

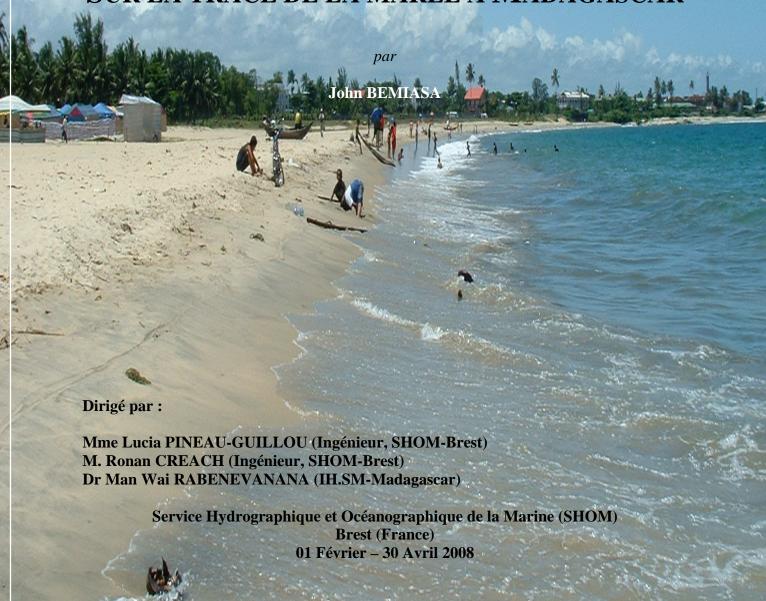




Rapport de stage

« Indian Ocean Tsunami Warning System Fellowship Program » de l'UNESCO Organisme d'accueil : SHOM





RESUME

Dans le cadre du Programme IOTWS (Indian Ocean Tsunami Warning System 2007-2008) de l'UNESCO-IOC, un séjour de stage/formation de trois mois (01 février - 30 avril 2008) m'a été accordé au sein du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) de Brest-France.

Au cours de ce séjour de 3 mois, le stage a été axé sur i) la formation théorique, intercalé par ii) une formation pratique. La partie théorique consistait en un cours théorique sur la marée (30 heures) et l'hydrographie côtière/réduction des sondages (12 heures). La partie pratique, quant à elle, s'est focalisée sur la découverte du réseau RONIM, la maîtrise des outils de traitements et contrôle qualité des données de la marée, la numérisation, l'analyse et le traitement des données de marée sur Madagascar.

Au cours de ce stage, des mesures historiques disponibles au SHOM ont été numérisées puis validées. Un catalogue de données de marée sur Madagascar a été établi, de nouvelles constantes harmoniques ont été calculées, L'évolution du niveau moyen de la mer a été estimée pour Hell-Ville et Antsiranana suite au calcul et à la validation de niveaux moyens annuels. Un premier modèle de marée sur Madagascar a été réalisé en utilisant le logiciel *Marmonde* (ce modèle n'est pas définitif).

Les tsunamis historiques sur les côtes de Madagascar ont été recherchés dans les données marégraphiques à partir des inventaire de tsunamis existant. Les mesures de hauteurs d'eau acquises par le SHOM lors du passage du cyclone Ivan en février 2008 sont aussi présentées dans ce rapport.

TABLE DE MATIERES

	PAGE
LISTE DES FIGURES, DES TABLEAUX ET DES SCHEMAS	01
LISTE DES ANNEXES	02
INTRODUCTION	03
LE ROLE DU CNDO DANS LE SYSTEME NATIONALE D'ALERTE AUX TSUNAMIS	05
LES TSUNAMIS, BREF APPERCU	06
LES NIVEAUX DE LA MER SOUS SURVEILLANCE	09
I. LE CALENDRIER	10
II. LE SHOM EN BREF	11
2.1. LE SERVICE PUBLIC	11
2.2. LE SERVICE DE LA DEFENSE	11
2.3. LE SOUTIEN AUX POLITIQUES PUBLIQUES MARITIMES	11
2.4. LA CELLULE HYDRODYNAMIQUE COTIERE (MIP/PEP/HDC)	12
III. LA PARTIE THEORIQUE	12
3.1. LE cours de Maree	13
3.2. LE COURS D'HYDROGRAPHIE COTIERE	13
IV. LA PARTIE PRATIQUE	13
4.1. LE RESEAU DE SURVEILLANCE RONIM	13
4.1.1. EQUIPEMENT ET INFRASTRUCTURE	14
4.1.2. LA RECUPERATION DES DONNEES	17
4.1.3. LA GESTION DE DONNEES	18
4.2. LES DONNEES DE MAREE DE MADAGASCAR	19
4.2.1. HISTORIQUE	19
4.2.2. SITUATION ACTUELLE DES DONNEES	20
4.2.2.1. LES DONNEES EN LIGNE	20
4.2.2.2. LES DONNEES NUMERISEES AU SHOM	21
4.2.3. L'INVENTAIRE ET CATALOGUE DES ARCHIVES	21
4.2.4. LES NOVELLES DONNEES NUMERISEES	24
4.2.4.1. LES METHODES DE NUMERISTATION	25
4.2.4.2. Antsiranana (1900)	26
4.2.4.3. Antalaha (1964)	29
4.2.4.4. Hell-Ville (1969)	31
4.2.5. LA VALIDATIONS DES DONNEES HISTORIQUES	33
4.2.6. MISE À JOUR DES CONSTANTES HARMONIQUES	35
4.3. TENDANCES DES NIVEAUX MOYENS ET AUTRES DONNEES REGIONALES	36
CONCLUSION	39
PESRPECTIVES	40
REMERCIEMENTS	40
QUELQUES REFERENCES	41
ANNEXES	42

« Madagascar: Un mort pour cause de Tsunami!

On signale la mort d'une personne dans l'île Sainte-Marie pour cause de tsunami. Il s'agit d'un pêcheur d'Ambodiatafana-Ambodirano qui a été surpris par la lame fatale, non loin de la côte et dont la pirogue s'est retournée. Le corps et l'embarcation ont été rejetés sur la plage. L'accident s'est produit à l'extrême nord de Sainte-Marie, là où cette petite île a été frappée de plein fouet par le raz-de-marée ». (1)

« Le tsunami du 26 décembre n'avait fait ni victime ni dégâts matériels à Madagascar». $\binom{2}{2}$

« Nouveau séisme en Asie: alerte au tsunami à Madagascar et à Maurice,

Des alertes ont été lancées à Madagascar et à l'Ile Maurice en prévision d'un éventuel tsunami, après le nouveau séisme d'une magnitude d'au moins 8,2 sur l'échelle de Richter qui a frappé lundi l'île indonésienne de Sumatra. Le 26 décembre 2004, un séisme et un tsunami dans la même région avaient fait plus de 220.000 morts et disparus à Sumatra et plus de 270.000 en Asie du sud et jusqu'aux côtes est-africaines de l'Océan Indien. A Madagascar, les services de secours et de météorologie ont lancé lundi soir des avis d'alerte pour l'ensemble de la côte est, a-t-on appris de source officielle ». (³)

..... les informations fusent et divergent!

