



Rapport de Stage

Evolution long terme des composantes du niveau de la mer à Dakar (niveau moyen, ondes de marée, résidus météorologiques)

Du 1^{er} avril au 28 mai 2010 (prolongé jusqu'au 30 juillet 2010)

Responsable : Guy WÖPPELMANN



Avant-propos / Remerciements

J'ai effectué mon stage au sein de l'Unité Mixte de Recherche 6250 LIENSs (LIttoral, ENvironnement et Sociétés) de l'université de La Rochelle. Cette UMR regroupe une soixantaine d'enseignants-chercheurs et chercheurs, une vingtaine de personnels administratifs et techniques, et accueille une soixantaine de doctorants. Leur objectif principal consiste à développer les interfaces entre disciplines autour d'une problématique commune, le littoral.

Les Chercheurs sont répartis en 6 équipes :

- Approche Géographique : Iles, Littoraux, Environnement (AGÎLE)
- Dynamique Physique du Littoral (DPL)
- DYNAMIQUE Fonctionnelle des Ecosystèmes côtiers Anthropisés (DYFEA)
- Réponses des animaux MARins à la variabilité Environnementale (AMARE)
- Molécules à Activités Biologiques (MAB)
- BIotechnologie ENvironnementale (BIEN)

L'équipe DPL, est l'équipe qui m'a accueillie en stage, et a pour objectifs de comprendre les réponses actuelles et passées des environnements côtiers aux perturbations naturelles et anthropiques. Aussi, elle cherche à regrouper des compétences complémentaires qui visent à mieux comprendre la dynamique physique des littoraux en s'attaquant à la fois au fonctionnement hydrodynamique et morphologique des systèmes côtiers et aux changements environnementaux récents qui modifient ces systèmes : les variations absolues (géocentriques) et relatives du niveau de la mer, les changements climatiques et la pression anthropique croissante.

Cette équipe se divise en trois axes de recherche, l'étude du niveau marin et des mouvements verticaux de la croûte terrestre, de la dynamique sédimentaire et hydrodynamique des environnements, et de la mémoire des sédiments marins et des sols. Mon stage fait parti du premier axe de recherche (niveau marin et mouvements verticaux) qui a pour but de quantifier de façon précise les variations relatives et absolues, actuelles à séculaires, du niveau de la surface marine à la côte. Cette équipe est en collaboration avec de nombreux centres, comme le SHOM (Brest), le LEGOS (Toulouse), et le POL (Liverpool) par exemples.

Je tiens à remercier Guy Wöppelmann, enseignant chercheur au laboratoire LIENSs, pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce sujet très intéressant qu'est l'étude du niveau de la mer à partir de données historiques. Je remercie aussi ses deux doctorants, Thomas Gouriou et Camille Letetrel pour leur soutien et leur aide, ainsi que toute l'équipe DPL.

Je remercie aussi, le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), pour leur accueil et leur aide concernant la recherche d'archives, notamment Nicolas Pouvreau et Ronan Créach, ainsi que les autres personnes travaillant aux archives du SHD (Service Historique de la Défense) de Rochefort pour leur accueil.

Table des matières

Avant-propos / Remerciements.....	2
I. Introduction.....	4
II. Les données.....	5
1) Méthodologie.....	5
2) Résultats.....	6
III. Contrôle qualité.....	6
1) Méthodologie.....	6
2) Résultats.....	7
IV. Etude de l'évolution des harmoniques de marée.....	8
1) Méthodologie.....	8
2) Résultats.....	9
V. Discussion et perspectives.....	11
Références.....	13
Annexes.....	14
1) Annexe 1 : présentation des 7 stations d'Afrique ayant une période d'enregistrement de la marée supérieure à 40 ans.....	14
2) Annexe 2 : Premier inventaire listant des données marégraphiques à Dakar.....	15
3) Annexe 3 : Inventaire de toutes les données connues de nos jours.....	16
4) Annexe 4 : Situation du site du marégraphe de Dakar.....	17

I. Introduction

Les domaines côtiers représentent des environnements physiques parmi les plus changeants de la planète, près des deux tiers des côtes mondiales sont en voie de recul, en partie à cause de l'élévation séculaire du niveau de la mer (Zhang et al. 2004).

Les zones littorales qui présentent un enjeu et une importance majeure pour l'homme, sont menacées par trois forçages principaux qui évoluent tels que la remontée du niveau de la mer ou la pression anthropique. La quantification précise des variations relatives et absolues, actuelles à séculaires, du niveau de la mer est un enjeu environnemental majeur dans le contexte actuel du changement climatique. En effet, il est important de continuer à observer le niveau marin pour bien déterminer la marée, alors que c'est un phénomène bien connu de l'homme et que l'on sait expliquer, pour des besoins dans l'ingénierie par exemple, pour la réalisation d'un réseau d'alerte aux tsunamis, pour la prédiction des marées, pour l'étude des surcotes/décotes, ou pour l'étude de l'évolution du niveau moyen de la mer.

Le signal de niveau de la mer qui est directement observé par les appareils de mesure peut se décomposer en trois composantes qui sont le niveau moyen, la marée astronomique, et le résidu dit météorologique mais qui comprend tous les effets autres, dont les effets météo (Simon 2007).

L'idée d'étudier le niveau moyen des mers dans le cadre du changement climatique vient en partie du fait qu'avec le réchauffement climatique, les océans se réchauffent, et par dilatation thermique, prennent du volume. On devrait donc retrouver ce signal dans l'évolution du niveau moyen des mers. De même, avec ce réchauffement, la fonte des glaces continentales doit se répartir dans les océans et avoir un impact sur ce niveau moyen. D'après le rapport du GIEC (2007) l'élévation du niveau de la mer concorde avec le réchauffement. Sur l'ensemble de la planète, le niveau moyen de la mer s'est élevé d'environ 3,1 mm/an en moyenne entre 1993 et 2003. On estime que, depuis 1993, l'élévation du niveau de la mer est imputable pour 57 % environ à la dilatation thermique des océans, pour 28 % environ à la fonte des glaciers et des calottes glaciaires et, pour le reste, à la rétraction des nappes glaciaires polaires (GIEC, 2007).

