

UNIVERSITE Assane Seck de Ziguinchor



U.F.R Sciences et Technologies

Département de physique

Mémoire de Master 2

Mention Physiques et Applications

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

Variations actuelles du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines

Présentée par **Arame DIEYE**

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

Soutenu publiquement le jeudi 14 mars 2019 à l'UASZ devant le jury composé de :

Prénoms et Noms	Grades	Qualité	Établissement
Moctar CAMARA	Maître de Conférences	Président	UFRST/UASZ
Siny NDOYE	Chercheur	Rapporteur	ESP/UCAD
Samo DIATTA	Maître-Assistant	Examineur	UFRST/UASZ
Mamadou Lamine MBAYE	Assistant	Examineur	UFRST/UASZ
Habib Boubacar DIENG	Chercheur	Maître de stage	CNRS/LEGOS
Bamol Ali SOW	Maître de Conférences	Directeur de stage	UFRST/UASZ

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



Remerciements

C'est avec plaisir et reconnaissance que je profite de ces quelques paragraphes pour témoigner toute ma gratitude et mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien tout au long de ce travail de recherche.

Je tiens tout d'abord à remercier, mon directeur de mémoire, Dr Bamol Ali SOW, pour son soutien sans faille et ses nombreux conseils durant le stage et la rédaction de mon mémoire. J'ai beaucoup apprécié sa démarche, son ouverture d'esprit et son enthousiasme qui me poussent à aller de l'avant.

J'adresse également mes plus chaleureux et sincères remerciements à Dr Habib Boubacar DIENG mon Co-encadreur, qui m'a initié et transmis une large connaissance sur l'étude des variations actuelles du niveau de la mer et qui a su répondre à mes nombreuses questions de manière précise et rapide.

Mes remerciements vont également aux membres du jury avec à sa tête Dr Moctar CAMARA, à Dr Samo DIATTA, Dr Mamadou Lamine MBAYE et Dr Siny NDOYE pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail, pour leur soutien, les échanges et suggestions fructueux, à ma famille plus particulièrement à mon oncle qui a pris soin de moi depuis que je suis à Ziguinchor, mon père qui a pris le temps d'échanger, de relire tout mon travail, mes proches, aux membres des laboratoires LOSEC et LPAO-SF et tous ceux qui, directement ou indirectement, m'ont apporté leurs soutiens et accompagné tout au long de mon travail de recherche.

Dédicaces

Je dédie ce travail, à toute ma famille.

Particulièrement à mon père, ma mère, mon frère et mes sœurs,
à mon oncle Babacar Sadekh SOUGOUFARA de Ziguinchor.

Que DIEU vous garde et vous couvre de grâce.

Résumé

L'augmentation du niveau moyen global de la mer est une conséquence préoccupante du réchauffement climatique d'origine anthropique. Elle constitue une menace sérieuse pour plusieurs régions côtières basses souvent très peuplées. L'objectif de notre étude est de faire l'état des lieux des variations actuelles du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest sur les trois (03) dernières décennies. Les résultats obtenus montrent une hausse de 3,31 mm/an soit une montée des eaux d'environ 7,9 cm sur la période altimétrique 1993-2016 en Afrique de l'Ouest et de fortes fluctuations du niveau de la mer avec des pics assez importants qui apparaissent certaines années. Nos résultats révèlent également une montée des eaux qui n'est pas uniforme dans la région. Elle devient plus importante en allant vers le Sud dans la zone soudanienne et guinéenne où les tendances sont supérieures à celles régionale et globale.

Mots clés: Variations du niveau de la mer, réchauffement climatique, Afrique de l'ouest.

Abstract

The increase in the global average sea level is a worrying consequence of global warming caused by Human activities. It poses a serious threat to several low-cost coastal regions that are often densely populated. The objective of our study is to state of the Art of the current sea level variations in West Africa over the last 3 decades. The results show an increase of 3.31 mm/year, that is an increase of water of about 7.9 cm over the 1993-2016 altimetric period in West Africa and strong fluctuations in sea level with fairly large peaks which appear some years. Our results also reveal a rise in water that is not uniform in the region. It becomes more important going south in the Sudanian and Guinean zone where the trends are greater than those regional and global.

Key word : sea level variations, global warming, West Africa

Liste des figures

- Figure 1.1 : Comparaison entre la hausse du niveau de la mer observée et la somme des différentes composantes climatiques sur la période 1993-2012 (Meysignac et Cazenave 2012 ; Cazenave et Remy, 2011).
- Figure 1.2 : Tendances du niveau de la mer à l'échelle régionale en mm/an calculées à partir des données altimétriques CCI-ESA sur la période 1993-2016.
- Figure 1.3 : Schéma récapitulatif des causes de variations du niveau de la mer.
- Figure 2.1 : Répartition des marégraphes à travers le monde *Source*: Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL).
- Figure 2.2 : Principe de la mesure altimétrique du niveau de la mer *Source*: CNES.
- Figure 2.3 : Variations interannuelles du niveau moyen global de la mer issues des données de CCI-ESA (courbe noire) et AVISO (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois (03) mois.
- Figure 2.4 : Localisation de la zone Afrique de l'Ouest avec les différentes zones climatiques retenues.
- Figure 3.1 : Variations interannuelles du niveau moyen de la mer en Afrique de l'Ouest (courbe noire), et à l'échelle globale (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois (03) mois.
- Figure 3.2 : Variations interannuelles du niveau moyen de la mer en Afrique de l'Ouest en prenant en compte les signaux saisonniers.
- Figure 3.3 : Variations interannuelles du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest après retrait de la tendance linéaire sur la période 1993-2016.
- Figure 3.4 : Tendances du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest en mm/an calculées à partir des données altimétriques ESA sur la période (1993-2016).

- Figure 3.5 : Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans les zones Afrique subsaharienne, Sahel, zone soudanienne, Golfe de Guinée (courbe noire), et à l'échelle globale (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois (03) mois.
- Figure 3.6 : Tendances du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques CCI-ESA sur la période 1993-2016 en fonction des zones climatiques de l'Afrique de l'Ouest. Les lettres A, B, C et D représentent respectivement les zones Afrique subsaharienne, Sahel, soudanienne, Golfe de Guinée.
- Figure 3.7 : Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans les zones mauritanienne, Nord-Sénégal et Sud-Sénégal (courbe noire), et à l'échelle globale (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois (03) mois.
- Figure 3.8 : Tendances du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques CCI-ESA sur la période 1993-2016 dans différentes zones du Sahel, les notations ZM, NS et SS représentent respectivement: Zone Mauritanie, Nord Sénégal et Sud Sénégal.
- Figure 3.9 : Variations interannuelles du niveau moyen de la mer relatif à Dakar.

Acronymes

- CLS Collecte Localisation Satellites
- COP 21 Conference Of the Parties 21 (21ème Conférence des Parties de la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques)
- ESA European Spatial Agency (Agence Spatiale Européenne)
- ENSO EL Niño Southern Oscillation
- GIEC Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution Climat
- GMSL Global Mean Sea Level
- NS Nord Sénégal
- OMM (Organisation Météorologique Mondiale)
- PIB Produit Intérieur Brut
- PSMSL Permanent Service for Mean Sea Level
- SS Sud Sénégal
- SST Sea Surface Temperature
- VANM Variations Actuelles du Niveau de la Mer
- ZCIT Zone de Convergence InterTropicale
- ZM Zone Mauritanienne

Table des matières

Remerciementsii

*Dédicaces*iii

Résuméiii

Abstractv

Liste des figuresv

Acronymesvii

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

Chapitre 1 : Causes des variations actuelles du niveau de la mer, les conséquences et les techniques d'adaptation..... 5

1.1 Causes des variations actuelles du niveau de la mer5

1.1.1 Échelle globale5

1.1.1.1 Variations de la composante stérique du niveau de la mer6

1.1.1.2 Variations de masse de l'océan8

1.1.2 Échelles régionale et locale9

1.2 Conséquences des variations actuelles du niveau de la mer et les techniques d'adaptation11

1.2.1 Conséquences11

1.2.2 Techniques d'adaptation12

Chapitre 2 : Méthodologie d'étude des variations actuelles du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines..... 13

2.1 Méthode13

2.1.1 Différentes techniques de mesures des variations actuelles du niveau de la mer13

2.1.1.1 Marégraphes13

2.1.1.2 Satellites altimétriques15

2.1.2 Présentation de la zone d'étude18

2.1.3 Description et traitement des données utilisées20

2.1.3.1 Description20

2.1.3.2 Traitement21

Chapitre 3 : Résultats et discussions 22

3.1 Résultats et discussions22

3.1.1 Variations interannuelles du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines (1993-2016)22

3.1.2 Variations spatiales du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines25

3.1.3 Variations interannuelles du niveau de la mer des différentes zones : Afrique subsaharienne, Sahel, zone soudanienne et golfe de Guinée (1993-2016)26

3.1.4 Variation interannuelle du niveau de la mer près de la région du Sahel (1993-2016)29

3.1.5 Variations interannuelles du niveau de la mer relatif à Dakar31

Conclusion et perspectives33

Références

bibliographiques35

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les changements de la composition chimique de l'atmosphère qui se sont produits depuis le début de l'ère industrielle sont sans équivalent à ceux notés au cours du Quaternaire (Le Treut, 2003). Ces changements sont principalement dus aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique qui entraînent une modification de l'équilibre énergétique du système océan-atmosphère en y apportant un surplus d'énergie. Cette modification est en grande partie responsable du changement climatique observé et a pour conséquence : le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan, la diminution de la couverture de neige et de glace et l'élévation du niveau de la mer (*Rapport de synthèse GIEC, 2014*). L'élévation du niveau de la mer est cependant l'une des conséquences les plus inquiétantes du changement climatique. En effet, le niveau de la mer constitue un excellent indicateur du changement climatique. Il intègre les variations de plusieurs composantes du système climatique en réponse au réchauffement d'origine anthropique et à la variabilité naturelle et interne du climat (Cazeneuve, 2016).

Au cours de l'Histoire, le niveau moyen global de la mer (GMSL pour Global Mean Sea Level) a connu plusieurs variations. Les observations géologiques révèlent que lors du dernier maximum glaciaire où l'hémisphère Nord était en grande partie recouvert de glace, le GMSL était environ de 120 mètres plus bas qu'aujourd'hui. Lors de la fonte des calottes glaciaires, le GMSL a progressivement remonté et s'est stabilisé il y a environ 6 000 et 2 000 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 mm (*Meysignac, 2012*). Au cours du XX^{ème} siècle, après l'ère industrielle, les enregistrements marégraphiques ont révélé une hausse du GMSL d'environ

1,71 mm/an (*Douglas, 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. Au courant de ce XXI^{ème} siècle tous les scénarios prédisent la continuité de cette montée des eaux qui pourrait atteindre 0,5 m à 1 m à l'horizon 2100 avec une forte variabilité régionale (*Church et al 2013*), ce qui constitue une menace sérieuse pour plusieurs régions côtières basses souvent très peuplées (*Dieng, 2017*).

