique liée aux vents forts notés dans les régions polaires. Cela montre que la dynamique océanique non permanente (par exemple le courant d'Ekman) peut fortement influencer sur la variabilité interannuelle. Pour les bandes subtropicales et équatoriales, leurs faibles variabilités peuvent être liées à la dynamique permanente de l'océan largement pilotée par les courants géostrophiques. Nos résultats montrent aussi que dans les zones tropicales, nous observons de forts pics positives (1997/1998 et 2015/2016 correspondant aux épisodes El-Nino) et négatives (2010/2011 correspondant à l'évènement la Nina) assez importants du niveau de la mer. Notre étude confirme de plus comme plusieurs d'autres (Dieng et al., 2014; Cazenave, Delecluse, et al., 2012), l'influence des modes de variabilités naturelles du climat (notamment le phénomène ENSO) sur les fluctuations interannuelles du niveau de la mer liées à la répartition de la température, de la salinité et du bilan précipitations-évaporations.

Lorsqu'on a comparé la variabilité interannuelle du niveau de la mer dans les trois bassins océanique (Pacifique, Atlantique et Indien), notre étude a mis en évidence de fortes fluctuations dans le bassin Pacifique et Indien contrairement au bassin Atlantique qui présente des fluctuations du même ordre de grandeur que le GMSL. Ces différences de fluctuations peuvent être dues à la dynamique propre et à la taille de chaque bassin, mais aussi aux modes de variabilités climatique qui s'y déroule.

En termes de tendances, notre étude par bandes de latitudes a montré une augmentation d'environ 0.15mm/an de la tendance du niveau de la mer en allant vers le sud entre 60°N et 60°S. Cette représentation doit faire l'objet d'étude approfondie pour comprendre cette évolution de la tendance vers le sud. Nous avons aussi mis en évidence une forte différence de tendance entre les zones polaires nord [90°N-60°N] et sud [60°S-90°S], qui présente respectivement une tendance maximale de 3.5 mm/an et une tendance minimale de 2.4 mm/an. En somme, nous avons montré que les tendances du niveau moyen de la mer sont non

uniformes dans les différentes bandes de latitudes sur la période altimétrique 1993-2018. Pour l'étude par bassin (pacifique, atlantique et indien) la montée des eaux se fait à un rythme variable. Nous avons montré que la tendance du niveau de la mer dans l'océan pacifique est plus importante et supérieure à celles globale (GMSL), comparée aux océans Atlantique et Indien qui présentent des tendances nettement inférieures au GMSL. Il sera plus intéressant d'approfondir cette partie de l'étude pour comprendre les causes des différences de tendances en se posant des questions suivantes : est-ce que c'est la variation de la masse qui influe le plus sur la forte tendance de l'élévation du niveau de la mer ou c'est les variations stériques (thermostérique et halostérique) ? Nous nous sommes ensuite intéressés plus particulièrement aux variabilités régionales et des tendances du niveau de la mer observées dans le bassin atlantique sur la bande longitudinale. Nos résultats ont montré une diminution de la variabilité interannuelle du niveau de la mer par bandes de longitudes en allant vers l'Ouest du bassin de l'Atlantique. Les fortes fluctuations interannuelles observées dans la zone [20°W-0] et [0-20°E] du bassin Atlantique peuvent être liées par la dynamique océanique engendrée par les alizés venant d'Est. Nos analyses sont en accord avec des études précédentes dans la zone, par exemple Dieng et al.2019 qui avait montré de fortes fluctuations interannuelles dans le Golfe de Guinée et la région de Benguela (cote Angola et Afrique du Sud). Notre étude a aussi montré une uniformité des tendances du niveau de la mer dans les différentes bandes longitudinales de l'océan Atlantique, qui est de l'ordre de 3.05 ± 0.05 . Cela voudrait dire que la différence de dynamiques océaniques longitudinales de l'Atlantique n'a pas d'influence significative sur la redistribution régionale du niveau de la mer par bandes de longitudes.

Ce travail de Mémoire a répondu à quelques questions et contribuera à combler les nombreuses lacunes sur la connaissance des variations actuelles du niveau de la mer sur les trois bassins mais il reste encore beaucoup de zones d'ombres :

- Quelles est le bilan du niveau de la mer régionale, en estimant les différentes contributions à la hausse du niveau de la mer (composante stérique et variation de masse de l'océan) ?
- Y' a-t-il une accélération de l'élévation du niveau régional de la mer ?
- Est-ce que les variations du niveau de la mer au large sont identique au près des côtes ?