Aussi, plusieurs études, telle que celle réalisée par Ishii (2006) sur la dilatation thermique des océans et celle réalisée par Mitrovica (2001) sur l'impact de la fonte des glaces continentales, montrent une variabilité spatiale, sur le long terme, de l'évolution du niveau marin suivant chaque région du monde.

De nombreux chercheurs, tels que Douglas (2001) et Woodworth (2006), ont souligné et montré à plusieurs reprises l'importance de l'utilisation de très longues séries d'observations du niveau de la mer. Plusieurs centres à travers le monde dont le PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) collectent, archivent, gèrent et fournissent aux chercheurs cette inestimable banque de données.

Les observations du niveau marin sont indispensables pour travailler sur de multiples problématiques. Or, plus les données sont denses, complètes et précises, meilleurs sont les résultats obtenus (filtrage des fluctuations décennales et inter-décennales). D'où l'importance primordiale de rechercher des observations anciennes du niveau de la mer afin de densifier et prolonger les séries de mesures actuelles sans omettre de vérifier et contrôler leur qualité (Woodworth, 2006).

Ces études du niveau marin ont surtout été réalisées aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, car c'est dans ces régions que l'on retrouve les plus longues séries. En ce qui concerne le continent Africain, peu de longues séries sont disponibles et la qualité de ces données n'est pas toujours satisfaisante (Woodworth et al., 2007). Cependant, il existe au moins 7 stations en Afrique pour lesquelles on observe plus de 40 ans de mesures disponibles au PSMSL et qui sont répertoriées en annexe 1.

D'après une précédente étude réalisée par Wöppelmann et al. (2008), un important jeu de données datant du début du XXème siècle (1902 à 1920) existe pour la station de Dakar (Sénégal),

ce qui ferait de Dakar une des stations d'Afrique avec la plus longue série marégraphique. De par cette longue série, et le fait que Dakar se situe aux basses latitudes (zone où il existe peu de données), il apparaît très intéressant d'étudier de plus près cette série. De plus, toujours d'après cette première étude, les différentes références utilisées pour les marégraphes successivement installés dans le port de Dakar sont cohérentes entre elles, ce qui laisse supposer l'application rigoureuse des recommandations usuelles de la marégraphie (Simon, 2007), et par suite une qualité des données relativement bonne.

Ainsi plusieurs questions se posent, d'autant que l'étude de Wöppelmann et al. (2008) était préliminaire. Tout d'abord est-ce que l'inventaire décrit par Wöppelmann et al. (2008) est complet? Et, s'il existe d'autres jeux de données, sous quel format se trouvent-ils ? Quelle est leur qualité et la qualité des jeux de données disponibles ? Enfin, que peut-on tirer de ces données pour l'étude de l'évolution du niveau moyen marin, des composantes de la marée, ou encore des effets météo ?

Dans ce rapport, je vais donc essayer de répondre à ces différentes questions, en commençant tout d'abord par présenter la recherche de données historiques dans les archives (partie II), puis l'étude de la qualité des données (partie III). Enfin, dans les parties IV et V je discuterai des résultats obtenus et des perspectives pour la suite du stage que je poursuis encore pendant deux mois.

II. Les données

1) Méthodologie

Au début de mon stage, 3 jeux de données horaires étaient disponibles sous forme numérique, recouvrant plus d'un siècle de mesures (1902 à aujourd'hui) pour 51 années effectives :

- 1902 à 1920, jeu de données horaires retrouvé par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) à Brest
- 1942 à 1966, jeu de données horaires obtenu avec le SHOM (1958-1966) et les moyennes mensuelles présentes au PSMSL pour la période 1942-1966
- 1992 à aujourd'hui, jeu de données horaires avec quelques lacunes, obtenu grâce au SHOM, au PSMSL et aussi grâce à l'université de Hawaii

Cet inventaire correspond aux valeurs numériques utilisées pour la première étude en 2008. Cependant d'après l'inventaire de Pouvreau (2008), extrait dans l'annexe 2, il existerait dans les archives du SHOM à Brest et du SHD (Service Historique de la Défense) à Rochefort, plusieurs autres années disponibles sous forme de marégrammes ou de registres de marée. Il était donc nécessaire d'aller prospecter dans ces archives pour vérifier l'information et la préciser (disponibilité effective, format, etc.).

Deux missions ont été organisées pour se rendre aux différentes archives. Tout d'abord, ma première mission a été effectuée le 12 mai 2010 à Rochefort (SHD), où le but était de connaître exactement ce que contenaient les documents mentionnés dans l'inventaire de Pouvreau (2008). Ensuite, ma seconde mission s'est déroulée durant la semaine du 17 au 21 mai 2010 à Brest (SHOM). Cette fois-ci, cette mission était plus importante car elle consistait en la recherche de documents encore inconnus, ainsi qu'à l'analyse des différents marégrammes pour repérer les anomalies sur les courbes de marée (cf. partie III). Pour ce faire, j'ai photographié les marégrammes afin de les comparer avec les résultats issus des données numériques (cf. partie III). Pendant cette mission, j'ai également présenté lors d'une réunion de travail mon sujet de stage à quelques membres de l'équipe HDC (HydroDynamique Côtière) du SHOM. Cette réunion, très intéressante et instructive m'a permise de leur expliquer le but de ma présence dans leurs archives.

2) Résultats

Tout d'abord, concernant les archives du SHD de Rochefort, où se trouvent des informations pour la période 1936-1937, il existe des relevés diurnes tous les quarts d'heures, c'est-à-dire des relevés de hauteurs d'eau uniquement de jour. On peut donc supposer, vu que les mesures ont été prises pendant la journée, que ces relevés ont été réalisés à partir d'une échelle de marée (mire graduée permettant de lire des hauteurs d'eau au centimètre près), et non à partir d'un marégraphe (appareil enregistrant la marée), qui lui aurait des enregistrements sur 24 heures.