Alors que de nombreuses études ont été faites sur les variations actuelles du niveau de la mer à l'échelle globale (*Lombard, 2005 ; Liovel, 2010 ; Meyssignac, 2012 ; Dieng, 2017*), peu d'études sont consacrées à une région bien déterminée, notamment à l'Afrique de l'Ouest. 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.

En Afrique de l'Ouest, cette montée des eaux est actuellement de plus en plus perceptible avec l'érosion du littoral, la salinisation des terres, des eaux de surface et des aquifères, les submersions marines qui sont devenues plus fréquentes et la disparition de certaines localités situées sur le littoral et îles qui est à l'origine présentement de plusieurs déplacés climatiques à travers la région. Ainsi, ce phénomène est désormais devenu un enjeu à la fois politique, socio-économique et scientifique:

- politique parce que la capacité d'adaptation et de résilience de ces États africains est très faible : la plus part sont des États pauvres avec une économie très fragile ce qui se

manifeste par une faible capacité de prise en charge de la question (faible système d'alerte, de délimitation des zones à risque, de prédiction de l'évolution future de la situation),

- socio-économique parce que les zones côtières fournissent 56 % du produit intérieur brut (PIB) de l'Afrique de l'Ouest selon la Banque Mondiale, environ un tiers des habitants y vit et mène ses activités. En outre le littoral Ouest africain est jalonné de ports, de grandes villes, de capitales économiques et industrielles,
- et enfin scientifique parce que l'Atlantique tropical suscite beaucoup d'intérêt au sein de la communauté scientifique en raison de sa forte variabilité climatique, sa position inter-hémisphérique et ses télé-connexions avec les autres bassins océaniques tels que l'Atlantique Nord et le Pacifique Est.

Face à ces enjeux, il est urgent de faire l'état des lieux des variations du niveau de la mer près des côtes de l'Afrique de l'Ouest durant ces trois dernières décennies, afin de prévoir l'évolution future du niveau de la mer si la tendance actuelle devait se poursuivre dans ce contexte de réchauffement climatique. Pour y parvenir, les données marégraphiques du PSMSL et les données des centres de traitement de données altimétriques CLS/AVISO et celles de l'agence spatiale européenne (CCI-ESA) validées au cours de la thèse (*Dieng, 2017*) seront utilisées.

Ainsi nous allons, dans le premier chapitre, décrire les causes de la hausse du niveau de la mer aux échelles globale, régionale et locale, les conséquences de cette montée des eaux sur l'environnement côtier et la population, et les techniques d'adaptation qu'on peut développer pour faire face. Dans le deuxième chapitre, il s'agira d'identifier les différentes techniques de mesure du niveau de la mer et de présenter notre zone d'étude ainsi que les données utilisées pour mener à bien le travail. La méthode utilisée pour traiter les données sera également

décrite. Enfin dans le troisième chapitre nous allons étudier les fluctuations régionales, sous régionales et locales ainsi que la variabilité spatiale de la hausse du niveau de la mer durant ces trois dernières décennies près des côtes Ouest africaines.

Chapitre 1 Causes des variations actuelles du niveau de la mer, les conséquences et les techniques d'adaptation

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différentes causes de la hausse du niveau de la mer aux échelles globale, régionale et locale, les conséquences de cette montée des eaux sur l'environnement côtier et les populations, et les techniques d'adaptation élaborées pour y faire face.

1.1 Causes des variations actuelles du niveau de la mer

1.1.1 Échelle globale

A l'échelle globale, les différentes contributions affectant directement les variations du niveau de la mer durant ces trois dernières décennies sont :

- les contributions stériques (dues aux variations de température et de salinité) et,
- les variations de masses de l'océan ((dues aux échanges d'eau entre l'océan, l'atmosphère et les surfaces continentales tels que les glaces continentales et les réservoirs d'eaux continentales).

Ces deux contributions sont directement liées au réchauffement climatique d'origine anthropique, leur somme est traduite par l'équation (1) suivante :

$$\Delta H_{\text{Total}} = \Delta H_{\text{Stérique}} + \Delta H_{\text{Masse}} \quad (1)$$

ΔH_{Total} = les variations du niveau de la mer totales observées

$\Delta H_{\text{Stérique}}$ = les variations du niveau de la mer stérique

ΔH_{Masse} = les variations de masse de l'océan

La figure 1.1 montre une différence entre la somme des contributions climatiques et la hausse du niveau de la mer observée. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'expansion thermique de l'océan profond est mal connue (au-delà de 2000 m, profondeurs non couvertes par les observations). Sur la période altimétrique (1993-2012), la contribution de la fonte des glaces est estimée à 55 %, celle de l'expansion thermique à 32 % et l'apport des eaux continentales à environ 10 %.

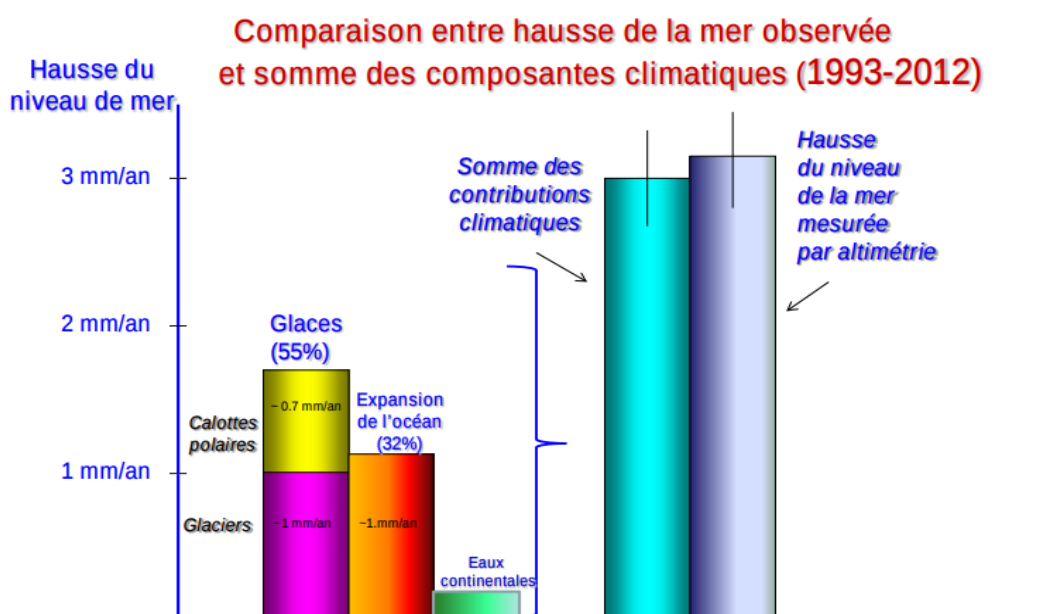


Figure 1.1 : Comparaison entre la hausse du niveau de la mer observée et la somme des composantes climatiques sur la période 1993-2012 (Meyssignac et Cazenave 2012 ; Cazenave et Remy, 2011).

1.1.1.1 Variations de la composante stérique du niveau de la mer

Elles correspondent aux variations de densité de la colonne d'eau, dues aux variations de température et de salinité, communément appelées « hauteur stérique » par les océanographes.

La hauteur stérique est définie par l'équation (2) ci-dessous.

$$H(0, Z_{ref}) = \int_0^{Z_{ref}} \left(\frac{\rho(z) - \rho(Z_{ref})}{\rho_{ref}(z)} \right) dz \quad (2)$$

$H(0, Z_{ref})$ = l'élévation ou la baisse d'une colonne d'eau de densité $\rho(z)$ par rapport à une colonne d'eau de référence de densité ρ_{ref} , de température $T = 0^\circ\text{C}$ et de salinité $S = 35$ PSU (Practical Salinity Unit). $Z_{ref} = 2000$ m (profondeur couverte par les observations).

En outre, cette « hauteur stérique » peut être décomposée en deux composantes :

- Une composante « thermostérique » due au réchauffement des océans. Selon l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale), les concentrations de gaz à effet de serre ont atteint des proportions record au cours de ce XXI^{ème} siècle. Elles sont passées de 280 ppm (particules par million) en 1750 avant la révolution industrielle à 403,3 ppm en 2016. Leur présence entraîne un surplus de chaleur dans le système océan-atmosphère, qui est absorbé à plus de 90% par l'océan à cause de sa grande inertie thermique par rapport à l'atmosphère (inertie thermique de l'eau 1080 fois plus forte que celle de l'air autrement dit il faut 100 fois plus d'énergie pour augmenter la température moyenne de l'océan de 1°C que pour l'atmosphère). Ceci provoque une augmentation de la température moyenne de l'océan et par conséquent la dilatation des particules d'eau océaniques et une hausse du niveau de la mer. Les variations du niveau de la mer dues à l'expansion thermique d'une colonne d'eau à pression constante sont traduites par la formule (3) ci-après. Cette équation illustre bien que ces variations sont proportionnelles aux variations de température :

$$\Delta H = \alpha * H_1 * \Delta T \quad (3)$$

ΔH = variation du niveau de la mer

H_1 = hauteur initiale de l'eau de mer

$\Delta T = T - T_0$ = variation de température

α = coefficient de dilatation thermique = constante = $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour l'eau

Si $\Delta T < 0$ (refroidissement) : baisse du niveau de la mer

Si $\Delta T > 0$ (réchauffement) : augmentation du niveau de la mer

- Une composante « halostérique » qui concerne les variations de salinité. En effet, la variation de la salinité entraîne des variations de densité de la colonne d'eau d'où une diminution ou une augmentation de la hauteur de la colonne d'eau. 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*).

1.1.1.2 Variations de masse de l'océan

Elles sont dues :

- d'une part, à la fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires (Antarctique et Groenland) qui constituent des apports en eau douce pour les océans et qui participent par conséquent à la montée du niveau des eaux. La fonte intégrale des 150 000 glaciers et étendues de glace dans le monde impliquerait une hausse du niveau moyen des océans de 60 cm +/- 7 cm (*Radic et Hock, 2010*).

- d'autre part, aux 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.

Cependant, selon le principe d'Archimède, la fonte des « glaces de mer » tels que les icebergs et des banquises du pôle Nord n'entraînerait pas une hausse du niveau de la mer.

À côté de ses effets majeurs du changement climatique, on peut ajouter la déformation des bassins océaniques due à la redistribution des masses de glace et d'eau issue de la fonte des glaces continentales et les changements dus à la variabilité interne du climat comme par exemple l'influence des phénomènes ENSO (EL Niño Southern Oscillation). *Dieng (2017)* a montré que, la Niña de 2010-2011 qui a entraîné un déficit pluviométrique sur les océans et un excès pluviométrique, sur les continents avait conduit à une baisse temporaire de la masse de l'océan global donc du niveau de la mer.

1.1.2 Échelles régionale et locale

En plus des contributions climatiques et des phénomènes tels que ENSO, d'autres phénomènes interviennent également à l'échelle régionale ou locale.