Bibliographie

- Ablain, M., Cazenave, A., Valladeau, G., & Guinehut, S. (2009). A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993–2008. *Ocean Science*, 5(2), 193-201. <https://doi.org/10.5194/os-5-193-2009>
- Antonov, J. I., Levitus, S., & Boyer, T. P. (2002). Steric sea level variations during 1957–1994 : Importance of salinity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C12), SRF 14-1-SRF 14-8. <https://doi.org/10.1029/2001JC000964>
- Awo, F. M. (2018). *Modes interannuels de la variabilité climatique de l'Atlantique tropical, dynamiques oscillatoires et signatures en salinité de surface de la mer* [Theses, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)]. <https://theses.hal.science/tel-01916705>
- Bindoff, N. L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J. M., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quere, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C. K., Talley, L. D., Unnikrishnan, A. S., Josey, S. A., Tamisiea, M., Tsimplis, M., & Woodworth, P. (2007). *Observations : Oceanic climate change and sea level* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller, Éd.s.; p. 385-428). Cambridge University Press. https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch5.html
- Burkett, V., & Mimura, N. (2001). Coastal Zones and Marine Ecosystems. *undefined*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Coastal-Zones-and-Marine-Ecosystems-Burkett-Mimura/4c8dd2ae4d80887a4a3f665b15b57c4946706bf3>
- Cazenave, A., Delecluse, P., Dörfliger, N., Gaufres, P., Idier, D., Jamous, M., Le Cozannet, G., Treut, H., Peings, Y., & Planton, S. (2012). *Changement climatique et niveau de la mer : De la planète aux côtes françaises*.
- Cazenave, A., Henry, O., Munier, S., Delcroix, T., Gordon, A. L., Meyssignac, B., Llovel, W., Palanisamy, H., & Becker, M. (2012). Estimating ENSO Influence on the Global Mean Sea Level, 1993–2010. *Marine Geodesy*, 35(sup1), 82-97. <https://doi.org/10.1080/01490419.2012.718209>
- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D., & Unnikrishnan, A. S. (2013). *Sea level change* [Technical Report]. P.M.Cambridge University Press. <https://drs.nio.org/xmlui/handle/2264/4605>
- Cramer, B. S., Toggweiler, J. R., Wright, J. D., Katz, M. E., & Miller, K. G. (2009). Ocean overturning since the Late Cretaceous : Inferences from a new benthic foraminiferal isotope compilation: BENTHIC ISOTOPE COMPILATION. *Paleoceanography*, 24(4). <https://doi.org/10.1029/2008PA001683>
- Dieng, H. B. (2017). *Variations actuelles du niveau de la mer*. Thèse 285.
- Dieng, H. B., Cazenave, A., Meyssignac, B., Henry, O., Schuckmann, K. von, Palanisamy, H., & Lemoine, J. M. (2014). Effect of La Niña on The Global Mean Sea Level And North Pacific Ocean Mass Over 2005-2011. *Journal of Geodetic Science*, 4(1). <https://doi.org/10.2478/jogs-2014-0003>

- Dieng, H. B., Champollion, N., Cazenave, A., Wada, Y., Schrama, E., & Meyssignac, B. (2015). Total land water storage change over 2003–2013 estimated from a global mass budget approach. *Environmental Research Letters*, *10*(12), 124010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124010>
- Douglas, B. C., Kearney, M., & Leatherman, S. (2001). Sea level rise : History and consequences. *International Geophysics Series*, *75*, 37-64.
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., & von Schuckmann, K. (2011). Earth's energy imbalance and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *11*(24), 13421-13449. <https://doi.org/10.5194/acp-11-13421-2011>
- Haq, B. U., & Schutter, S. R. (2008). A Chronology of Paleozoic Sea-Level Changes. *Science*, *322*(5898), 64-68. <https://doi.org/10.1126/science.1161648>
- Keenlyside, N. S., & Latif, M. (2007). Understanding Equatorial Atlantic Interannual Variability. *Journal of Climate*, *20*(1), 131-142. <https://doi.org/10.1175/JCLI3992.1>
- Kemp, A. C., Horton, B. P., Donnelly, J. P., Mann, M. E., Vermeer, M., & Rahmstorf, S. (2011). Climate related sea-level variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(27), 11017-11022. <https://doi.org/10.1073/pnas.1015619108>
- Lambeck, K., Anzidei, M., Antonioli, F., Benini, A., & Esposito, A. (2004). Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for recent change. *Earth and Planetary Science Letters*, *224*(3), 563-575. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.031>
- Lambeck, K., Esat, T. M., & Potter, E.-K. (2002). Links between climate and sea levels for the past three million years. *Nature*, *419*(6903), 199-206. <https://doi.org/10.1038/nature01089>
- Lambeck, K., Woodroffe, C., Antonioli, F., Anzidei, M., Gehrels, W. R., Laborel, J., & Wright, A. (2010). Paleoenvironmental records, geophysical modeling, and reconstruction of sea-level trends and variability on centennial and longer timescales. *Understanding Sea-level Rise and Variability*, 61-121.
- Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T. P., Locarnini, R. A., Garcia, H. E., & Mishonov, A. V. (2009). Global ocean heat content 1955-2008 in light of recently revealed instrumentation problems : GLOBAL OCEAN HEAT CONTENT. *Geophysical Research Letters*, *36*(7), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2008GL037155>
- Llovel, W. (2010). *Hausse du niveau de la mer et impact du changement climatique global*. Thèse 235.
- Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J. F., Jansen, E., Lambeck, K., Luterbacher, J., Naish, T. R., Osborn, T., Otto-Bliesner, B. L., Quinn, T. M., Ramesh, R., Rojas, M., Shao, X., & Timmermann, A. (2013). *Information from Paleoclimate Archives* [Data set]. PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.828636>
- Meyssignac, B. (2012). *La Variabilité Régionale du Niveau de la Mer*. Thèse 357.
- Miller, K. G., Sugarman, P. J., Browning, J. V., Horton, B. P., Stanley, A., Kahn, A., Uptegrove, J., & Aucott, M. (2009). Sea-level rise in New Jersey over the past 5000 years :