Aussi, lors d'une autre visite aux archives, cette fois à Brest dans les archives du SHOM, où l'on savait qu'ils se trouvaient de nombreux marégrammes originaux du premier jeu de données, de nombreuses autres informations ont été récoltées. Notamment, d'autres marégrammes pouvant compléter la série, ainsi que des documents manuscrits, décrivant les différents types d'appareils installés sur Dakar, tels que le marégraphe ou une station météo, ainsi que le bon fonctionnement ou non de ces appareils. J'ai aussi pu obtenir de nombreuses informations sur les différents repères utilisés pour déterminer le zéro de référence du marégraphe, ainsi que sur des missions de nivellement entre ces repères. A la suite de cette visite, un inventaire plus complet sur les marégrammes existant de Dakar au SHOM a pu être réalisé (Tableau 1), montrant le potentiel des archives. Ainsi, 19 nouvelles années ont été découvertes, complétant ainsi la série de Dakar, cependant ces nouvelles données restent encore sous format papier.

A la suite de ces deux missions, un autre inventaire comprenant toutes les données disponibles et connues à ce jour a été réalisé, en informant du lieu où sont disponibles ces données et sous quel format. Cet inventaire est présenté en annexe 3.

Années	Présentes au SHOM	Numérisées
1900 (2ème semestre)	*	
1902-1920	*	*
1930-1933	*	
1942-1945	*	Seul PSMSL
1952-1954	*	Seul PSMSL
1957 (2ème semestre)	*	
1958-1966	*	*
1967-1972	*	

Tableau 1: inventaire des marégrammes disponibles aux archives du SHOM. L'indication « seul PSMSL » indique que les données numérisées n'existent que sous forme de moyennes mensuelles ou annuelles.

Il est à noter que certaines valeurs ne sont disponibles que sur la base de données du PSMSL sous forme de moyennes. Or, le calcul de ces moyennes a forcément dû s'appuyer sur des données horaires déjà numérisées, cependant ces données restent introuvables, tandis que les marégrammes originaux existent.

III. Contrôle qualité

1) Méthodologie

A partir des jeux de données disponibles en format numérique, j'ai pu entreprendre un contrôle qualité dans l'objet de déterminer la confiance que l'on peut accorder à ces données dans une exploitation ultérieure. Pour cela une méthode éprouvée (Simon, 2007) consiste à calculer les résidus dits météorologiques, à savoir la différence entre observation et prédiction de la marée, à

représenter le résidu afin de l'examiner pour la recherche « d'anomalies ». Pour prédire la marée, il est tout d'abord nécessaire de déterminer les harmoniques de celle-ci à partir des données horaires, ce qui permet ensuite de calculer des hauteurs d'eau horaires prédites.

L'examen du résidu permet d'éliminer le signal de la marée qui est un signal important et qui cache les plus petites variations dépendant des phénomènes d'origine météo (ou autre) ou des erreurs dans les hauteurs d'eau, par exemple lors de la numérisation (passage du format marégramme au format numérique). Cette façon de représenter le résidu permet de repérer de nombreuses « anomalies ». Les marégrammes retrouvés dans les archives permettent en principe de conclure sur la nature de ces anomalies. Si elles correspondent à des erreurs de retranscription, elles vont pouvoir être corrigées. Cependant, certaines anomalies sont dues à des phénomènes naturels, tels que la présence d'une forte dépression ou d'un anticyclone. En effet, un anticyclone a un effet sur les hauteurs d'eau, car les hautes pressions « appuient » sur la surface de l'eau, ce qui a tendance à diminuer la hauteur d'eau (décotes). Et au contraire, une dépression, avec les faibles pressions « appuient » moins sur la surface de l'eau, ce qui a tendance à laisser s'élever le niveau d'eau (surcotes), c'est ce qu'on appelle l'effet du baromètre inverse (Simon, 2007).

Sachant, que l'on ne connaît pas la façon dont les jeux de données ont été numérisés, il s'est avéré important de retrouver les marégrammes originaux pour comparer les anomalies repérées grâce aux résidus avec ces marégrammes. Ainsi, je pouvais déterminer si chacune des anomalies correspond à un phénomène météo, dans ce cas les données sont conservées telles quelles, sinon, si les anomalies correspondent à une erreur de retranscription, celles-ci doivent être modifiées ou supprimées suivant le type d'erreur.

Deux méthodes ont été utilisées pour le calcul des harmoniques et de la prédiction de marée. Tout d'abord, j'ai travaillé avec un logiciel développé par le SHOM, MAS, permettant de calculer et prédire la marée avec un minimum de 15 jours de données horaires brutes de très bonne qualité. Cependant, plus on possède de données brutes de bonne qualité, plus la qualité du résultat sur les harmoniques, et donc sur la prédiction sera meilleure. Ensuite, pour la représentation du résidu, j'ai utilisé un script écrit en « Matlab » aussi développé par le SHOM, « surcote » (Goirand, 2008), permettant le traçage des résidus à partir des hauteurs horaires (observées et prédites par MAS) pour une visualisation sur une longue période.

Le second outil utilisé pour le calcul des harmoniques et de la prédiction des marées est un outil développé par Pawlowicz et al. (2002) en « Matlab » (T_tide) et amélioré par Leffler & Jay (2009), R_T_Tide. Durant mon stage, j'ai pu utiliser la dernière version de R_T_tide et représenter le résidu calculé à partir des harmoniques et des prédictions issues des calculs du logiciel. Le côté pratique de ce programme est qu'il fournit des barres d'erreur sur les harmoniques calculées.

2) Résultats

En ce qui concerne l'étude du résidu, les deux outils donnent sensiblement les mêmes résultats (voir partie IV), cependant, l'interface de « surcote » est plus agréable pour la visualisation des anomalies. C'est donc cet outil qui a été utilisé pour cette étude. De nombreuses anomalies ont été repérées, notamment une très importante en 1965 (Figure 1), déjà observée lors de la première étude en 2008. A cette époque, elle avait été définie comme un saut d'environ -22 cm.

Après observation des marégrammes aux archives, j'ai pu découvrir que le 24 septembre 1965 (jour du saut) le marégraphe est tombé en panne (Figure 2), et donc l'enregistrement s'est arrêté et n'a repris que le lendemain. Or, comme dans le fichier de données brutes il existe des données, elles ont donc été interpolées, ce qui induit l'importante anomalie observée. De plus, ce saut d'environ -22 cm a un effet sur environ 6 mois, on peut penser que ce décalage est dû au mauvais réglage du marégraphe après réparation de la panne, mais sans aucune certitude.