La répartition inégale de la température de la surface de la mer qui entraîne un stockage d'énergie non homogène à travers les océans et les transports océaniques résultant de la circulation à grande échelle (circulation thermohaline) sont à l'origine d'une forte variabilité régionale de la montée du niveau de la mer.

D'autres phénomènes anthropiques et même naturels interviennent aussi à l'échelle locale comme par exemple l'affaissement du sol dû aux pompages d'eaux souterraines et du pétrole, la construction de barrages, de retenues ou de brèches, ou les variations de ruissellement et de

percolation, l'élévation du lit du fleuve en période de crue ou la surcharge de sédiments accumulés dans les deltas des grands fleuves.

La variabilité régionale de la hausse du niveau de la mer est illustrée par la figure 1.2, qui montre également la signature des zones de hautes pressions (les anticyclones subtropicaux) marquées par de fortes tendances.

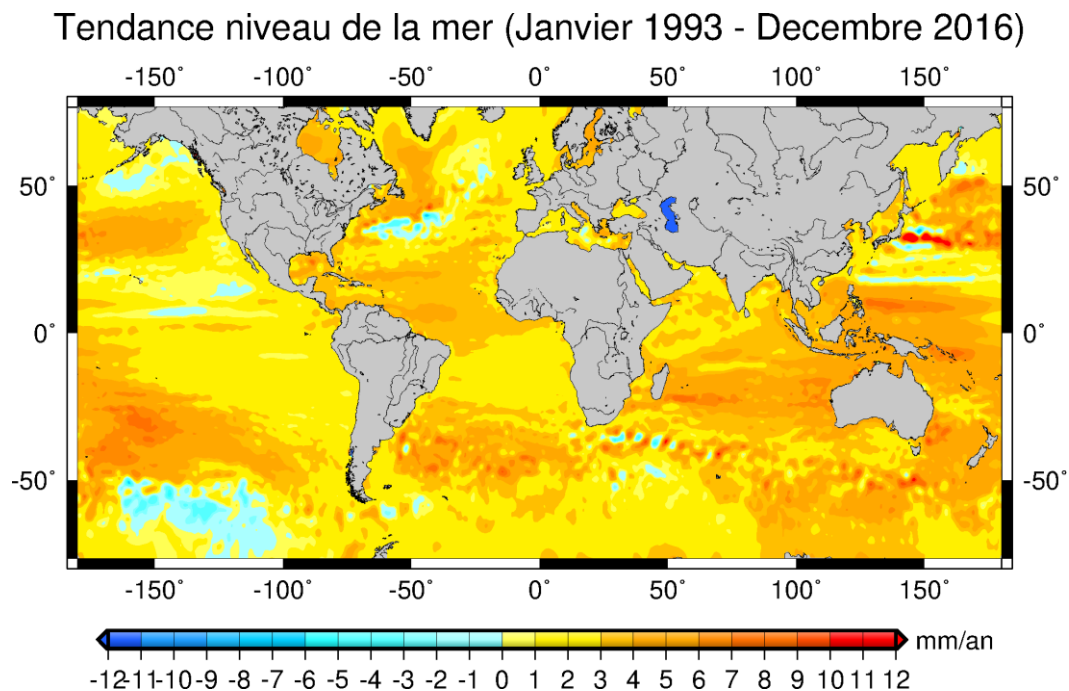


Figure 1.2 : Tendances régionales du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques CCI-ESA sur la période (1993-2016).

Ces différentes causes des variations du niveau de la mer sont résumées dans le schéma représenté sur la figure 1.3 ci-dessous :

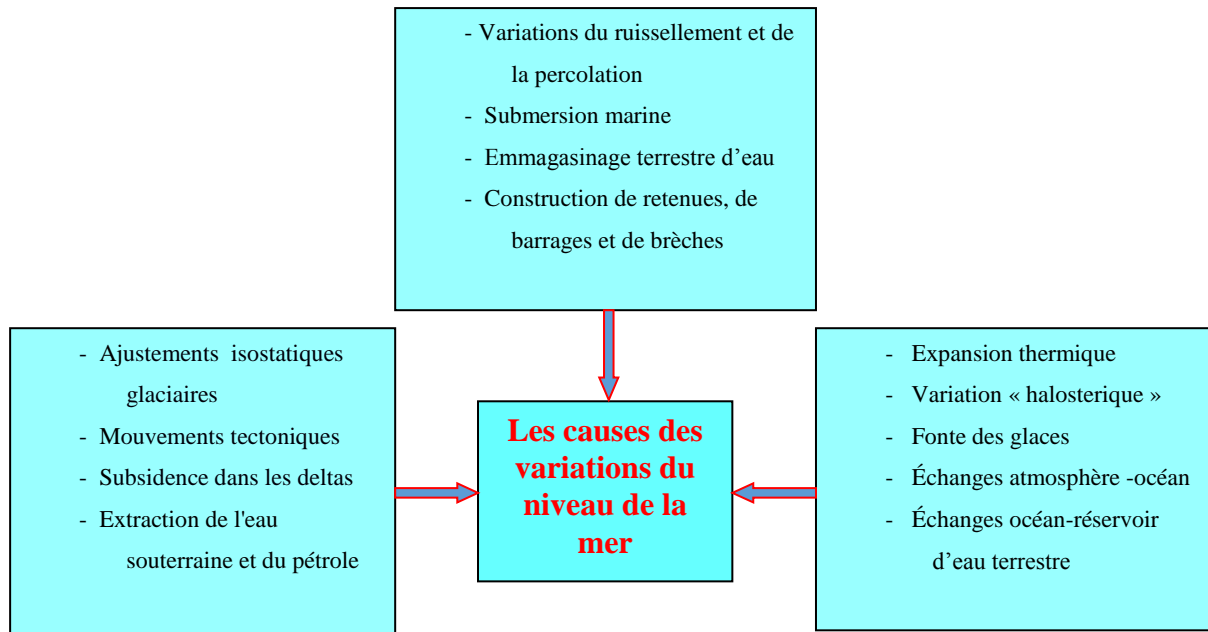


Figure 1.3 : Schéma récapitulatif des causes de variations du niveau de la mer.

1.2 Conséquences des variations actuelles du niveau de la mer et les techniques d'adaptation

1.2.1 Conséquences

Les effets du changement climatique et de la montée des eaux sont encore très difficiles à prévoir, mais les aspects les plus frappants restent :

- l'accélération de l'érosion côtière ;
- l'avancée de la langue d'eau salée ;
- les submersions marines plus fréquentes ;
- la réduction des terres agricoles à cause de la salinisation des terres, qui entraîne la baisse des rendements agricoles et accentue la pauvreté ;

- la salinisation des eaux de surface et des nappes qui affecte la qualité et la disponibilité de l'eau douce sur le littoral et accroît les risques de conflits d'usages;
- les migrations des populations d'une zone à une autre ou d'un pays à un autre.

1.2.2 Techniques d'adaptation

Tous les phénomènes liés à la montée des eaux impactent directement le vécu et l'avenir des populations vivant près des côtes et les obligent à s'adapter. Cette adaptation se fait essentiellement à trois niveaux: au niveau local, étatique et international et se présente sous trois aspects :

- l'adaptation à court terme : il s'agit d'une organisation au niveau local avec l'implantation de digues ou la restauration des digues traditionnelles comme les mangroves qui sont des arbres capables de vivre dans des eaux chaudes, salées et peu profondes qui permettent d'atténuer l'effet des vagues, les filaos et cocotiers, l'élévation des habitations, et la protection des terres agricoles contre la salinisation causée par les submersions marines par la construction de barrages de sels.
- l'adaptation à long terme : Il s'agit là d'une organisation au niveau étatique et international à travers une meilleure occupation des sols, la migration des populations impactées, une étude plus rigoureuse de l'implantation des infrastructures ou la réalisation de brèches pour évacuer les eaux en période de crue qui est souvent très critiquée en raison de ses impacts sur l'écosystème et sur le régime hydrologique, mais également à travers une politique de transition vers les énergies propres.
- les outils d'adaptation sont principalement les financements, les taxes sur le carbone, la sensibilisation, les fonds vert et les organisations internationales qui luttent contre le changement climatique comme la COP 21 et le GIEC.

Chapitre 2 Méthodologie d'étude des variations actuelles du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines

Il s'agira dans ce chapitre, de définir la méthode de recherche : identifier les différentes techniques de mesures des variations actuelles du niveau de la mer, présenter notre zone d'étude, les données utilisées et décrire le traitement des données.

2.1 Méthode

2.1.1 Techniques de mesures des variations actuelles du niveau de la mer

Il y a pratiquement deux moyens pour mesurer les variations du niveau de la mer : les marégraphes utilisés depuis la période postindustrielle, de 1750 à nos jours et les satellites altimétriques mis en service depuis 1990.

2.1.1.1 Marégraphes

Les oscillations du niveau de la mer dues à l'attraction de la Lune et du Soleil sur la Terre communément appelées la marée océanique sont les manifestations les plus remarquables des variations du niveau de la mer. Les enregistrements marégraphiques qui sont disponibles dans les ports depuis deux siècles destinés à établir « les annuaires de marée » pour faciliter la navigation maritime ont fourni de longues séries temporelles permettant de faire une première évaluation des variations du niveau de la mer au cours du XX^{ème} siècle. Les premières estimations furent basées sur l'utilisation des mesures obtenues sur un lot de vingt-sept (27) marégraphes, repartis dans dix (10) régions, choisis pour leur longueur temporelle supérieure à soixante-dix (70) ans dans le but d'estimer la hausse séculaire (hausse du siècle passé) du

niveau de la mer (*Douglas 2001*). Ces derniers révèlent une tendance à la hausse du niveau de la mer de 1,71 mm +/- 0,5 mm/an.

- Principe de mesure marégraphique : le signal de la marée est filtré puis enlevé pour accéder au niveau moyen de la mer. Ensuite la moyenne du niveau de la mer est calculée pour éliminer les variations thermiques saisonnières et obtenir la variation interannuelle du niveau de la mer en un point donné.
- 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, parce 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 (2.1) 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. 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).