¹ Dans La Gazette de la Grande Ile du 4 janvier 2005

² Nouvelles de Madagascar du 28 mars 2005

³ *Nouvelles de Madagascar* du 28 mars 2005

LISTE DES FIGURES

N ^o	TITRE
1	Situation géographique de Madagascar et localisation de l'épicentre du tremblement de terre
	tsunamigénique du 26 décembre 2004.
2	Schéma de la propagation des ondes de marée d'un tsunami.
3	vitesse de propagation des vagues générées par un tsunami
4	Carte de répartition des réseaux de système d'alerte aux tsunamis
5	Organigramme de la cellule HDC
6	Réseau RONIM métropolitain.
7	Les télémètres utilisés par le réseau RONIM
8	Observatoire de marée –BREST PENFELD
9	Observatoire de marée –LE CONQUET
10	Les périodes marquantes de la mesure de marée à Madagascar
11	Répartition spatio-temporelle de données de marée de Madagascar.
12	Différents types de support de données de marée de Madagascar.
13	Situation de l'observatoire d'Antsiranana (1900) et repères d'altitude.
14	Tracé comparatif prédiction/observation de la série Antsiranana (1900).
15	Position de l'observatoire d'Antalaha et repères d'altitude
16	Tracé comparatif prédiction/observation de la série Antalaha (1964).
17	Position de l'observatoire de Hell-Ville (Nosy-Be) et repères d'altitude
18	Tracé comparatif prédiction/observation de la série Antalaha (1964).
19	Evolution interannuelle du niveau de la mer d'Hell-Ville sur la période 1958-1998.
20	Evolution interannuelle du niveau de la mer d'Antsiranana sur la période 1902-1972.
21	Séries temporelles des niveaux moyens de la mer pour les trios ports de l'Afrique de l'Est.

LISTE DES TABLEAUX

N ^o	TITRE					
1	Les données de marée de Madagascar disponibles en ligne					
2	Les données de marée numérisées et archivées au SHOM					
3	Diagramme de répartition spatiale et temporelle de données de marée de Madagascar.					
4	Ecart moyen et écart type des valeurs (observations-prédictions) des séries de 1902-1911.					
5	Niveaux moyens annuels (provisoire) des hauteurs de marée d'Antsiranana sur la période 1902-					
	1911.					
6	Fichier de constantes harmoniques d'Antalaha					

LISTE DES SCHEMAS

No	TITRE
1	Flux de données du réseau de maregraphes RONIM
2	Procédure de numérisation de données de marée adoptée.

LISTE DES ANNEXES

N^{O}	TITRE
1	Catalogue de données de marée de Madagascar
2	Protocole de numérisation des marégrammes
3	Niveau moyen Antsiranana (1900)
4	Niveau moyen Antalaha 1964
5	Niveau moyen Hell-Ville (1969)
6	Caractéristiques des constantes harmoniques d'Antalaha, par la méthode de concordance par espèces
7	Catalogue des Tsunamis dans l'Océan Indien
8	Cyclones et mesure de marée

INTRODUCTION

Le dimanche 26 décembre 2004, un des plus grands tremblements de terre (magnitude 9.0 sur l'échelle de Richter) enregistré depuis 40 ans se produisit sur la côte ouest du nord de l'île de Sumatra en Indonésie (Figure 1). Le grand tremblement de terre « tsunamigène » s'est produit à 00:58:50 TU (6:58:50 heure locale). Son épicentre se trouvait à 3.298°N; 95.779°E et sa profondeur n'était pas très importante (< 38 km – probablement 10 km de profondeur). La terre a tremblé à Sumatra, Nicobar, les îles Andamans, Malaisie, Myanmar, Singapour, Bangladesh et en Inde. Selon 1' « US Geological Survey (USGS NEIC (WDCS-D)), la magnitude enregistrée dépassait 9.0 degrés de l'échelle de Richter, ce qui le classifie au 4ème rang du plus grand tremblement de terre enregistré depuis 1990 – et le plus grand après celui de l'Alaska en 1964 (Pararas-Carayannis, 2006). Cependant, les données divergent quant à la force tsunamigène du tremblement de terre (9.0 à 9.3), la révision des estimations fait de ce tremblement de terre le 2^e plus grand jamais enregistré après celui du Chili le 22 mai 1960 (9.5 sur l'échelle de Richter). Dix-huit (18) pays riverains de l'Océan Indien ont été touchés par le tsunami généré: l'Indonésie, la Thaïlande, l'Inde, le Sri Lanka, la Malaisie, le Myanmar, le Bangladesh, les Maldives, La Réunion, les Seychelles, Madagascar, l'Ile Maurice, la Somalie, la Tanzanie, le Kénya, l'Oman, l'Afrique du Sud et l'Australie.

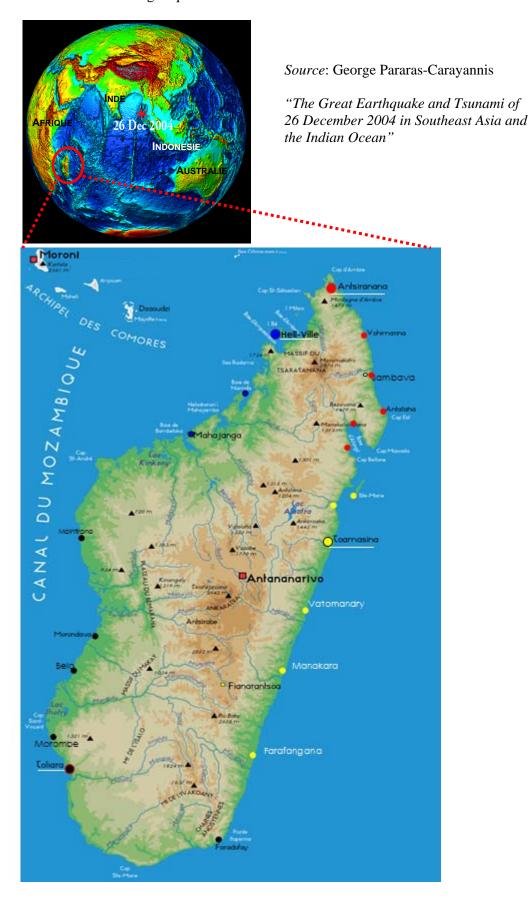
A Madagascar, les houles engendrées par le tsunami ont frappé les côtes Est depuis Fort-Dauphin, Manakara, en passant par Sambava et Vohemar. De considérables dégâts matériels furent enregistrés, laissant 1.000 habitants sans abri. Quant au nombre de victimes, les informations divergent: pas de victimes (4), 1 mort à Sainte-Marie (5), 1 mort à Fort-Dauphin (Okal *et al*, 2004.). Les hauteurs de vagues observées (il n'y a pas d'enregistrement disponibles) varient de 2 à 4 m avec un maximum de 5,4 m plus au sud de l'Île (Fort-Dauphin) et à Sambava au Nord. En revanche, les environs de Toamasina montrent des amplitudes quasi-nulles (aucun signal sur 100 km de cote entre Vatomandry et Mahanoro). Le plus remarquable effet du tsunami a été observé au port de Toamasina où un navire commercial de 50 m de long a rompu son amarrage et a erré pendant plusieurs heures dans le port par un fort courant tourbillonnaire. Cet incident s'est produit vers 16:00 GMT, plusieurs heures après l'arrivée des vagues d'amplitude maximum.

_

⁴ Nouvelles de Madagascar du 28 mars 2005

⁵ Dans La Gazette de la Grande Ile du 4 janvier 2005

<u>Figure 1</u>. Situation géographique de Madagascar (cercle rouge) et localisation de l'épicentre (point rouge) du tremblement de terre tsunamigénique du 26 décembre 2004.