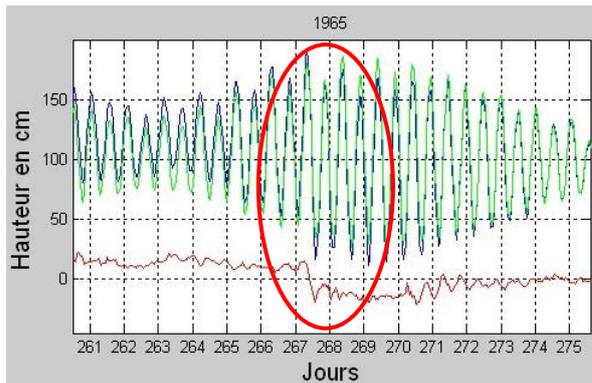


Figure 1 : Résidu du 18 septembre 1965 au 2 octobre 1965. Courbe bleu : valeurs observées ; courbe verte : prédites ; courbe rouge : résidu

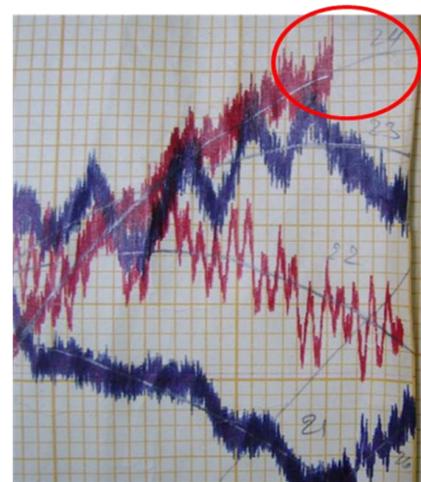


Figure 2 : marégramme de Dakar du 20 au 26 septembre 1965

L'observation des marégrammes aux archives a permis de lister les jours qui ont été interpolés et dont on possède des valeurs horaires numériques. Ils ont aussi permis de trouver d'autres sources d'erreurs, notamment des erreurs dues au mauvais calage de la feuille de marégramme sur le tambour du marégraphe, ce qui peut décaler la courbe par rapport aux axes et induire des décalages en temps ou en hauteur lors de la lecture des valeurs sur la feuille.

Toutes les anomalies repérées avec le résidu ne sont pas toutes dues à des interpolations de la courbe de marée ou à des mauvais calages de la feuille de marégramme, mais peuvent aussi être dues à des phénomènes d'origine naturelle, tels que le passage d'une tempête sur les côtes du Sénégal. Par exemple, le 9 novembre 1902 (Figures 3 et 4), une tornade a été indiquée induisant un fort vent de Nord-Est couplé à une forte houle, qui pousse l'eau vers le port de Dakar, ce qui induit une anomalie mesurée par le marégraphe. Un ensemble de cartes présentant la situation géographique de Dakar est en annexe 4 et permet de se rendre compte qu'un vent de Nord-Est est directement dirigé vers le port.

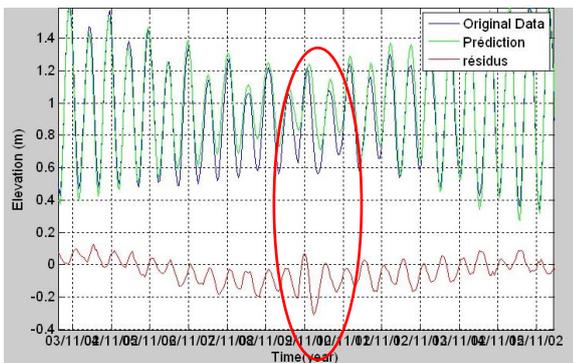


Figure 3 : Résidu du 2 novembre 1902 au 14 novembre 1902 (représentation "surcote"). Courbe bleu : valeurs observées ; courbe verte : prédites ; courbe rouge : résidu

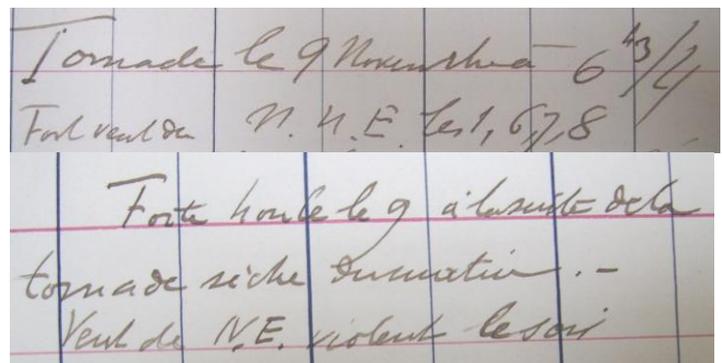


Figure 4 : Extraits des marégrammes couvrant du 1er au 17 novembre 1902

IV. Etude de l'évolution des harmoniques de marée

1) Méthodologie

Au cours du stage, je me suis intéressée à l'évolution des harmoniques de la marée à partir des données brutes, non corrigées. Cette étude sur les données brutes nous permet d'avoir une

première idée de l'évolution de ces harmoniques, mais aussi d'avoir une idée sur la qualité des données, puisque cette méthode m'a permis de relever des anomalies (Simon, 2007).

En ce qui concerne l'évolution des différentes harmoniques de la marée, je me suis intéressée principalement à l'onde semi-diurne M2, qui est l'une des principales ondes de marée. J'ai pu faire une première comparaison entre les deux outils que j'avais à ma disposition. Tout d'abord, MAS permet de calculer pour chaque année les différentes harmoniques à partir des données brutes horaires correspondant à l'année. Cette méthode de calcul, nous donne un fichier de sortie avec les caractéristiques des harmoniques (amplitude et phase), ce qui m'a permis de rassembler les caractéristiques de M2 dans un même fichier et de les représenter à l'aide d'un tableur.

Ensuite, j'ai calculé cette même harmonique à partir d'un script permettant d'obtenir des valeurs d'amplitude et de phase par fenêtre glissante avec leur barre d'erreur, à partir de R_T_tide. Le principe de la fenêtre glissante permet de mieux suivre l'évolution de l'onde, car une partie de la fenêtre chevauche la fenêtre qui précède. Les paramètres de fenêtres glissantes que j'ai utilisé sont une fenêtre de 365 jours, qui se décale tous les 182 jours (~ 6 mois).