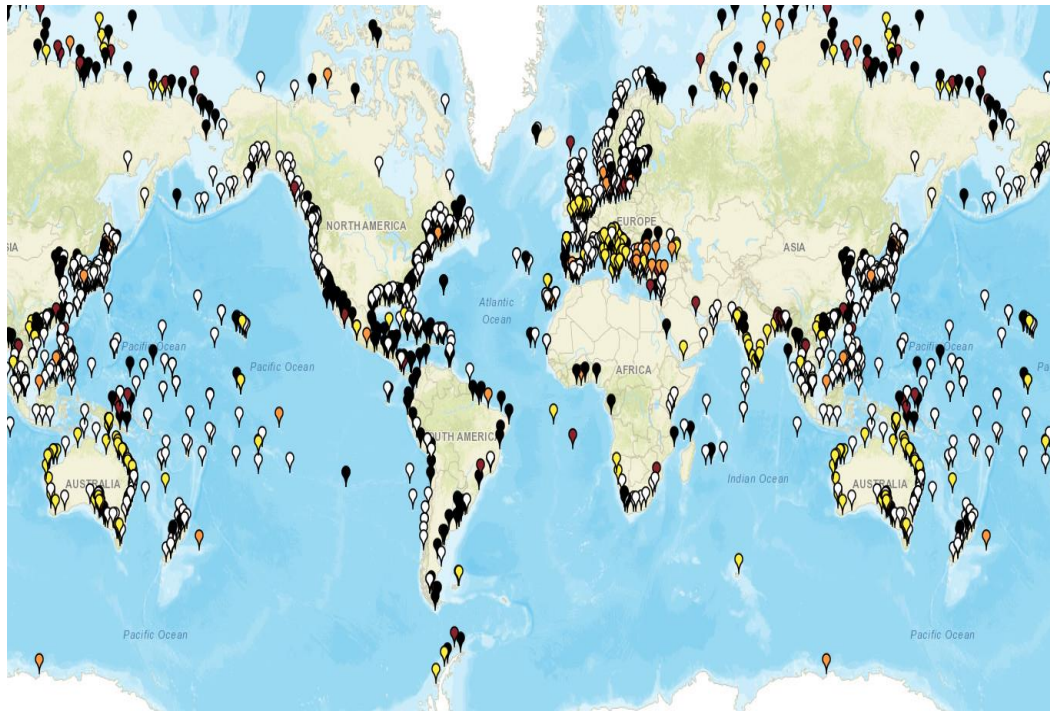


Figure 2.1: Répartition des marégraphes à travers le monde **Source:** Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL).

2.1.1.2 Satellites altimétriques

Depuis trois décennies, les satellites altimétriques de haute précision notamment les missions Topex/Poseidon (T/P), Jason-1/2 (J1/J2), ERS-1/2 et Envisat sont mis en service et permettent ainsi de suivre avec une très grande précision les variations du niveau de la mer.

- Principe de la mesure altimétrique: 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 de la mer. Il reçoit en retour l'écho radar : le signal réfléchi par la surface de l'océan. 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 distance (R) entre le satellite et la surface de l'océan est déduite de la multiplication de la durée du trajet par

la vitesse de la lumière (vitesse de propagation des ondes électromagnétiques $C = 3.10^8$ m/s). Cependant le signal peut être ralenti durant sa traversée de l'atmosphère par des effets météorologiques tels que le taux d'humidité, de sécheresse et d'ionisation. Ainsi la distance (R) entre le satellite et la surface de l'océan est calculée par la formule (4) ci-dessous après avoir appliqué les corrections nécessaires pour prendre en compte ces phénomènes physiques.

$$R = C * T / 2 \quad (4)$$

L'objectif est de déterminer le niveau de la mer par rapport à un référentiel terrestre. Les surfaces de référence terrestres étant l'ellipsoïde de référence (qui est la forme la plus proche de la forme 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 »). Les satellites sont localisés par plusieurs méthodes. 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 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. Le niveau de la mer (H) est ensuite obtenu comme indiqué par l'équation (5) ci-dessous après toutes les corrections nécessaires, en faisant la différence entre l'orbite (S) du satellite et la distance (R) satellite – surface de l'océan. Les mesures altimétriques faites avec les différentes missions citées précédemment montrent que le niveau moyen de la mer s'est élevé de 3,4 mn/an +/- 0,4 mm/an entre 1993 et 2016 (figure 2.3).

$$H = S - R \quad (5)$$

- 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.
- 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.

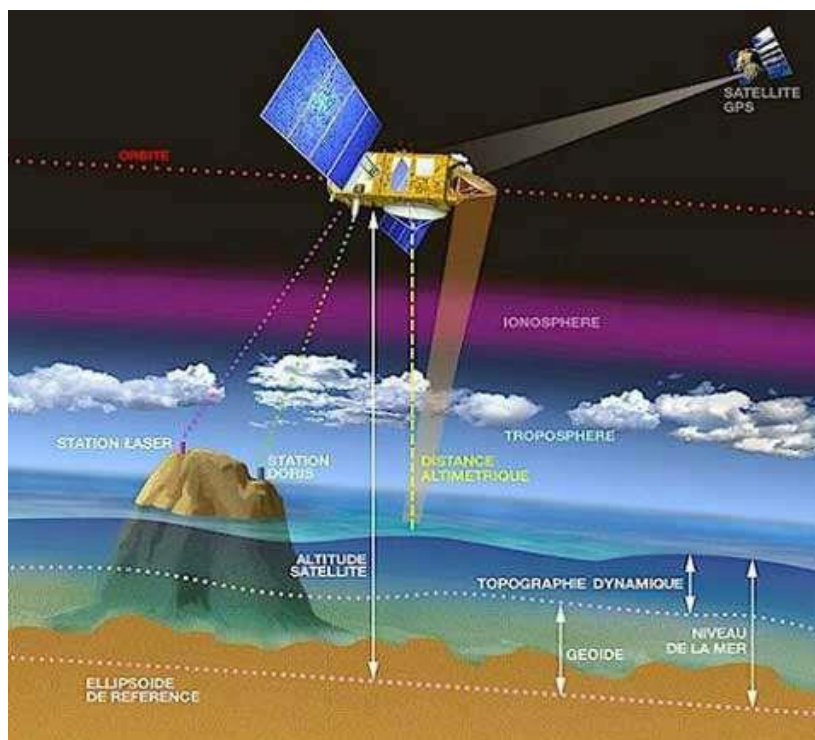


Figure 2.2 : Principe de la mesure altimétrique du niveau de la mer *Source*: CNES

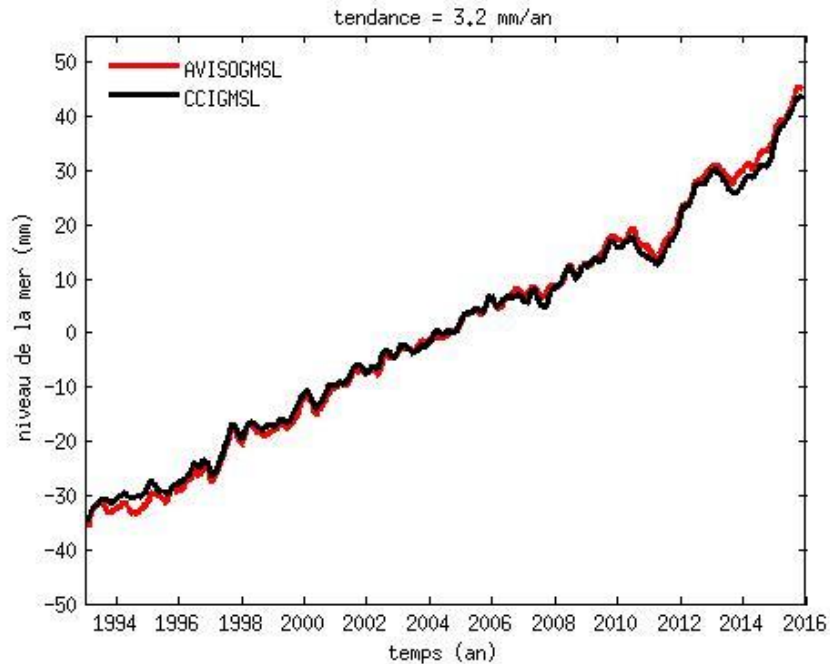


Figure 2.3 : Variations interannuelles du niveau moyen global de la mer issues des données de CCI-ESA (courbe noire) et AVISO (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois (03) mois.

2.1.2 Présentation de la zone d'étude

Le domaine d'étude couvre l'Afrique de l'Ouest soit la partie de l'Atlantique tropical incluse dans la fenêtre géographique suivante ($0^{\circ}\text{N} - 35^{\circ}\text{N}$; $40^{\circ}\text{O} - 10^{\circ}\text{E}$), comme représenté sur figure 2.4 ci-dessous.

Le climat dans la zone est tropical sec, le littoral s'étend sur près de 15 000 km et est constitué en grande partie d'estuaires et de plages. La topographie de la région est plate avec une altitude inférieure à 300 m et la majeure partie des reliefs se situe vers le Sud. La zone est aussi caractérisée par une variation spatiale nette de la pluviométrie qui est croissante du Nord vers le Sud. Une autre particularité est qu'elle est située dans les tropiques où la température

moyenne annuelle est de 23,5°C, ce qui fait que les particules d'eaux océaniques de surface sont suffisamment réchauffées.

Dans ce qui suit, nous étudierons d'abord l'Afrique de l'Ouest de manière globale, puis nous diviserons la région en quatre blocs représentatifs des quatre zones climatiques de l'Afrique de l'Ouest en prenant comme critère les cumules pluviométriques (*L'HOTE Yann, MAHE Gil (1996)*). Nous allons faire également une étude de cas sur le Sahel en le divisant en trois blocs (sud Mauritanie, nord Sénégal et sud Sénégal) afin de voir s'il existe une variabilité sous régionale des variations actuelles du niveau de la mer qui est en corrélation avec les cumules pluviométriques. Les quatre blocs retenus sont :

- La zone Afrique subsaharienne (approximativement 18°N-35°N avec une pluviométrie annuelle < 200 mm) ;
- Le Sahel (approximativement 12°N-18°N) avec une pluviométrie comprise entre 200 mm et 600 mm);
- La zone soudanienne (approximativement 8°N-12°N, avec une pluviométrie annuelle comprise entre 600 mm et 1200 mm) ;
- Le Golfe de Guinée (approximativement 0°N-8°N, avec une pluviométrie annuelle > 1200 mm).

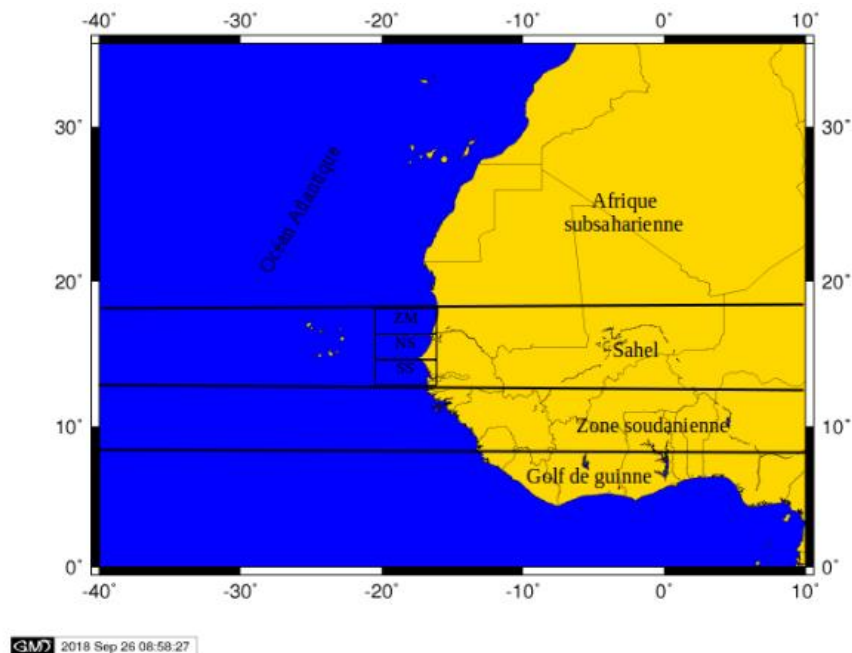


Figure 2.4 : Localisation de la zone Afrique de l’Ouest avec les différentes zones climatiques retenues.