Madagascar fait donc partie des pays de l'Océan Indien particulièrement vulnérable aux désastres causés par les tsunamis (UNESCO, 2005). Le séisme du 26 décembre 2004 l'a rappelé: la Terre bouge et aucune côte ne peut vraiment se targuer de pouvoir échapper à ses colères marines. Ainsi, l'onde de choc du tsunami qu'il a provoqué a atteint les cotes malgaches. Lors d'une mission effectuée à Madagascar par les experts de la COI, un atelier national a été organisé pour l'évaluation du risque causé par le tsunami le long des cotes malgaches. Des décisions ont été prises dont en voici un extrait:

« Dans le cadre de la mise en place d'un système national d'alerte aux tsunamis, Madagascar a mis en priorité immédiate les résolutions suivantes : (i) « l'installation des stations de mesure du niveau de la mer dont les données acquises toutes les 1 ou 2 minutes seront envoyées toutes les 15 minutes aux centres d'alerte aux tsunamis du Pacifique et de l'Océan Indien. Les deux zones qui doivent être équipées en priorité sont la zone Nord-Est de Madagascar qui serait atteinte en premier lieu par les tsunamis en provenance de l'Indonésie et de la zone de Makran, et d'autre part Manakara où le tsunami du 26 décembre 2004 a été observé (cette zone est sensible aux tsunamis). Ces stations doivent être installées de préférence dans des ports où le suivi et la maintenance peuvent être assurés localement ; (ii) de demander d'urgence à l'OMM⁶ la mise à disposition en temps réel des données marégraphiques par le système SMT (GTS) ; (iii) la formation de personnel technique pour le suivi et la maintenance des équipements ; (iv) la formation de personnel sur le traitement, l'interprétation et la transmission de données marégraphiques ».

LE ROLE DU CNDO DANS LE SYSTEME D'ALERTE AU TSUNAMI

« Par le biais du Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique (MENRES), le Centre National de Données Océanographiques de Madagascar (CNDO), l'Institut Halieutique et des Sciences Marines (IH.SM) et le Centre National de Recherche Océanographique (CNRO) peuvent s'intégrer dans le système national à travers les composantes suivantes : (i) le réseau d'observation (niveau de la mer, houle, vague), (ii) les activités d'évaluation post événementiel (post-tsunami), (iii) la formation et la recherche, (iv) la formulation de recommandations à caractère scientifique aux gestionnaires/autorités et la formulation d'éléments scientifiques et techniques en IEC (Information-Education-Communication) ».

.

⁶ Organisation Mondiale de la Météorologie

C'est dans cette optique que ce stage a été effectué et que le SHOM a été choisi comme organisme d'accueil.

En effet, pour un tsunami donné, le système de surveillance des séismes et du niveau de la mer est essentiel pour confirmer l'approche d'un tsunami potentiellement destructeur, et permet d'alerter immédiatement le public. Madagascar avait géré jusqu'en 2000 deux stations de mesure du niveau de la mer, l'une à Nosy-be et une deuxième à Fort-Dauphin. Elles ne sont plus opérationnelles et leur remplacement s'avère nécessaire. L'installation de nouveaux marégraphes est entreprise dans le cadre du projet ODINAFRICA⁷ III. Par ailleurs, un autre marégraphe est envisagé pour le port de Tamatave en collaboration avec le SHOM-France (UNESCO, 2006).

LES TSUNAMIS, BREF APERÇU

Les tsunamis sont des ondes hydrauliques se propageant à la surface de l'eau. Leur propagation est d'autant plus rapide que la longueur d'onde est grande et la couche d'eau épaisse (Figure 2).

Au large, les hauteurs de vagues sont négligeables devant la profondeur et n'influent pas sur la **vitesse (c)** de propagation du tsunami, qui est défini en fonction de la **profondeur (h)** et de l'accélération de la **pesanteur(g)**:

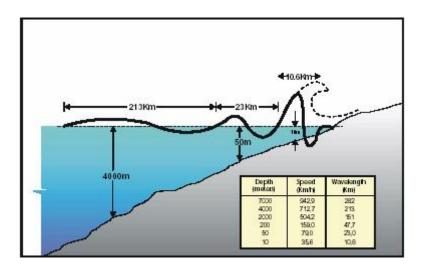
$$C = vgh$$

Le tsunami ne peut donc guère être observé à bord d'un bateau, la distance séparant 2 crêtes successive étant de l'ordre de 100 kilomètres et la hauteur des vagues de l'ordre d'une dizaine de centimètres.

.

⁷ Ocean Data and Information Network for Africa

Figure 2. Schéma de la propagation des ondes de marée d'un tsunami.



A l'approche des côtes, la période des vagues reste constante tandis que la longueur d'onde décroît fortement en raison de la diminution de la profondeur; la conservation de l'énergie conduit à une augmentation de la hauteur des vagues, proportionnelle à h^{-1/4}. Inoffensif au large, le tsunami devient donc dangereux à l'approche des côtes, pour les vies humaines et pour les installations. De plus, la partie avant du train de vagues ralentit fortement (moindre profondeur d'eau) tandis que l'arrière continue de se propager à une vitesse très importante.

Ainsi, par 5000 mètres de fond la vitesse de propagation des vagues est de 800 kilomètres par heure, tandis que par 10 mètres de profondeur elle n'est plus que de 36 kilomètres par heure. Ce fort ralentissement conduit une augmentation de la hauteur des vagues, accroissement qui peut atteindre plusieurs mètres.

La vitesse de propagation dépendant de la profondeur de l'océan, les ondes subissent des phénomènes de réfraction et de diffraction sur les reliefs sous-marins. La réfraction est alors à l'origine de l'alignement parallèle à la côte du front des ondes, ce qui conduit à un enroulement des vagues autour des caps.

Les baies situées sur la trajectoire du tsunami, et dont les dimensions horizontales sont de l'ordre du kilomètre, peuvent être soumises à un phénomène de résonance lorsqu'elles sont excitées par le train d'ondes du tsunami. La superposition de ce train aux vagues réfléchies dans la baie conduit à une amplification des hauteurs de vagues pouvant dépasser un facteur 10.

En l'absence d'obstacles, le tsunami pénètre à l'intérieur des terres sur des distances horizontales de plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres, les hauteurs de vagues pouvant encore dépasser 10 mètres. Ce phénomènes, appelé « run up », est particulièrement dévastateur lorsque les vagues sont courtes et déferlent sur des

installations.

Ainsi, un tsunami sera quasiment imperceptible au large, mais son amplitude peu atteindre rapidement 10, 20, et même 30 mètres en arrivant près de la côte (Figure 3). Plusieurs vagues peuvent inonder à la suite, après des périodes d'une heure par exemple, les côtes car lors du déclenchement d'un tsunami plusieurs vagues générées se suivent ou partent dans différentes directions. Cette vague ou ces vagues très hautes sont donc capables de créer des dégâts considérables lorsqu 'elles atteignent, quasiment par surprise, les côtes souvent très peuplées du Pacifique.



Figure 3 : vitesse de propagation des vagues générées par un tsunami

Environ 8 heures après le séisme au large de Sumatra, le tsunami a atteint les côtes malgaches avec des vagues, dont certaines atteignent 2 à 5 mètres.

Source texte et images: http://tsunami.tpe.over-blog.com/categorie-104185.html;

Un catalogue de tsunami dans l'Océan Indien est établi par Rastogi *et a*l. (2006) et se trouve en annexe 7.

LES NIVEAUX DE LA MER SOUS SURVEILLANCE

A part les observations satellites, quelques centaines de stations sismiques et de mesure du niveau de la mer surveillent actuellement l'ensemble des océans. Des réseaux régionaux de surveillance ont été mis en place repartis dans quatre zones océaniques : l'Océan Pacifique, l'Atlantique Nord-Est, les Caraïbes et l'Océan Indien (Figure 4).

Asia

NE Atlantic
& Med

Asia

Caribbean

Africa

Indian Ocean

Figure 4. Carte de répartition des réseaux de système d'alerte aux tsunamis

 $(Source: http://www.ioc-tsunami.org/index.php?option=com_content\&task=view\&id=31\&Itemid=36)$

« Le réseau devra être plus dense afin de réduire les délais d'alerte à vingt minutes au maximum », explique un chercheur responsable du programme auprès de l'Unesco.

Le SHOM participe à ce vaste programme par le biais du Réseau d'Observation du NIveau de la Mer « RONIM ».