2) Résultats

J'ai donc comparé l'amplitude et la phase de M2 donnée par MAS et R_T_tide. Tout d'abord, en regardant les résultats obtenus grâce à MAS (Figure 5), on observe une sensible tendance à l'augmentation. Cependant, on remarque une importante anomalie correspondant à l'année 1918. Cette anomalie n'a pu être expliquée, néanmoins, il pourrait sans doute s'agir du fait que cette année présente beaucoup de lacunes (281 jours manquants, soit 77% des valeurs manquantes pour l'année). Cette analyse des harmoniques sur l'année 1918 ne devrait donc pas être prise en compte.

Cependant, cette anomalie importante n'est pas observée sur l'étude de R_T_tide (Figure 6), par contre cette analyse montre une forte oscillation de période d'environ 18 ans avec une amplitude d'environ 0.035m (résultat observé sur le graphique). Le terme périodique doit être confirmé car je l'ai déterminé sur un seul cycle. Toutefois, dans la marégraphie, un cycle bien connu de 18.6 ans existe, c'est le cycle nodal, correspondant à la période pour laquelle la terre, la lune et le soleil se retrouvent dans les mêmes positions respectives, ce qui correspond à la période de 223 lunaisons au bout de laquelle les éclipses se reproduisent dans le même ordre. Or, d'après la figure 8, on aurait tendance à dire que l'on observe la signature de ce cycle. D'autant plus en observant les pics entre les lacunes, on observe l'équivalence de trois cycles pour la première lacune, et de deux cycles pour la seconde lacune. Cependant, d'après Leffler & Jay (2008), R_T_tide est supposé donner des résultats corrigés de cet effet. Par ailleurs, de même qu'avec MAS, on peut noter que l'amplitude de M2 aurait aussi tendance à augmenter.

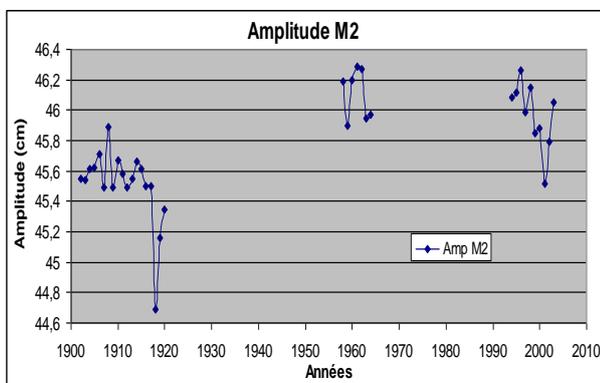


Figure 5 : Amplitude de M2 par MAS (1902-2009)

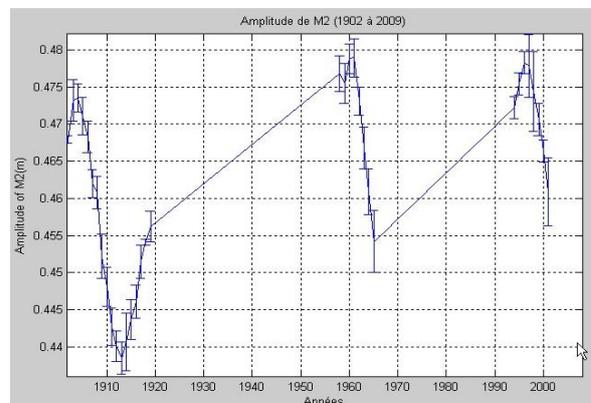


Figure 6 : Amplitude de M2 par R_T_tide (1902-2009)

Suite à cette observation de relation très probable avec le cycle nodal et à la lecture d'un article très intéressant (Araujo & Pugh, 2008), où a été réalisée une étude du cycle nodal en

calculant l'écart-type des données observées pour chaque année, j'ai décidé de quantifier les caractéristiques du cycle nodal pour Dakar en calculant aussi les écarts-types sur les données observées année par année. Pour cela, j'ai d'abord essayé de déterminer les caractéristiques (amplitude et phase) du cycle nodal, à partir des écarts-types calculés sur le jeu de données le plus long (où le cycle se dessine le mieux, 1902-1920), et en supposant connue la période du cycle (18.6 ans). Il s'agit alors d'un problème linéaire qui peut se résoudre par la méthode d'ajustement des moindres carrés.

Cette technique de résolution des inconnues d'amplitude et de phase d'un cycle de période donnée m'a permise d'obtenir la courbe bleue de la figure 7 (prédiction du modèle). Ensuite, j'ai superposé à cette courbe les écarts-types annuels calculés pour chaque jeu d'observations horaires. Il est clair que les deux courbes correspondent. Cependant quelques points se distinguent, notamment ceux de 1965 et 1966 qui correspondent aux années où une importante anomalie a été repérée (voir section III). De plus, un autre point se distingue, celui de 2008. Je ne peux cependant, pour l'instant, donner une explication car cette année est complète et théoriquement de bonne qualité puisque récente. Aussi, cette analyse m'a permise d'obtenir une valeur sur l'amplitude du cycle qui est de 2.2 ± 0.2 cm. Or, d'après l'étude faite sur l'amplitude de M2 on avait 3.5 cm, ce qui fait une différence de 1.3 cm, qui est relativement importante.

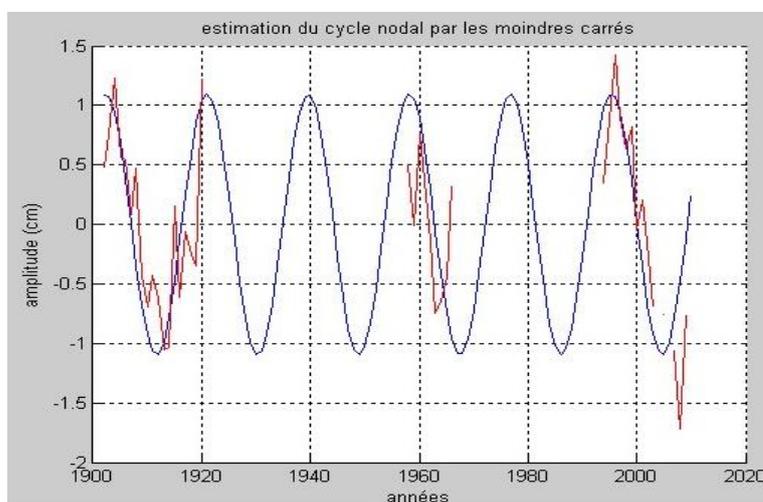


Figure 7 : Estimation du cycle nodal par les moindres carrés et écarts-types des valeurs. Courbe bleu : représentation du cycle nodal par les moindres carrés à partir du premier lot de données. Courbe rouge : représentation des écarts-types des valeurs horaires mesurées

Enfin, en ce qui concerne l'étude de la phase de l'onde M2 (Figures 8 et 9), son évolution est sensiblement la même avec les deux outils. On remarque tout de même quelques différences sur le dernier jeu de données, ainsi que sur le fait qu'avec R_T_tide les deux derniers jeux de données soient un peu plus élevés que les résultats de MAS ($\sim +1.5^\circ$). Cependant, ces anomalies n'ont pu encore être expliquées.