2.1.3 Description et traitement des données utilisées

2.1.3.1 Description

Pour mener à bien ce travail les données marégraphiques du PSMSL et les données altimétriques CCI fournies par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) validées dans la thèse de *Dieng (2017)* et celles du « Collecte Localisation Satellites » (CLS/AVISO) sont utilisées. Ces satellites combinent les observations des missions Topex/Poseidon, Jason-1/2, ERS-1/2 et Envisat sur la période 1993-2016. Ces produits finis sont disponibles sur leurs sites respectifs. Les données marégraphiques utilisées sont journalières. Les données altimétriques sont mensuelles, ont une résolution spatiale de cent (100) km et permettent d’avoir les tendances moyennes de variations du niveau moyen de la mer avec une précision de 0,4 mm/an (*Albain et al. 2009,2015*).

2.1.3.2 Traitement

Le traitement s'est fait avec les grilles GMSL des différents centres de traitement de données altimétriques cités précédemment. D'abord à l'aide du logiciel Google Earth nous avons délimité les différentes zones retenues dans la figure 2.4. Ensuite avec le logiciel Matlab 2013, des masques ont été appliqués sur la grille GMSL de ESA à chaque fois pour créer la carte de séries temporelles de la zone considérée, puis nous avons :

- calculé la moyenne spatiale de la carte de séries temporelles ;
- Supprimé les cycles saisonniers ;
- Fait un lissage sur trois mois avec la méthode des moyennes mouvant;
- calculé les tendances de la grille et la tendance moyenne annuelle ;
- enfin tracé la variation interannuelle du niveau moyen de la mer.

Le même principe de traitement a été utilisé avec les données marégraphiques. La carte de tendance quant à elle est obtenue avec le logiciel GMT5 (Generic Mapping Tools) après avoir calculé la tendance linéaire sur la période altimétrique en chaque point de grille avec le logiciel Matlab 2013. Un lissage spatial est également fait.

Chapitre 3 : Résultats et discussions

Sur ce chapitre, nous allons étudier les fluctuations régionales, sous régionales et locales ainsi que la variabilité spatiale de la hausse du niveau de la mer durant ces trois dernières décennies près des côtes Ouest africaines.

3.1 Résultats et discussions

3.1.1 Variations interannuelles du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines (1993-2016)

La figure 3.1 montre les fluctuations interannuelles du niveau moyen de la mer près des côtes Ouest africaines en utilisant les données CCI-ESA (courbe noire) et à l'échelle globale en utilisant les données CLS/AVISO (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois mois. La figure 3.1 montre de fortes fluctuations interannuelles du niveau de la mer dans la région Ouest africaine sur la période 1993-2016 avec des pics du niveau de la mer assez importants qui apparaissent pendant certaines années. Sur la période de 24 ans (1993-2016), il est observé six (06) pics importants du niveau de la mer soit une période d'occurrence d'environ trois à quatre ans de ce phénomène. Entre 1993 et 2005, il est régulièrement constaté tous les trois ans un pic du niveau de la mer. Puis une baisse du niveau de la mer est observée sur la période 2006-2009. Entre 2010 et 2011 un pic très remarquable est observé alors que durant cette période le niveau de la mer global avait baissé. Un pic du niveau de la mer important est également noté en 2013. La tendance globale des variations actuelles du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines est de 3,31 mm/an soit une montée d'environ 7,9 cm sur la période 1993 - 2016. Cette tendance bien qu'inférieure à la

tendance mondiale actuelle qui est de 3,4 mm/an est inquiétante s'il doit se poursuivre dans ce contexte de réchauffement climatique.

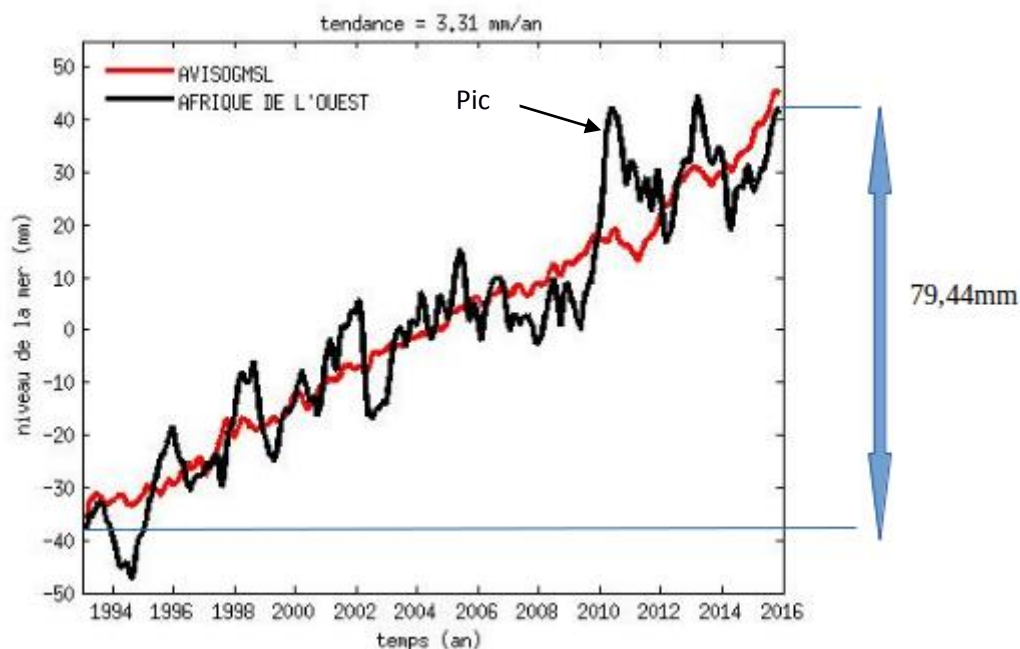


Figure 3.1 : Variations interannuelles du niveau moyen de la mer en Afrique de l'Ouest (courbe noire) et à l'échelle globale (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur (03) mois.

La figure 3.2 représente les fluctuations du niveau moyen de la mer en Afrique de l'Ouest en prenant en compte les signaux saisonniers. Elle montre une variabilité maximale du niveau de la mer en août en période de pleine saison des pluies et une baisse du niveau de la mer vers janvier en saison sèche sur toute la période altimétrique.

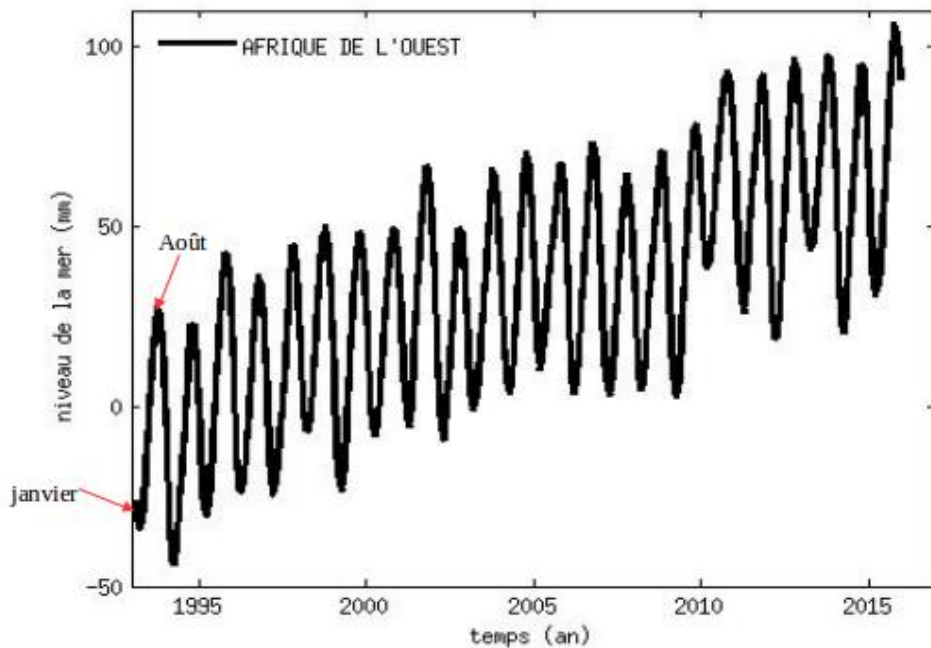


Figure 3.2 : Variation interannuelle du niveau moyen de la mer en Afrique de l'Ouest en prenant en compte les signaux saisonniers.

La figure 3.3 représente les fluctuations du niveau moyen de la mer en Afrique de l'Ouest après retrait de la tendance linéaire sur la période 1993–2016. Elle montre une succession d'anomalies positives et négatives sur toute la période qui atteste de fortes variations du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines. Des anomalies positives associées à une hausse du niveau de la mer sont notées environ tous les trois à quatre ans. Cependant les anomalies positives les plus remarquables sont constatées entre 2010 et 2011 et en 2013. Des anomalies négatives caractérisant une baisse du niveau de la mer sont observées également près des côtes Ouest africaines sur les périodes 1994-1995, 2002-2003 et 2006-2009. Cela nous amène à poser la question suivante : qu'est ce qui peut être à l'origine de ces fortes fluctuations du niveau moyen de la mer en Afrique de l'Ouest et de ces fortes anomalies notées durant certaines années? L'Afrique de l'Ouest est le siège d'une forte variabilité climatique qui est liée à une forte variabilité pluviométrique, aux modes de variabilité de l'Atlantique tropical (notamment le « mode équatorial » ou le Niño Atlantique et le « mode

dipolaire » ou mode inter-hémisphérique) et aux télé-connexions avec d'autres bassins tel que le Pacifique-Est. Cela nous incite à poser la question suivante : Quelles sont les influences des modes de variabilité de l'Atlantique tropical et des phénomènes ENSO sur les variations du niveau de la mer près des côtes de l'Afrique de l'ouest ?