I. LE CALENDRIER

Janvier

31/01/08 : arrivée à Brest et installation

Février

01/02/08 : procédure administrative et visite des différents services du SHOM

04/02/08 : inventaire des données archivées sur Madagascar ;

présentation des outils d'analyse de données marégraphiques.

05/02/08 : cours de marée

06/02/08 : maîtrise des outils d'analyse de données marégraphiques. 07/02/08 : maîtrise des outils d'analyse de données marégraphiques.

08/02/08 : maîtrise des outils d'analyse de données marégraphiques ;

inventaire de données historiques sur Madagascar archivées au SHOM.

11/02/08 : inventaire de données historiques sur Madagascar archivées au SHOM

12/02/08 : cours de marée

18/02/08 : cours de marée

19-21/02/08 : découverte du réseau RONIM : acquisition et transmission de données

22/02/08 : cours de marée

25-29/02/08 : inventaire de données historiques sur Madagascar : Les Annales Hydrographiques.

.Mars

03-04/03/08 : cours de marée

05-7/03/08 : inventaire des données historiques archivées (les marégrammes) ;

10/03/08 : contrôle du marégraphe de Brest (situé sur la Penfeld)

11/03/08 : cours de marée

12-14/03/08 : numérisation des marégrammes

13-14/03/08 : « Journées de travail sur la marégraphie » SHOM/Université de La

Rochelle/UNSECO

Présentation de l'état d'avancement du stage

17/03/08 : numérisation de marégrammes

18/03/08 : cours de marée

19-20 /03/08 : numérisation de marégrammes

21/03/08 : cours de marée

22/03/08 : numérisation de marégrammes

25/03/08 : cours de marée

26-28 : numérisation de marégrammes

Avril

01/04/08 : cours de marée

06/04/08 : Analyse, contrôle de qualité et validation des données

07/04/08 : contrôle du marégraphe « Le Conquet »

08-10/04/08 : Analyse, contrôle de qualité et validation des données

11/04/08 : cours de marée

13-14/04/08 : Analyse, contrôle de qualité et validation des données

15/04/08 : cours de marée

16/17/03/08 : Analyse, contrôle de qualité et validation des données

18/04/08 : cours de marées 21-25: rédaction du rapport

28-30/04/08: rédaction, relecture et finalisation du rapport

Mai

01/05/08: retour à Madagascar

II. LE SHOM EN BREF

« La vocation du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) se résume en trois missions principales :

2.1. Le Service public

Le SHOM exerce les attributions de l'Etat en matière d'hydrographie nationale et de cartographie marine conformément aux obligations internationales de la France, définies notamment par la convention internationale SOLAS⁸ pour la sauvegarde de la vie humaine en mer et par la convention des Nations unies sur le droit de la mer. Elles s'appliquent en assurant le recueil, l'archivage et la diffusion des informations officielles nécessaires à la navigation maritime.

2.2. Le Service de la défense

Le SHOM doit couvrir ses besoins en matière de connaissance de l'environnement marin qui vont bien au-delà des seules informations relatives à la sécurité de la navigation de surface, collectées et exploitées par le SHOM au titre de sa mission de service public. La sécurité de la navigation des sous-marins, entre autres, impose de s'intéresser à une gamme de profondeurs plus importante ; les performances des systèmes de commandement et des systèmes d'armes modernes impliquent une connaissance de plus en plus fine et adaptée des multiples paramètres descriptifs et évolutifs de l'environnement hydrographique, océanographique et météorologique (HOM) dans lequel opèrent les unités de la marine nationale. Face à ces besoins, la mission du SHOM est de fournir aux forces navales des produits et des services de mesure, de description et de prédiction de l'environnement HOM, efficaces et adaptés aux diverses formes de lutte et aux différents senseurs ou systèmes d'armes utilisés.

2.3. Le soutien aux politiques publiques maritimes

Enfin, le SHOM contribue aussi à la satisfaction des besoins en matière d'action de l'Etat en mer et sur le littoral, dans toutes les zones sous juridiction nationale, et dans les zones où la France exerce des responsabilités du fait d'engagements particuliers, en soutien à l'élaboration et à la mise en œuvre des politiques publiques maritimes. Il intervient comme expert dans les travaux relatifs aux délimitations et frontières maritimes. Il participe au recueil et à la mise à disposition des données numériques nécessaires à la gestion intégrée des zones côtières et au

.

⁸ Safety Of Life At Sea

développement durable ainsi qu'aux actions de l'Etat en matière de lutte contre les pollutions maritimes. S'appuyant sur son réseau d'observatoires de marée, il participe à la mise en place de réseaux d'alerte pour la prévention des risques et des catastrophes. Aux côtés de nombreux partenaires, il soutient par ses moyens et son expertise la modélisation numérique de l'océan mondial, et contribue à son extension vers le domaine côtier. »

2.4 La cellule Hydrodynamique Côtière (MIP/PEP/HDC)

Les trois mois de séjour ont été effectués au sein de la cellule Hydrodynamique Côtière (HDC) du SHOM. Suite à la nouvelle organisation du SHOM, la section est réorganisée et son organigramme révisé (Figure 5) :

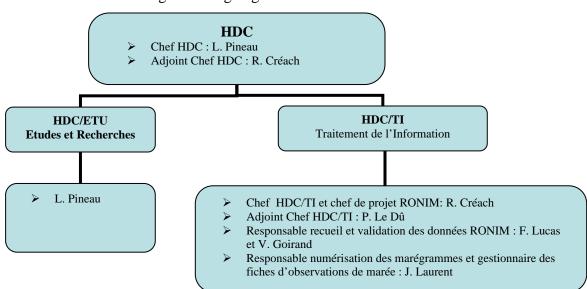


Figure 5. Organigramme de la cellule HDC

III. LA PARTIE THEORIQUE

La partie théorique du stage s'est déroulée durant la totalité du séjour. En tout, trente (30) heures de cours sur la marée (enseignement théorique et dirigé) ont été dispensées. Le dernier volet de cette partie a été consacré à l'hydrographie côtière et la réduction des sondages. Sans rentrer en détails du contenu du cours, les chapitres abordés sont les suivants :

3.1. LE COURS DE MAREE (30 H)

CHAP. I: Généralités

CHAP. II: La marégraphie

CHAP. III. La Force génératrice de la marée

CHAP. IV: La Théorie classique

CHAP. V. La Formule harmonique de la marée

CHAP. VI: L'Analyse harmonique de la marée

CHAP. VII: Les méthodes non harmoniques

CHAP. VIII : Les valeurs caractéristiques

CHAP. X : Les courants de marée

3.2. LE COURS D'HYDROGRAPHIE COTIERE (12 H)

CHAP. IX: Les sondages hydrographiques

PRESENTATION DU PROJET BATHYELLI

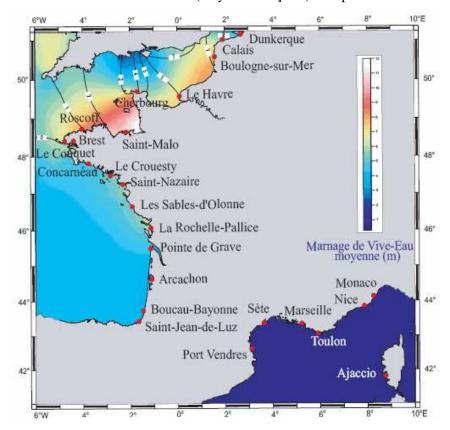
IV. LA PARTIE PRATIQUE

Comme planifiée, la partie pratique du stage a été consacrée à i) la découverte du réseau RONIM et ii) l'analyse des données de marée sur Madagascar.