Aussi, un important saut de phase est nettement observé avec les deux outils. Ce saut estimé à $+8^\circ$ (soit 32 minutes d'avance) se produit entre 1911 et 1913 avec comme point intermédiaire 1912. D'après les informations que j'ai pu collecter aux archives du SHOM, concernant cette période (1902-1920), le puits du marégraphe était souvent envasé. Le fait que le puits soit envasé bouche et ralentit l'arrivée d'eau et retarde donc le signal de marée. On peut donc supposer, qu'en 1912, un important nettoyage du puits, ou une importante intervention sur le marégraphe a été réalisée durant l'année, ce qui expliquerait le saut de phase et le fait que le point 1912 soit intermédiaire dans le saut.

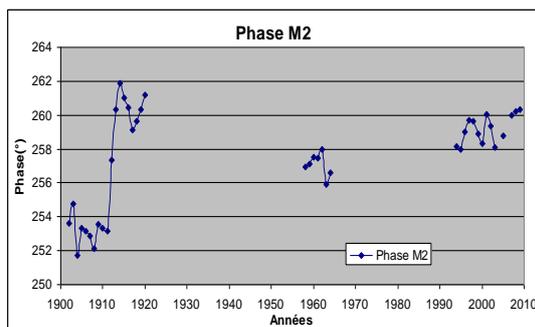


Figure 8 : Phase de M2 par MAS (1902-2009)

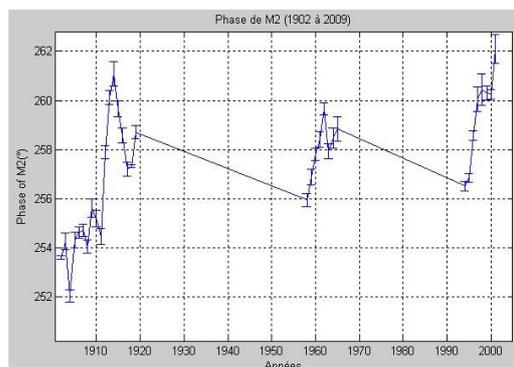


Figure 9 : Phase de M2 par R_T_tide (1902-2009)

V. Discussion et perspectives

Grâce à mes études, de nombreux points ont pu être éclaircis, notamment ceux concernant le potentiel des archives à propos de nouvelles données pour l'étude de la marégraphie à Dakar. Avec les marégrammes retrouvés et correspondant aux jeux déjà numérisés, je vais pouvoir, dans les deux mois de stage qu'il me reste, me concentrer sur la correction des données pour améliorer la qualité de la série. De plus, cette analyse croisée avec les archives montre le degré de qualité que l'on peut apporter aux données. Ainsi, concernant Dakar, la qualité actuelle des données ne permettrait pas d'approfondir certaines analyses, telles que l'étude du résidu météorologique ou des phénomènes extrêmes.

Le premier calcul des harmoniques qui a été réalisé durant le stage, a été fait à partir des données brutes, c'est-à-dire à partir de données qui n'ont subi aucune correction. Cette première analyse donne aussi une bonne idée de la qualité des données car des anomalies sont facilement détectables, tel que le saut de phase observé en 1912. Par l'analyse seule du résidu, ce saut n'aurait pas pu être repéré, ce qui fait qu'aucune correction n'aurait été apportée. L'analyse de la phase permet surtout de repérer des décalages en temps, ainsi suivant l'avance (ou retard) qui est observée et des connaissances que l'on possède sur l'installation et le fonctionnement du marégraphe, on peut déterminer l'origine du saut et l'estimer en temps pour pouvoir apporter les corrections nécessaires.

Pour avoir une bonne idée de l'évolution de ces harmoniques, il est préférable d'avoir une série propre pour obtenir des résultats fiables. Au mieux, on peut faire l'analyse harmonique avec juste quelques années que l'on sait de très bonne qualité, pour obtenir des harmoniques plus justes, et aussi calculer de meilleures prédictions et obtenir un résidu ainsi de meilleure qualité. Dans ces conditions, une étude du résidu météo et du baromètre inverse pourra être envisagée, à partir de ces données corrigées et de données de pressions atmosphériques qui peuvent être récupérées sur certaines bases de données, telle que celle du centre Hadley Centre Data Sets (HCDSL, Allan & Ansell, 2006).

Suite à la première étude des harmoniques de marée, il a pu être noté que R_T_tide donnait des résultats inattendus par rapport à la littérature en ne corrigeant pas l'effet du cycle nodal sur l'analyse de l'amplitude de la marée.

Les résultats présentés dans ce rapport concernant l'étude du cycle nodal ne sont pas définitifs, car l'étude n'est pas finie et peut encore être approfondie, en particulier la relation avec les écart-types des observations brutes annuelles.

Aussi, grâce aux nombreux nouveaux marégrammes retrouvés, l'équipe dans laquelle j'effectue mon stage doit envisager la numérisation des données papiers retrouvées pour compléter la série. De plus, certains documents trouvés dans les archives indiquent l'existence d'un marégraphe dans le port de Dakar pour les périodes qui n'ont pas de données. Par exemple, dans les documents observés au SHD de Rochefort, il est indiqué dans un courrier datant du 26 avril 1937, qu'une

comparaison a été faite entre les hauteurs d'eau données par l'échelle de marée et par le marégraphe. Nous pouvons donc espérer trouver ces enregistrements de marée dans un des centres d'archives, tout en sachant qu'il reste encore des documents inventoriés aux archives du SHOM concernant la marégraphie à Dakar, sans pour autant qu'ils aient été observés et analysés, ni qu'on sache réellement ce qu'ils contiennent.