- Implications to anthropogenic changes. *Global and Planetary Change*, 66(1-2), 10-18.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.008>
- Milne, G. A., & Mitrovica, J. X. (2008). Searching for eustasy in deglacial sea-level histories. *Quaternary Science Reviews*, 27(25-26), 2292-2302.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.018>
- Niazi, S. (2007). *Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc) : Vulnérabilité et adaptation*. <http://thesesenafrique.imist.ma/handle/123456789/189>
- Radić, V., & Hock, R. (2010). Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal of Geophysical Research*, 115(F1), F01010. <https://doi.org/10.1029/2009JF001373>
- Siddall, M., Rohling, E. J., Almogi-Labin, A., Hemleben, Ch., Meischner, D., Schmelzer, I., & Smeed, D. A. (2003). Sea-level fluctuations during the last glacial cycle. *Nature*, 423(6942), 853-858. <https://doi.org/10.1038/nature01690>
- Slangen, A. B. A., Carson, M., Katsman, C. A., van de Wal, R. S. W., Köhl, A., Vermeersen, L. L. A., & Stammer, D. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124(1-2), 317-332. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9>
- Stammer, D., Cazenave, A., Ponte, R. M., & Tamisiea, M. E. (2013). Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes. *Annual Review of Marine Science*, 5(1), 21-46. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172406>
- Taburet, G., Sanchez-Roman, A., Ballarotta, M., Pujol, M.-I., Legeais, J.-F., Fournier, F., Faugere, Y., & Dibarboure, G. (2019). DUACS DT2018 : 25 years of reprocessed sea level altimetry products. *Ocean Science*, 15(5), 1207-1224. <https://doi.org/10.5194/os-15-1207-2019>
- Tamisiea, M., & Mitrovica, J. (2011). The Moving Boundaries of Sea Level Change : Understanding the Origins of Geographic Variability. *Oceanography*, 24(2), 24-39. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.25>
- Woodroffe, C. D., McGregor, H. V., Lambeck, K., Smithers, S. G., & Fink, D. (2012). Mid-Pacific microatolls record sea-level stability over the past 5000 yr. *Geology*, 40(10), 951-954. <https://doi.org/10.1130/G33344.1>
- Woodworth, P. L., & Player, R. (2003). The Permanent Service for Mean Sea Level : An Update to the 21st Century. *Journal of Coastal Research*, 19(2), 287-295.

Webographie

- ✚ CMEMS (<http://marine.copernicus.eu/>).
- ✚ <http://www.psmsl.org/data> (site principal pour tous les marégraphes mondiaux : PSMSL).
- ✚ www.institut-ocean.org (l'actualité de l'Institut océanographique)
- ✚ http://www.wmo.int/pages/members/members_fr.html/ (Interprétations plus détaillées portant sur les variations régionales du climat communiquées par les spécialistes de la prévision climatique)
- ✚ <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/RCCs.html>(centresclimatologiques régionaux de l'OMM).
- ✚ (AVISO ; <http://www.aviso.altimetry.fr/>)