4.1. LE RESEAU DE SURVEILLANCE DU NIVEAU DE LA MER RONIM

La France, par le biais du SHOM, joue un rôle important dans le domaine de surveillance du niveau de la mer. L'archivage de séries temporelles de données de marégraphes, remontant les 200 ans à Brest (et quasi ininterrompues), le place parmi les pionniers en matière d'hydrographie côtière. Le projet RONIM (Figure 6) a été mis en place en 1992. Son objectif se résume en « la mise place et le maintien en condition opérationnelle d'un réseau moderne de marégraphes, dans les ports principaux de France métropolitaine et d'outre-mer ». Par ailleurs, « le projet vise à assurer la diffusion des données du réseau vers les usagers en temps réel et en temps différé ».

<u>Figure 6</u>. Réseau RONIM métropolitain. Les marégraphes de Nouméa, Fort de France, Pointe-à-Pitre, La Réunion et les îles du Salut (Guyane Française) font partie du réseau.



Au niveau national et international, les données fournies par ce réseau sont utilisées pour de nombreuses applications : « l'amélioration des prédictions de marée et des modèles hydrodynamiques, l'établissement du zéro des cartes marines, l'étude de niveau du niveau moyen des océans, la contribution au programmes mondial GLOSS, la calibration des radars altimètres Topex-Poseidon, ERS et Jason, réduction des sondages bathymétriques, la gestion intégrée du littoral, l'étude statistiques des surcotes et décotes et des niveaux extrêmes, la prévision d'océanographie côtière opérationnelle, l'étude et prévision des risques naturels (tempêtes et tsunamis) ».

4.1.1. EQUIPEMENTS ET INFRASTRUCTURE

Au total, 30 ports sur 33 envisagés sont équipés de marégraphes (Figure 7) dont, depuis 1998, 20 d'entre eux dotés de télémètres radar. Entre autre, cinq observatoires du réseau sont équipés de « marégraphes colocalisés avec des stations GPS du réseau géodésique permanent (RGP)⁹ de l'IGN »¹⁰. Le choix de nouvelles générations d'appareil de mesures de hauteur d'eau repose sur deux critères : la fiabilité et la précision. Par télémètre radar, « la mesure de

⁹

¹⁰

la hauteur d'eau instantanée repose sur l'évaluation du temps écoulé entre l'émission et la réception d'une onde électromagnétique émise par le télémètre. Outre leur grande précision, les avantages des télémètres radar résident du fait, i) de l'absence de toute pièce mobile, ii) des risques de corrosion limités et iii) de la diminution des interventions humaines qui, souvent, sources d'erreurs de mesures. La Figure 7 ci-après montrent quelques types de ces équipements utilisés par le réseau RONIM.

Figure 7. Les télémètres utilisés par le réseau RONIM











Télémètre acoustique Nivus 01 (Ben 12E)

Télémètre radar BM 70A, KROHNE

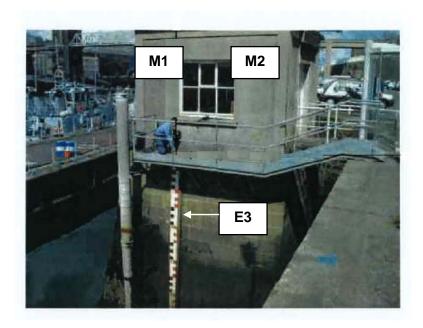
Télémètre radar Optiflex 1300C, KROHNE

Télémètre radar BM 100A, KROHNE

Par ailleurs, il existe encore un marégraphe d'ancienne génération (marégraphe à flotteur) toujours opérationnel à Port-Tudy (Ile de Groix). Ce marégraphe analogique permet en particulier d'enregistrer des seiches de période inférieure à 10 minutes (l'amplitude des seiches peut dépasser 1 m au niveau de l'Ile de Groix).

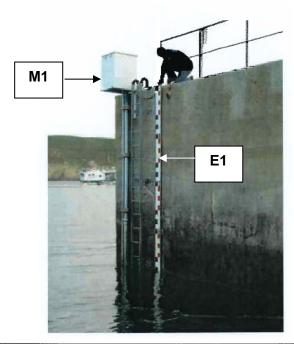
Les échelles de marée restent indispensables au sein du réseau, elles sont situées à proximité des marégraphes numériques. Les figures ci-après (Figures 8 et 9) présentent deux observatoires du réseau RONIM, visités lors des sorties de contrôle des marégraphes.

Figure 8. Observatoire de marée –BREST PENFELD



Instrument	Situation	Période de	Système	Remarques
	Description	fonctionnement	horaire	
M1 Marégraphe analogique Type 20030 A l'intérieur du local Marégraphe de la Penfeld		Permanent	TU	Fonctionnement aléatoire
M2 Marégraphe côtier numérique constitué du capteur radar Krohne de type BM100 (n°3630331001) associé à la centrale d'acquisition de la marque MARELTA (n° 03.00004) Acquisition : 10 mn Intégration : 2 mn	A l'intérieur du local marégraphe de la Penfeld Echelle de marée en bois de 7,80 m installée sur le côté du local marégraphe de la Penfeld (Fruit de 4,8°)	Permanent depuis le 27/02/2004	TU	Bon fonctionnement

Figure 9. Observatoire de marée -LE CONQUET



Instrument	Situation Description	Période de fonctionnement	Systèm e	Remarques
			horaire	
M1 Marégraphe côtier numérique type Centrale d'acquisition de marque ELTA n°03-0007, Télémètre radar de marque: KROHNE BM70A n° 9309676002 Acquisition: 10 min Intégration: 2 min	Marégraphe installé dans l'angle nord ouest du quai Aviso Vauquois au Conquet	Permanent depuis le 09/11/2001	TU	Configuration mise en place le 12/05/2004
E1	Echelle de marée en PVC de 9,10 m installée à proximité du marégraphe côtier numérique			

4.1.2. LA RECUPERATION DES DONNEES

Hormis le marégraphe à tambour de Port-Tudy dont les hauteurs d'eau sont enregistrées sur papiers (marégrammes), les stations sont équipées de modems qui permettent la transmission des informations. Toutes les stations dotées de tels équipements peuvent être interrogées via modem à partir d'un PC qui recevra les données brutes avant d'être soumises à des contrôles de qualité, puis archivées et diffusées. Les marégrammes en provenance de Port-Tudy sont régulièrement expédiés (par l'opérateur-technicien local) au responsable de la numérisation des marégrammes de la cellule HDC/TI.

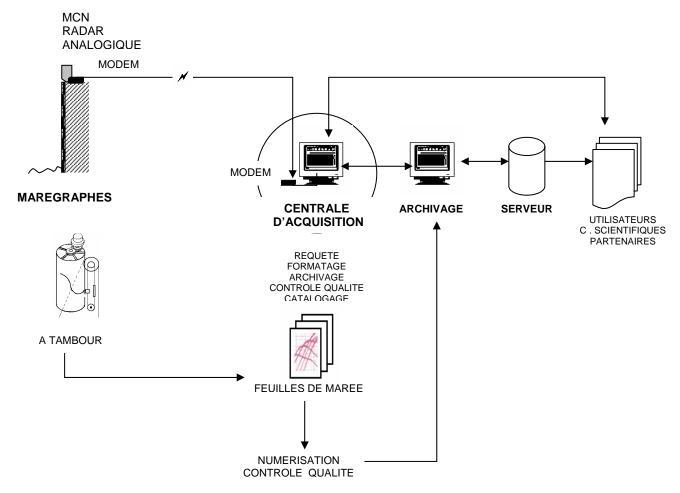
4.1.3. LA GESTION DE DONNEES

Le réseau RONIM a mis en place un système de gestion de données marégraphiques en se dotant des composantes suivantes :