De plus, en discutant avec une personne travaillant aux archives du SHD de Rochefort, il se pourrait que d'autres documents concernant Dakar (et les anciennes colonies françaises en général) puissent se trouver au SHD de Toulon. Il serait donc intéressant d'envisager une visite, ou du moins un premier contact avec le centre de Toulon, pour obtenir plus d'informations sur la nature des données potentiellement disponibles dans ce centre.

Références

- ARAUJO I. B., PUGH D. T. (2008).** Sea Levels at Newlyn 1915–2005: Analysis of Trends for Future Flooding Risks. *Journal of Coastal Research*, 24, pp. 203-212
- ALLAN R. and ANSELL T. (2006).** A New Globally Complete Monthly Historical Gridded Mean Sea Level Pressure Dataset (HadSLP2): 1850-2004. *Journal of Climate*, 19, pp. 5816 - 5842
- DOUGLAS B. C. (2001).** Sea level change in the era of the recording tide gauge, in Sea Level Rise, History and Consequences. *Edited by M.S. Kearney, and S.P. Leatherman, Academic, San Diego, Calif., Associated Press*, pp.37-64.
- GOIRAND V., SHOM (2008).** Fiche du programme « surcote » réalisé sur Matlab, permet de visualiser les surcotes.
- ISHII M., KIMOTO M., SAKAMOTO K., IWASAKI S. (2006).** Steric Sea Level Changes Estimated from Historical Ocean Subsurface Temperature and Salinity Analyses. *Journal of Oceanography*, 62, pp. 155 - 170
- LEFFLER K. E., JAY D. A. (2009).** Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L1=L2) solutions. *Continental Shelf Research*, 29, pp.77-88
- MITROVICA J. X., TAMISIEA M. E., DAVIS J. L., MILNE G. A. (2001).** Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change. *NATURE*, 409, 1026 - 1029
- PAWLOWICZ R., BEARDSEY B., LENTZ S. (2002).** Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE. *Computers & Geosciences*, 28, pp. 929–937
- POUVREAU (2008).** Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest. *Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle*, 466 pp
- PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level).** Base de données disponible en ligne : <http://www.psmsl.org/>
- SIMON (2007).** La marée océanique côtière. *Collection "Synthèse", ed. Institut Océanographique*, 433pp.
- WÖPPELMANN G., MARTIN MIGUEZ B., CREACH R. (2008).** Tide gauge records at Dakar, Senegal (Africa): Towards a 100 years consistent sea-level time series. *European Geophysical Union (EGU), Vienne Autriche, 13-18 avril 2008*
- WOODWORTH (2006).** Some important issues to do with long-term sea level change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 364, pp.787-803.
- WOODWORTH P. L., AMAN A., AARUP T. (2007).** Sea level monitoring in Africa. *African Journal of Marine Science* 2007, 29(3), pp. 321–330
- ZHANG K., DOUGLAS B.C., LEATHERMAN S.P. (2004).** Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64, pp. 41-58.

Annexes

1) Annexe 1 : présentation des 7 stations d'Afrique ayant une période d'enregistrement de la marée supérieure à 40 ans

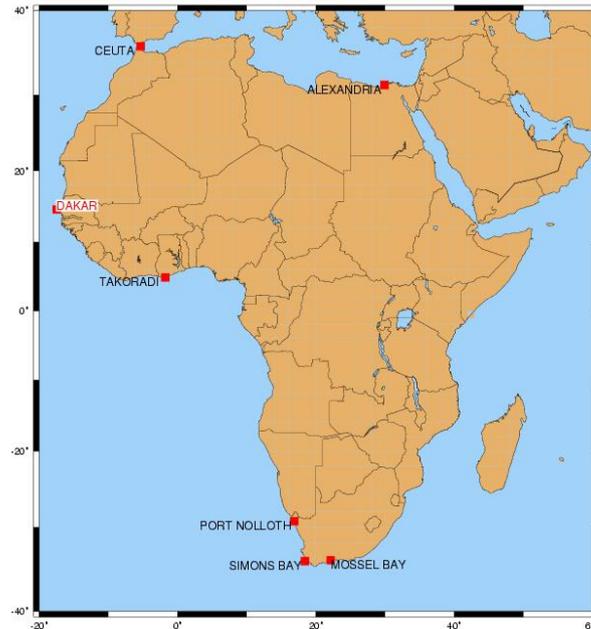


Figure1 : Série du niveau moyen des mers pour les 7 stations en Afrique qui ont des données mensuelles disponible dans la base de données du PSMSL sur une période de plus de 40 ans (Wöppelmann et al., 2008)

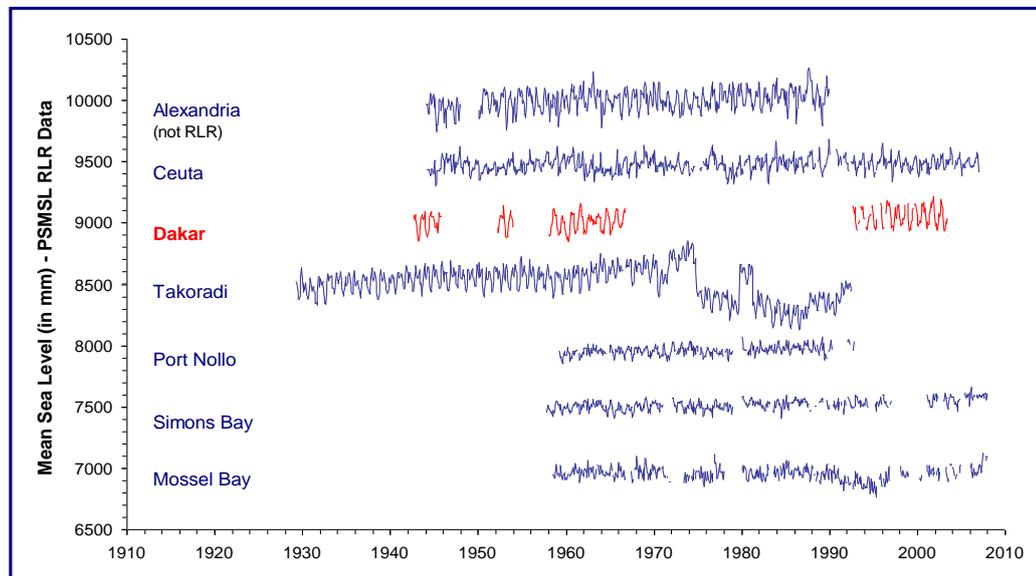


Figure 2 : Carte des 7 stations importantes en Afrique (cf. Figure 1)