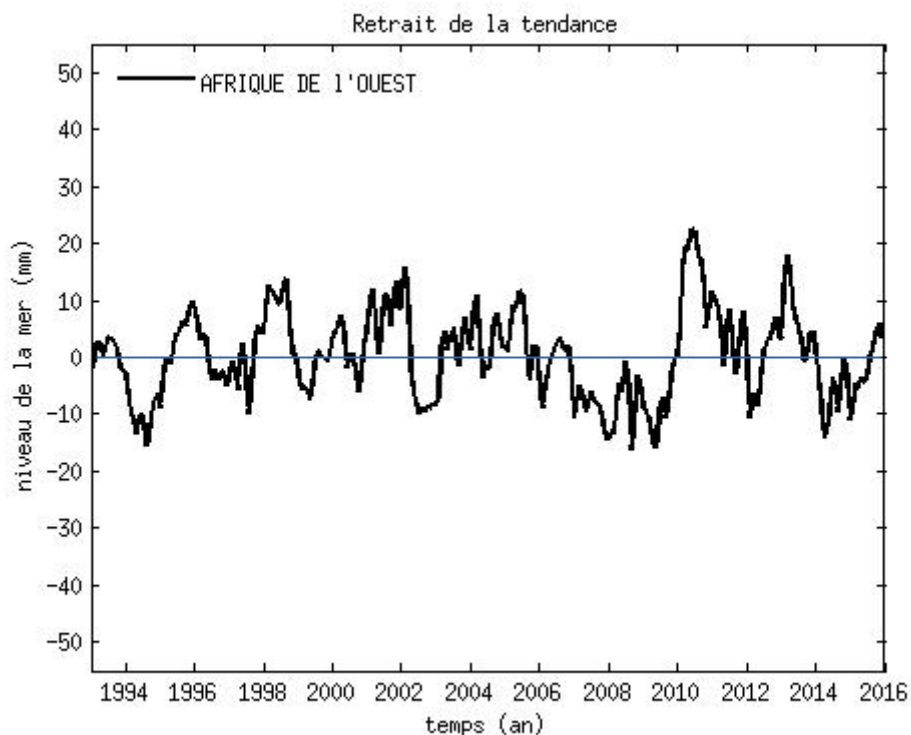


Figure 3.3 : Variation interannuelle du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest après retrait de la tendance linéaire sur la période de 1993-2016.

3.1.2 Variations spatiales du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines

La figure 3.4 représente les tendances de hausse du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest calculées à partir des données altimétriques CCI-ESA sur la période 1993-2016. Il est constaté à travers celles-ci qu'il n'y a pas de tendances négatives autrement une baisse du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest. La tendance générale est une hausse partout dans la région.

Cependant cette hausse n'est pas uniforme. La montée est plus forte en allant vers l'Equateur, mais également du littoral vers le large. Au niveau des côtes, les tendances maximales (supérieures ou égales à 3 mm/an) sont notées au niveau des côtes du Golfe de Guinée, des îles du Cap Vert, de la Mauritanie et du Sud du Sénégal qui constituent par conséquent les zones du littoral les plus impactées de la région.

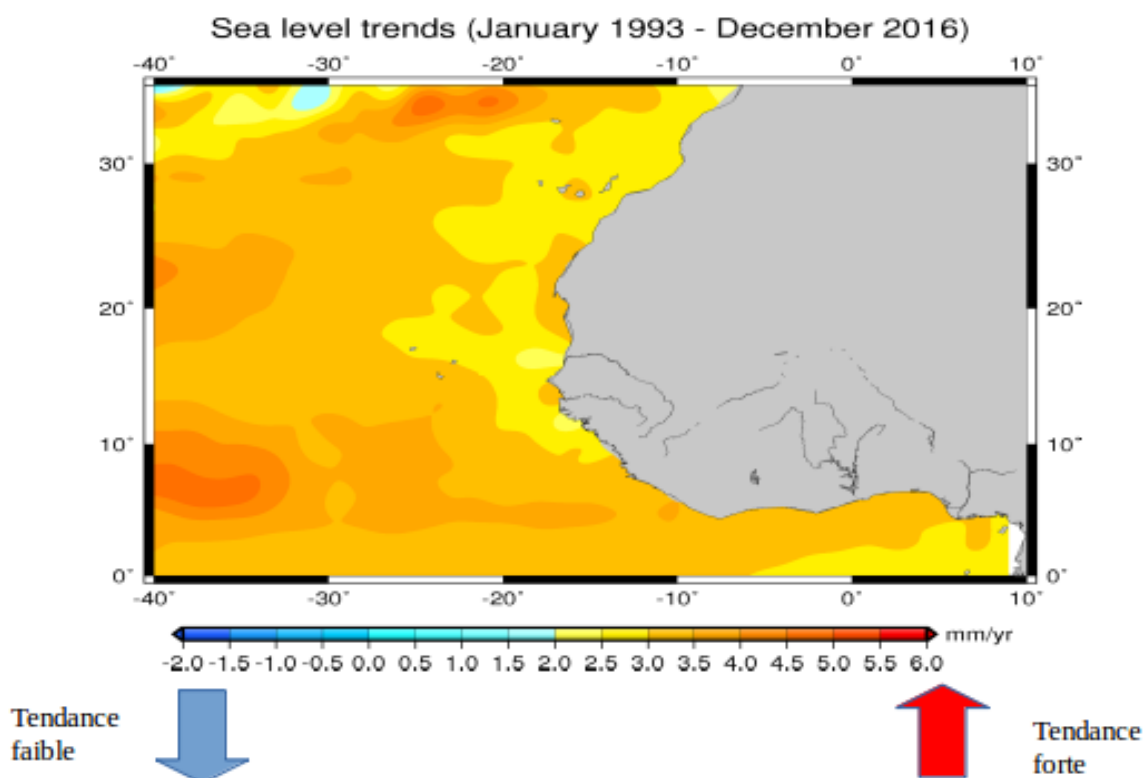


Figure 3.4 : Tendances du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest en mm/an calculées à partir des données altimétriques sur la période 1993-2016

3.1.3 Variations interannuelles du niveau de la mer des différentes zones :

Afrique subsaharienne, Sahel, zone soudanienne et Golfe de Guinée (1993-

2016)

La figure 3.5 représente les variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans les zones Afrique subsaharienne, Sahel, zone soudanienne, Golfe de Guinée (courbe noire) et à l'échelle globale (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois mois. Cette figure montre également de fortes fluctuations interannuelles du niveau de la mer dans tous les blocs. La courbe de l'Afrique subsaharienne montre des pics du niveau de la mer moins forts que ceux observés dans les autres blocs. Dans cette zone, contrairement aux autres blocs, il n'y a pas eu un pic du niveau de la mer entre 2010 et 2011 mais il y a eu un pic en 2013. La figure du Sahel montre sur toute la période quatre pics du niveau de la mer soit une période d'occurrence de ce phénomène d'environ cinq à six ans tandis que ceux du Golfe de Guinée et de la zone soudanienne montrent des pics plus régulièrement avec une période d'occurrence d'environ deux à trois ans. Il est également constaté que les tendances de hausse du niveau moyen de la mer ne sont pas uniformes dans les différents blocs. La tendance est de 3,11 mm/an en Afrique subsaharienne. La tendance en Afrique subsaharienne est moins forte que celle dans le Sahel (3,17 mm/an) et dans la zone soudanienne et le Golfe de Guinée (respectivement de 3,5 mm/an et 3,48 mm/an).

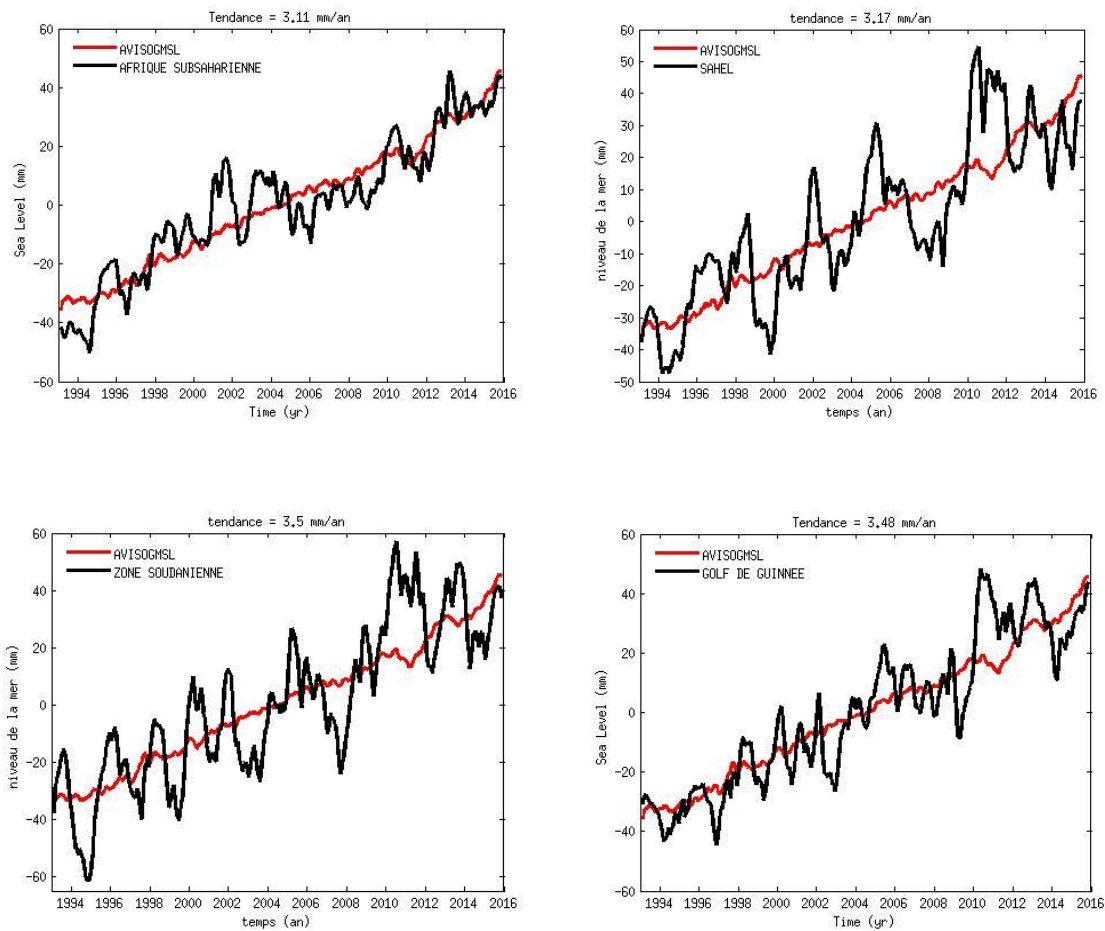


Figure 3.5 : Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans les zones Afrique subsaharienne, Sahel, Zone soudanienne, Golfe de Guinée (courbe noire) et à l'échelle globale (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois mois.

La figure 3.6 ci-dessous quant à elle représente les tendances moyennes annuelles de la hausse du niveau de la mer sur la période 1993-2016 en fonction des zones climatiques d'Afrique de l'Ouest. Les lettres A, B, C et D représentent respectivement les blocs Afrique subsaharienne, Sahel, Zone soudanienne et Golfe de Guinée. Les blocs Afrique subsaharienne et Sahel ont des tendances inférieures à la tendance régionale (3,31 mm/an) et à celle globale (3,4 mm/an) tandis que ceux du Golfe de Guinée et de la Zone soudanienne ont des tendances supérieures. Ceci montre une variabilité spatiale nette de la hausse du niveau de la mer qui est semblable à

la variabilité spatiale de l'expansion thermique en Afrique de l'Ouest, qui devient plus forte en allant vers le Sud puisque les eaux océaniques sont plus réchauffées en allant vers l'Equateur.