- i) un réseau d'observatoires côtiers ;
- ii) un système de collecte de données ;
- iii) une centrale de réception, numérisation, validation, archivage et diffusion des données

Si la mesure des hauteurs d'eau se fait de façon automatique au niveau des marégraphes (toutes les 10 mn avec une période d'intégration de 2 minutes), leur transfert vers la centrale d'acquisition reste manuel. Une fois par semaine, les marégraphes sont interrogés et les données sont recueillies par tranche en fonction des requêtes faites par l'opérateur. Le schéma suivant (Schéma 1) montre de façon succinte le flux des données de marée du réseau RONIM;

Schéma 1. Flux de données du réseau de maregraphes RONIM



Pour assurer d'une part le bon fonctionnement des équipements, d'autre part, la qualité des données, les marégraphes font régulièrement l'objet de contrôles, soit par le personnel du SHOM soit par les partenaires locaux. Il s'agit soit d'un contrôle à la « sonde lumineuse » en pleine ou basse mer soit d'un test de Van de Casteele. Pendant le stage, nous avons eu l'occasion de réaliser le premier type de contrôle pour l'observatoire de Brest Penfeld et du Conquet. L'opération consiste à mesurer à plusieurs reprises (à la fréquence du marégraphe) la hauteur d'eau du puits à l'aide d'une sonde lumineuse. La comparaison de la valeur moyenne de ces mesures avec celle issue du marégraphe permet d'une part d'apprécier la qualité de la mesure, d'autre part de juger de l'état de bon fonctionnement du marégraphe. Un extrait de fiche de contrôle se trouve en Annexe I.

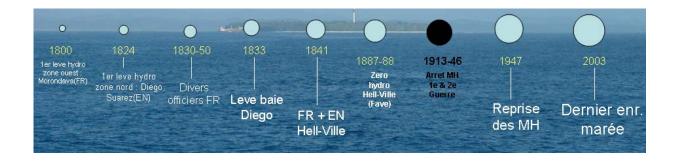
4.2. LES DONNEES DE MAREE DE MADAGASCAR

4.2.1. HISTORIQUE

La mesure de marée à Madagascar remonte autour des années 1800 lorsque la France effectuait les premiers levés hydrographiques dans la zone ouest (Morondava)(Favé, 1888). Les années 1824-1825 furent marquées par des levés réalisés par les anglais dans la baie de Diego-Suarez (Antsiranana). Entre 1830 et 1950, divers officiers de la Marine française ont effectué des missions hydrographiques à Madagascar, notamment dans la partie nord de l'Île. Le levé de la Baie de Diego fut repris en 1833. Des levés ont été réalisés par des officiers français et anglais en 1841 à Hell-Ville (Nosy-be). La Mission Hydrographique de Madagascar (MHM) dirigé par M. Favé (1887-88) fut déterminante, car le zéro hydrographique d'Hell-Ville a été déterminé pour la première fois à cette époque.

La période 1913 – 1946 fut marquée par la suspension de toute Mission Hydrographique à Madagascar (MHM) par la Marine française. Ceci est dû à la première Guerre Mondiale (1914-1918), suivie de la deuxième (1945). Aucune mesure de marée n'a été réalisée pendant ces périodes hormis quelques missions ponctuelles réalisées par les Services de Travaux Publiques locaux. L'année 1947 fut marquée par la reprise des MHM et l'intensification des mesures de marée dans plusieurs endroits de l'Île. La figure 10 ci-après montre les grandes étapes de l'histoire hydrographique de Madagascar.

Figure 10. Les périodes marquantes de la mesure de marée à Madagascar



Jusqu'en 1902, les mesures de marée ont été réalisées de façon ponctuelle, et particulièrement durant les missions hydrographiques dans différents endroits. Des échelles de marée ont été installées dans les principaux ports pour mesurer les hauteurs d'eau permettant la réduction des sondages. Le premier marégraphe permanent a été installé à Antsiranana en 1902, alors que celui de la Station Océanographique d'Hell-Ville (Nosy-Be) a été installé, plusieurs années plus tard, en 1958 (type St Chamond-Granat) dans le cadre de l'Année Géophysique Internationale (Roubertou, 1959). Dans les deux ports, la marée a donc été enregistrée de façon quasi permanente, jusqu'en 1910 pour Antsiranana et 2002 pour Hell-Ville.

Les années 80 marquent une étape décisive car Madagascar intègre GLOSS¹¹. Trois marégraphes furent alors installés : à Hell-Ville (Nord-Ouest), à Toliara (Sud-Ouest) et à Taulanaro (Fort Dauphin) au Sud-Est de Masagascar. Ces marégraphes de type OTT R16 ont été fournis par le FTM¹². Le marégraphe de Hell-Ville est celui qui a fonctionné le plus longtemps (jusqu'en 2002, détruit par un cyclone).

4.2.2. SITUATION ACTUELLE DES DONNEES

4.2.2.1. Les données en ligne

Un rapport relativement bien détaillé sur les mesures de marée à Madagascar a été rédigé par RAZAKAFONIAINA en 1999 (RAZAKAFONIAINA, 1999). Le tableau 1 suivant récapitule les données de marée à Madagascar numérisées et disponibles en ligne.

_

¹¹ Global Sea Level Observing System

¹² Foibe Taosarintanin'i Madagaskara (Service National de la Cartographie)

Tableau 1. Les données de marée de Madagascar disponibles en ligne

Port	IDENTIFIANT			Position	NB ANNEES DE DONNEES	COUVERTURE
	GLOSS	PSMSL ¹³	UHSLC ¹⁴			
Hell-Ville	15	440/001	150 A	13°24'S 48°17'E	14	1958 - 1972
	15	440/002	150 A	13°24'S 48°17'E	08	1987 - 1998
Toliara	_	440/041	-	23°23'S 43°40'E	02	1963 - 1964
Toamasina	_	_	-	-	-	-
Tolagnaro	271	_	-	25°01'S 47°00'E	-	-

4.2.2.2. Les données numérisées au SHOM

La quasi-totalité des données de marée de Madagascar, que ce soit des mesures ponctuelles pendant les missions hydrographiques ou des mesures issues des marégraphes permanents se trouvent au SHOM. Certaines données sont numérisées mais sont demeurées non validées. Une grande partie se trouve dans les archives du SHOM (marégrammes ou cahiers de marée). Un inventaire et catalogage de ces données a été réalisé pendant le stage. Ce catalogue est en annexe 1.

Tableau 2. Les données de marée numérisées et archivées au SHOM

Port	Numero SHOM	LOCALISATION	NB ANNEE DE DONNEES	COUVERTURE
Antsiranana	005	12 16 S 49 17 E	16	1902 - 2003
Antalaha	039	14 53 S 50 16 E	01	1964
Hell-Ville	007	13 24 S 48 17 E	14	1958 - 1972
Maintirano	096	18 03 S 44 01 E	01	1969
Toliara	032	23 23 S 43 40 E	02	1963 - 1964
Toamasina	041	18 10 S 49 25 E	01	1964

4.2.3. L'INVENTAIRE ET CATALOGAGE DES ARCHIVES

L'inventaire des données de marée mené durant le séjour est basé sur les Annales Hydrographiques (A.H.) et les archives disponibles au SHOM. Les informations contenues