2) Annexe 2 : Premier inventaire listant des données marégraphiques à Dakar

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Sì R : détails sur les mesures		
? (Sénégal)	1958-1959			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 651
	1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 714
	1964-1965			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 872
Casamance (Sénégal)	1963-1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 835
Mbour (Sénégal)	1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 061
Dakar (Sénégal) GLOSS n°253	1889, 1900 1903-1912 1914-1920 1930, 1932	x				SHOM
	1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3786
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3882
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3896 SHD R - 7JJ3896bis
Rufisque (Sénégal)	1930-1931			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4346
Kaolack (Sénégal)	1930-1931			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4346
? (Gambie)	1964-1965			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 872
? (Guinée)	1947-1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 052
	1956-1957			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 641 SHOM - S.H.2. 642
	1958-1959			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM S.H.2. 651

Tableau 2 : extrait de la thèse de Pouvreau (2008) : « Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre). »

3) Annexe 3 : Inventaire de toutes les données connues de nos jours

Années	Localisation	Format		
		Maregrammes	Registres	Disponible sous forme numérique
1889	SHOM	*		
1900	SHOM	*		
1902-1920	SHOM	*		*
1930-1933	SHOM	*		
1936-1937	SHD R (Rochefort)		* (hauteurs diurnes tous les ¼ d'heures)	
1942-1945	SHOM	*		Seul PSMSL
1952-1954	SHOM	*		Seul PSMSL
1957	SHOM	*		
1958-1966	SHOM	*		*
1967-1972	SHOM	*		
1992-1993	UH			Seul PSMSL
1994-1996	SHOM + NOAA			*
1997-2003	SHOM + UH			*
2005	SHOM			*
2007-2009	UH			*

Tableau 3 : Récapitulatif des années disponibles pour Dakar et leur format

4) Annexe 4 : Situation du site du marégraphe de Dakar

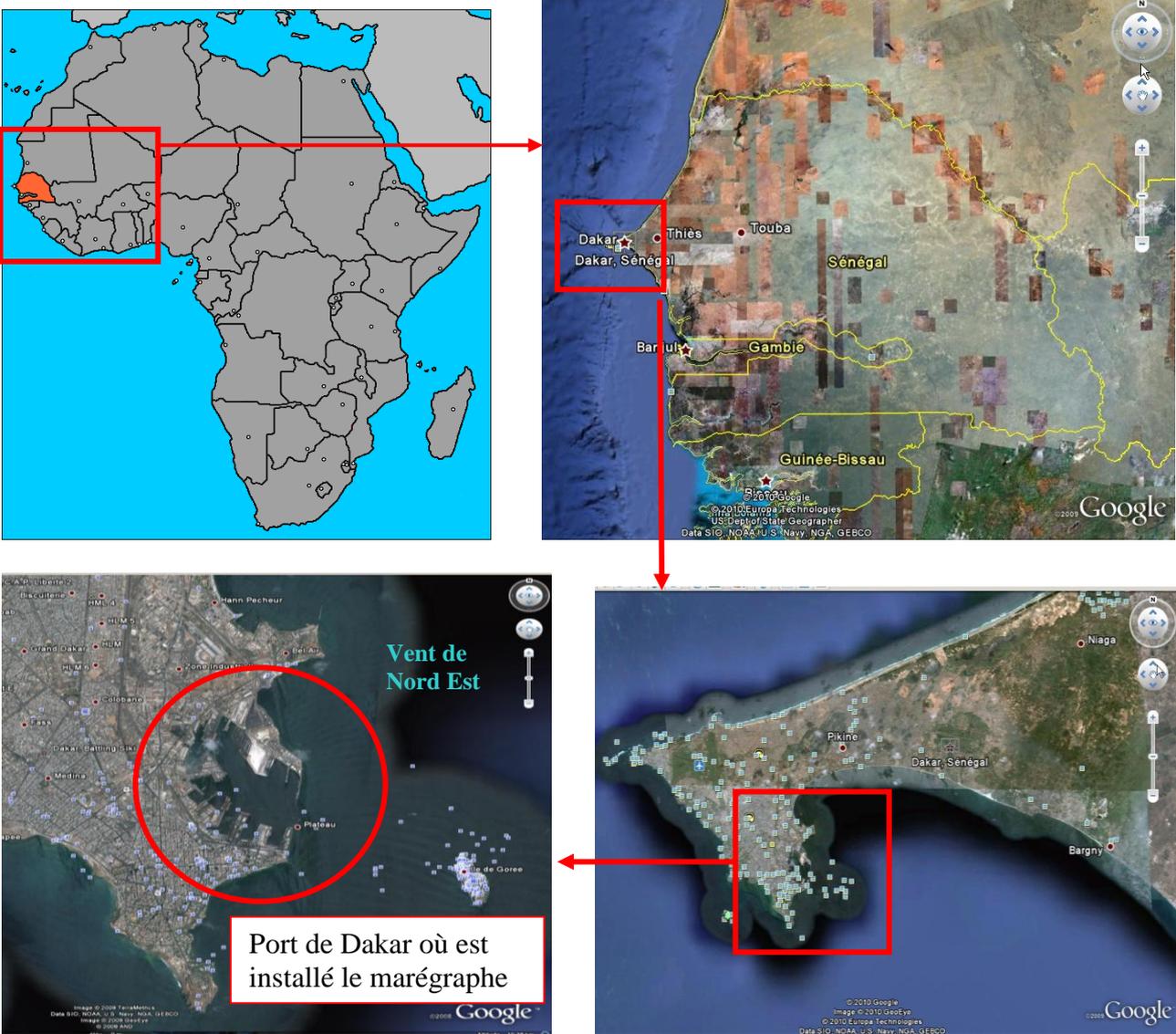


Figure 12 : Situation du site