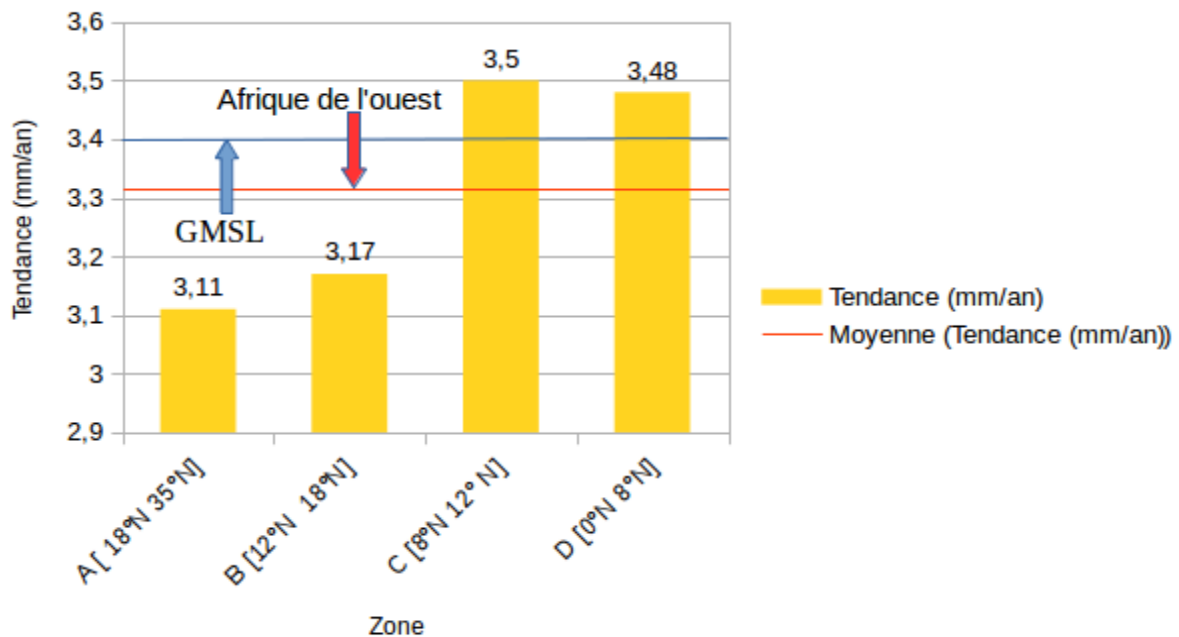


Figure 3.6 : Tendances du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques CCI-ESA sur la période 1993-2016 en fonction des zones climatiques de l'Afrique de l'ouest. Les lettres A, B, C et D représentent respectivement Afrique subsaharienne, Sahel, soudanienne et Golfe de Guinée.

3.1.4 Variation interannuelle du niveau de la mer près de la région du Sahel (1993-2016)

La figure 3.7 représente les variations interannuelles du niveau moyen de la mer dans le Sahel et dans trois zones du Sahel respectivement zone Mauritanie, Nord Sénégal et Sud Sénégal. Cette figure montre de fortes fluctuations interannuelles du niveau de la mer dans toutes les zones du Sahel qui sont plus fortes que celles observées précédemment dans la région du

Sahel et dans les différentes zones climatiques étudiées. En effet, la figure du Sahel montre pratiquement quatre pics du niveau de la mer sur la période étudiée alors que ces blocs montrent beaucoup plus de fréquence. Il est également constaté que les tendances de hausse du niveau moyen de la mer ne sont pas uniformes dans les différents blocs et sont toutes inférieures à celle du sahel (3,17 mm/an). La tendance est de 2,51 mm/an dans la zone Mauritanienne. La tendance dans la zone Mauritanienne est moins forte que celle dans le Nord Sénégal et le Sud Sénégal (respectivement de 2,71 mm/an et 2,9 mm/an).

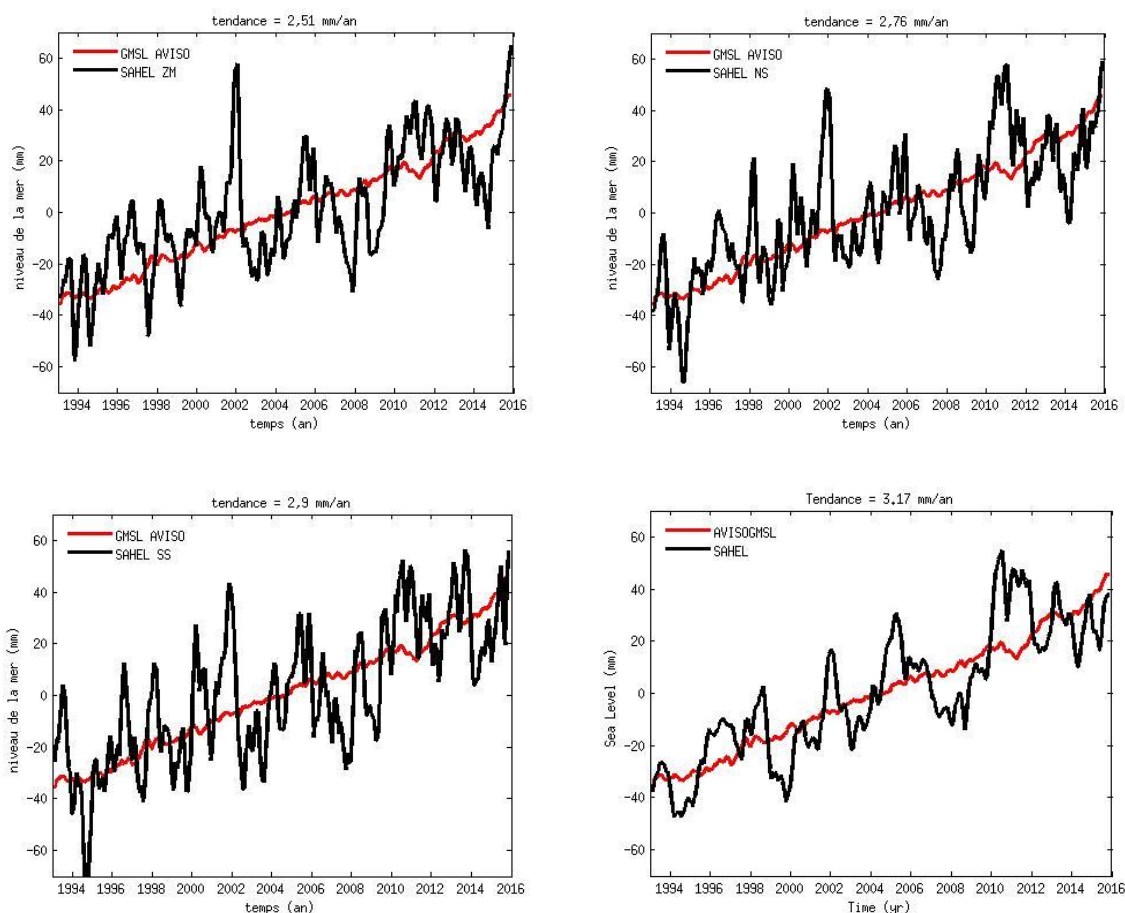


Figure 3.7 : Variations interannuelles du niveau moyen de la mer respectivement dans différentes zones du Sahel : zone Mauritanie, Nord-Sénégal et Sud-Sénégal (courbe noire) et à l'échelle globale (courbe rouge). Les signaux saisonniers sont filtrés et les courbes sont lissées sur trois mois.

La figure 3.8 représente les tendances moyennes annuelles de la hausse du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques ESA sur la période 1993-2016 en fonction des blocs respectifs : zone Mauritanie, Nord Sénégal et Sud Sénégal. Il est également constaté une variabilité spatiale nette de la hausse du niveau de la mer près des côtes au Sahel qui est en corrélation avec la variabilité spatiale de la pluviométrie et celle de l'expansion thermique.

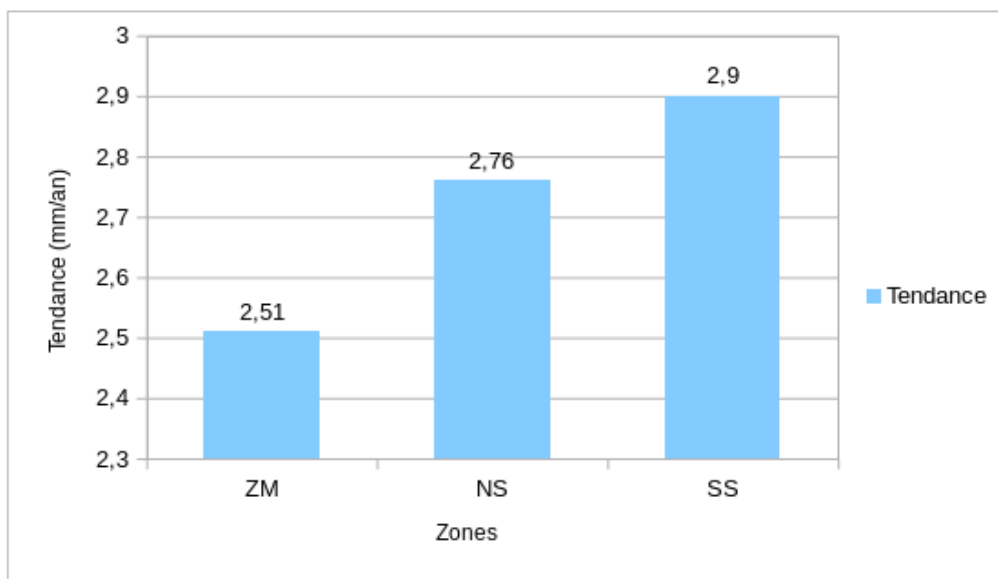


Figure 3.8 :Tendances du niveau de la mer en mm/an calculées à partir des données altimétriques CCI-ESA sur la période 1993-2016 dans la zone du Sahel, les notations ZM, NS et SS représentent respectivement les zones Mauritanie, Nord Sénégal et Sud Sénégal.

3.1.5 Variations interannuelles du niveau de la mer relatif à Dakar

Les variations interannuelles du niveau de la mer relatif à Dakar sur la période 1996-2001 sont représentées dans la figure 3.9. Il faut d'abord noter que les données marégraphiques ne

renseignent que sur la zone côtière et non sur la partie hauturière. La figure montre de fortes fluctuations du niveau de la mer et une hausse de 3,4 mm/an du niveau de la mer relatif à Dakar. Il est constaté une baisse du niveau de la mer entre 1996 et 1997, une stabilité entre 1997 et 1998. Ensuite un pic en 1999 et en 2001.