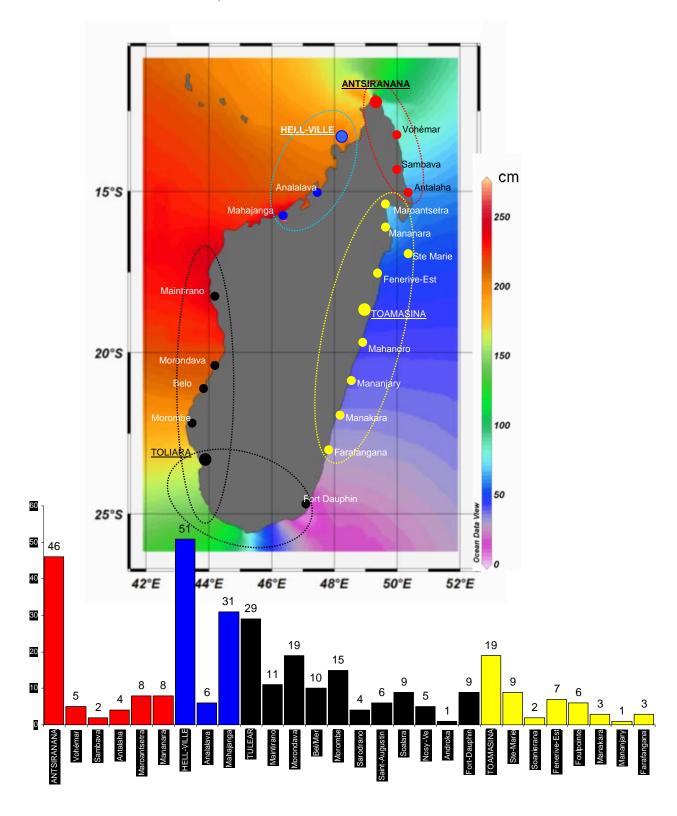
_

¹³ Permanent Service for Mean Sea Level

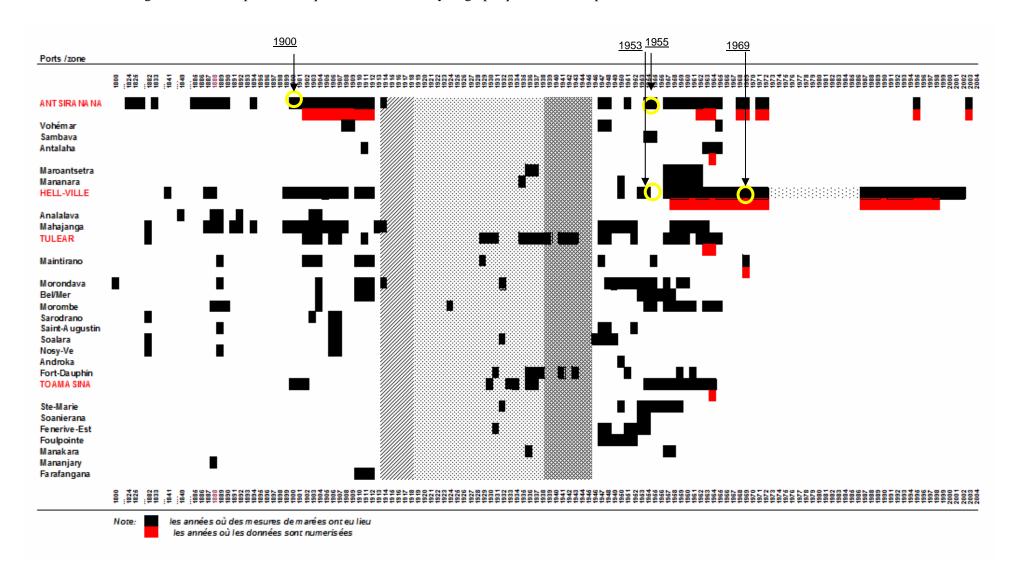
¹⁴ University Hawai of Seal Level Center

dans les A.H. sur les missions hydrographiques menées à Madagascar ont permis d'établir un catalogue et la répartition spatiale et temporelle de ces données (Figure 11).

<u>Figure 11</u>. Répartition spatio-temporelle de données de marée de Madagascar. Le fond de carte indique le niveau moyen. Les ports principaux sont soulignés, les ports secondaires ne le sont pas. La position des ports secondaires est schématique. Graphique : en abscisse, nom des ports, en ordonnée, nombre d'années pendant lesquelles des mesures de marée ont été réalisées (attention, il ne s'agit pas d'un nombre d'années de mesures).



<u>Tableau 3</u>. Diagramme de répartition spatiale et temporelle de données de marée de Madagascar. A gauche, les ports principaux et les ports secondaires. Le cercle jaune correspond aux séries numérisées pendant le stage. Les zones hachurées correspondent aux périodes de la première guerre, inter-guerre et de la deuxième guerre mondiale pendant lesquelles les missions hydrographiques ont été suspendues.



Deux ports principaux ont des séries de données particulièrement longues. Il s'agit du port d'Antsiranana (46 années de mesure discontinues) et de Hell-Ville (51 années discontinues). .C'est la raison pour laquelle ces deux ports ont été choisi pour tenter de constituer des séries homogènes permettant d'évaluer l'évolution du niveau de la mer.

4.2.4. LES NOUVELLES DONNEES NUMERISEES

Il s'agit des séries de mesures de marée d'Antsiranana (1900 et 1955), d'Antalaha (1964), de Hell-Ville (1953 et 1969). Les informations sur la marée sont sur support papier (cahier de marée ou rouleau de marégraphes) (Figure 12). La numérisation de ces séries a permis d'une part, d'allonger les séries qui existaient déjà (pour les ports principaux), d'autre part d'analyser les données de marée des ports secondaires par concordance par espèce pour en déduire les constantes harmoniques.

Figure 12. Différents types de support de données de marée de Madagascar : rouleau (a), cahier de marée (b) et marégramme classique (c). (Archive SHOM).

b



4.2.4.1. METHODE DE NUMERISATION

La méthode de numérisation a été différente selon le type de support de données : saisie manuelle pour les hauteurs de marée enregistrées dans les cahiers, ou à l'aide d'une table à numériser pour les rouleaux et les marégrammes classiques. Une fois numérisées, les données de hauteurs ont été converties en fichiers de hauteurs horaires au format SHOM. Ces fichiers ont fait l'objet de diverses analyses (contrôle de qualité, validation, calcul de niveau moyen, etc.). Le Schéma 2 ci-après résume cette procédure.

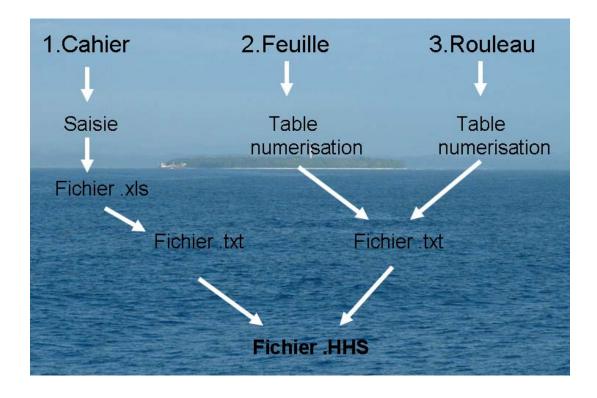


Schéma 2. Procédure de numérisation de données de marée adoptée.

Le passage du fichier .TXT à un fichier horaire .HHS se fait à l'aide d'une routine de commande d'un programme développé par le SHOM (mahh_newf ou crehhs) sur une plateforme SUN. Une description détaillée de l'utilisation de la table à numériser se trouve en annexe 2 de ce rapport.