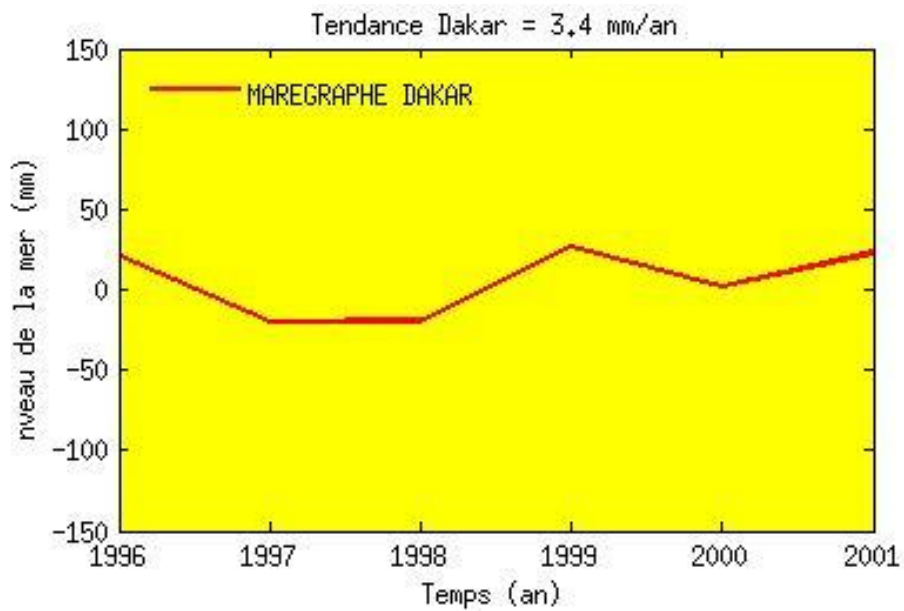


Figure 3.9 : Variations interannuelle du niveau moyen de la mer relatif à Dakar (1996-2001)

Conclusion et perspectives

En définitive, cette étude révèle une hausse incontestable du niveau de la mer sur toute la côte de l'Afrique de l'Ouest avec une tendance de 3,31 mm/an soit une montée du niveau de la mer d'environ 7,9 cm sur la période altimétrique 1993-2016 en réponse au réchauffement climatique d'origine anthropique. Il est également constaté des anomalies du niveau de la mer assez importantes certaines années. Néanmoins la montée des eaux dans la région se fait à un rythme variable du point de vue spatial. Elle est plus importante en allant vers le Sud dans la zone soudanienne et guinéenne où les tendances sont supérieures à celles régionale et globale. Cette augmentation du niveau moyen de la mer en Afrique de l'Ouest risque de s'accroître dans les années à venir, compte tenu de la poursuite des émissions de gaz à effet de serre et du processus de réchauffement climatique. Maintenant les questions légitimes qu'on peut se poser sont :

- Pouvons-nous empêcher la hausse du niveau de la mer sinon la ralentir ?
- Comment la réduction d'émission de gaz à effet de serre pourrait-elle atténuer ce phénomène ?

En se basant sur les scénarios les plus pessimistes des modèles de climat, la diminution d'émission de gaz à effet de serre n'arrêterait pas ce phénomène mais pourrait ralentir la vitesse de l'augmentation du niveau de la mer. En effet les concentrations de gaz déjà présentes dans l'atmosphère continueront à influencer le climat du siècle à venir. Il faut donc s'adapter. Ainsi les principaux défis à relever pour la communauté scientifique sont :

- la poursuite des observations spatiales et in situ pour disposer de séries temporelles longues afin d'améliorer les projections de la hausse future du niveau de la mer ;

- la multiplication des recherches sur les impacts côtiers de l'augmentation du niveau de la mer en tenant compte de la complexité des systèmes littoraux.

Nous espérons que cette étude contribuera à combler les nombreuses lacunes sur la connaissance des variations actuelles du niveau de la mer près des côtes Ouest africaines et participera à l'amélioration de la capacité de résilience et de gestion des problèmes afin de relever les défis du développement durable liés à celles-ci. Cependant, il serait bien de quantifier la contribution de chacun des facteurs qui influencent les variations du niveau de la mer observées dans la région notamment la part de l'expansion thermique, d'étudier les mécanismes qui les relient mais également les effets des modes de variabilité régionale, des phénomènes ENSO de même que les impacts des facteurs anthropiques directs comme l'urbanisation et l'évolution démographique.

Références bibliographiques

- ❖ Ablain M., Cazenave A., Valladeau G. and 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), p193–201.
- ❖ Antonov J. I., Levitus S. and Boyer T. P 2002. « Steric sea level variations during 1957-1994: Importance of salinity. » *Journal of Geophysical Research*, doi: 200210.1029/2001JC000964, p107-114.
- ❖ Cazenave, A., Dieng H. B., Munier S., Henry O., Meyssignac B., Palanisamy H. et Llovel W. 2012. « L'influence d'El Niño et de La Niña sur le niveau de la mer » *La Météorologie* - n° 79 – novembre, p34-39.
- ❖ Cazenave, 2016. « la hausse du niveau de la mer : observations et projection », *chimie et changement climatique*, p105-102.
- ❖ Cazenave, 2013. « Hausse du niveau de la mer et impacts côtiers », *La lettre du Collège de France* Décembre 2013, <http://journals.openedition.org/lettre-cdf/1509>.
- ❖ Dieng H. B., 2017. « Variations actuelles du niveau de la mer » Thèse de doctorat : Université Paul Sabatier - Toulouse III, p284.
- ❖ Douglas, B. C., Bruce M. S. K., Douglas C., and Leatherman S. P., 2001. Chapter 3 « sea level change in the era of the recording tide gauge, in *Sea Level Rise History and Consequences* », vol. 75, Academic Press, p37–64.
- ❖ Faye I. B. N. 2010. « Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-

interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes ». Thèse de doctorat : Université de Bretagne Occidentale, p322.

- ❖ Giannini, A., John C. H., Chiang, M. A., Cane, Y. Kushnir, and Seager R. 2001 « the Enso teleconnection to the tropical atlantic ocean: contributions of the remote and local sst to rainfall variability in the tropical americas » Lamont-doherty earth observatory, columbia university, palisades, new York journal of climate volume 14 , p4530-4544.
- ❖ GIEC, 2014. « Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. » GIEC, Genève, Suisse, p161.
- ❖ Hisard P. 1990. « Hydro Variabilité des précipitations dans l'Atlantique tropical sud-est pendant un El Niño » col. 5, n,O 2, p87-104.
- ❖ Illig S., 2005. « Variabilité basse fréquence de l'Atlantique Tropical: Rôle de la dynamique océanique équatoriale et Influence d'El Niño Southern Oscillation » Thèse de doctorat : Université Paul Sabatier - Toulouse III, p187.
- ❖ Joly, Mathieu and Voltaire. A. 2009. « Influence of ENSO on the West African Monsoon: Temporal Aspects and Atmospheric Processes. » Journal of Climate. 22.. 10.1175/2008JCLI2450.1., p3193-3210.
- ❖ Kouassi, A., Assamoi P., Bigot S., Diawara A., Schayes G., Yoroba F. et Kouassi B., 2010. « étude du climat ouest-africain à l'aide du modèle atmosphérique régional M.A.R. » Journal de l'association international de climatologie, vol. 7.

- ❖ L'Hote, Y. et Mahé G. 1996. « Afrique de l'ouest et centrale : précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989) = West and central Africa : mean annual rainfall (1951-1989) ». Paris : ORSTOM, non paginé.
- ❖ Le Lay M. & Galle S. 2005. « Variabilités interannuelle et intrasaisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien / », Hydrological Sciences Journal, 50:3, -524, DOI: 10.1623/hysj.50.3.509.65029
- ❖ Le Treut 2003. « Les scénarios globaux de changement climatique et leurs incertitudes Global scenarios of climate change and associated uncertainties » (Laboratoire de météorologie dynamique, institut Pierre-Simon Laplace, CNRS, université Pierre-et-Marie Curie, 4, place Jussieu, case 99, 75252 Paris cedex 05, France) Comptes rendus - Géoscience, 2003, Volume 335, Issue 6, p525-533.
- ❖ Llovel, 2010. « Hausse du niveau de la mer: impact du changement climatique global », Thèse de doctorat : Université Paul Sabatier - Toulouse III, p234.
- ❖ Llovel, W., Guinehut S., Cazenave A., 2010. « Regional and interannual variability in sea level over 2002-2009 based on satellite altimetry, Argo float data and GRACE ocean mass, Ocean Dynamics » vol. 60, p1193-1204.
- ❖ Llovel, W., Becker M., Cazenave A., Jevrejeva S., Alkama R. Decharme, B., Douville H., Ablain M. and Beckley B., 2011. « Terrestrial waters and sea level variations on interannual time scale, Global and Planetary Change », vol. 75, p76-82.
- ❖ Merle, Jacques 1980. « Variabilité thermique annuelle et interannuelle de l'océan Atlantique équatorial Est. L'hypothèse d'un « El Niño » Atlantique », OCEANOLOGICA ACTA, VOL. 3- No 2, p209-220.

- ❖ Meyssignac B., 2012. « La Variabilité Régionale du Niveau de la Mer » Thèse de doctorat : Université Paul Sabatier - Toulouse III, p357.
- ❖ Merle, Jacques 2007. « Quel est le rôle de l'océan dans le changement climatique anthropique? », Commentaires sur les résultats présentés dans le 4ème rapport du GIEC.
- ❖ Lombard, 2005. « Les variations actuelles du niveau de la mer : Observations et causes », Thèse de doctorat: Université Paul Sabatier - Toulouse III, p160.
- ❖ Lombard, 2006. « Les variations actuelles du niveau de la mer: observations et causes climatiques » La Météorologie - n° 59 - novembre 2007, p13-21.
- ❖ Radic V. and Hock R. 2010. « Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. Journal of Geophysical Research., doi:201010.1029/2009JF001373,p115-124.

Sites Internets

- ❖ MSLA: Aviso+ (Types of dataset: Ssalto/Duacs multimission altimeter products. Contents: multimission gridded sea surface heights computed with respect to a twenty-year mean).
- ❖ <http://www.psmsl.org/data/> (site principal pour tous les marégraphes mondiaux : PSMSL
<http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/RCCs.html> (centres climatologiques régionaux de l'OMM).
- ❖ 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_home_en.html (suivi EL Niño)
- ❖ www.institut-ocean.org (l'actualité de l'Institut océanographique)

- ❖ www.databank.worldbank.org (Banque mondiale, Indicateurs de développement mondial)
- ❖ http://unctadstat.unctad.org/ReportFolder//reportFolder.aspxsCS_referer=&sCS_ChosenLang=fr (CNUCED – Statistiques en ligne de la CNUCED)
- ❖ http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm www.undp.org (Nations-Unies, World Population prospects, département des affaires économiques et sociales).