4.2.4.2. Antsiranana (1900)

Les données disponibles sur la marée de Antsiranana en 1900 provenaient des observations recueillies à partir d'une échelle, puis tracées manuellement sur un marégramme. Ces observations sont rapportées au zéro de l'échelle de marée. Cette échelle fut installée vers l'extrémité de l'appontement de la direction du port d'Antsiranana (. FICHOT, 1899, 1900) (Figure 13), contre une vieille échelle métallique scellée au fond ; le zéro de l'échelle se situe à 2,88 m au-dessous du niveau supérieure de la plateforme de l'appontement. Les observations de marée ont été faites sans interruption, jour et nuit, de quart d'heure en quart d'heure, du 17 avril au 16 mai 1900., soit pendant la durée d'une lunaison

Port d'Antsiranana

M1

Quai du commerce

Echelle (1900)

JK5

A (JK4 bis)

G1

Figure 13. Situation de l'observatoire d'Antsiranana (1900) et repères d'altitude

Source : Fiche observatoire de la marée

REPÈRES D'ALTITUDE

Désignation Description Cote Cote Hauteur rapportée au zéro de rapportée au rapportée à système de l'ellipsoïde réduction des sondes nivellement WGS84 local Repère A Repère fondamental SH, scellé au sud d'un muret at-4,223 m 2,920 m (JK 4 bis) tenant au poste de garde de la porte nº2 de l'arsenal. 1963 Repère F Paille est de la bitte du milieu sur la face nord 4,041 m 2,738 m du quai ouest du bassin du radoub. 2003 Repère G1 Repère de nivellement cylindrique scellé dans le mur 3,238 m 1,935 m (tirant d'air) du bâtiment du quai des phosphates au port de com-2003 Repère JK5 Repère NGM dans le caniveau à l'aplomb d'un py-8,043 m 6,740 m lône, au début de la route qui monte de l'arsenal à la 1963 ville, 9 m après l'escalier.

Extrait de la fiche d'observatoire de marée d'Antsiranana réalisée par le SHOM en 2003.

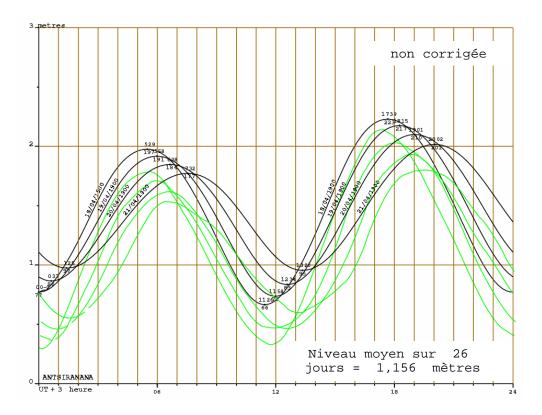
L'analyse graphique de la série numérisée (par tracé comparatif **prédiction/observation**)¹⁵ permet d'apprécier les décalages entre prédictions et observations et par conséquent, de vérifier les calages en hauteurs et d'estimer les corrections éventuellement nécessaires. Les corrections doivent alors être établies en mettant en relation entre les différentes références verticales utilisées (ici le zéro hydrographique en vigueur défini par rapport à des repères et le zéro de l'échelle en 1900 référencé par rapport à la plateforme de l'appontement). Les informations sur l'observatoire de marée (et les mesures de marée) constituent ainsi un outil important lors du contrôle qualité de données. La figure 14 suivante montre le tracé comparatif prédiction/observation de la série Antsiranana (1900) après numérisation. L'écart entre prédiction et observation est important : l'analyse statistique des valeurs observées 16 indique un décalage moyenne de 29.5 cm entre prédiction et observation (cf annexe 3). Ce décalage entre le zéro de l'échelle de marée utilisée en 1900 et le zéro hydrographique traditionnel d'Antsiranana n'a pas été retrouvé...

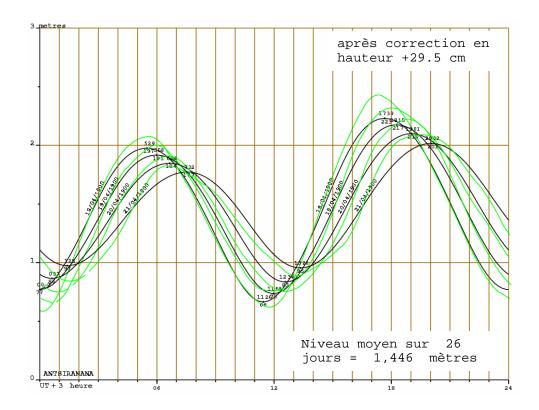
Faute de pouvoir référencer cette série correctement elle a été corrigée de la valeur arbitaire de 29,5cm pour archivage et en attente de futures investigations dans les archives.

 $^{^{15}}$ programme de routine mas 1 3 14 15

¹⁶ programme de routine **mas 1 14 18 16**

<u>Figure 14</u>. Tracé comparatif prédiction/observation de la série Antsiranana (1900)-. En trait noir : prédiction et en vert observation.





4.2.4.3. Antalaha (1964)

La marée d'Antalaha a été observée par la Mission Hydrographique de l'Océan Indien à l'aide d'un marégraphe Brillé (¹). L'échelle des enregistrements était de 1/15 pour les hauteurs et de 15 mm par heure pour les temps. La position de l'observatoire est indiquée sur la figure 15.

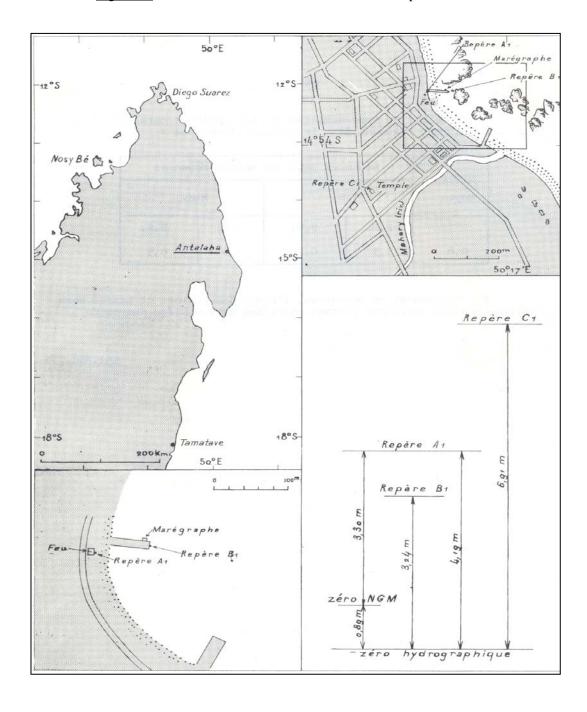


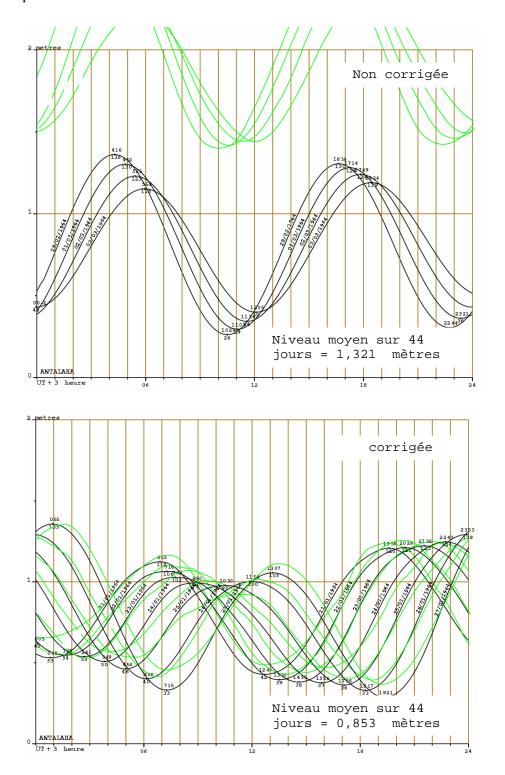
Figure 15. Position de l'observatoire d'Antalaha et repères d'altitude

_

¹ Cf. Fiche d'Observatoire de la Marée (FOM)

Le repère fondamental du marégraphe est constitué par la tangente supérieure à la rondelle scellée dans le soubassement du feu d'Antalaha. Les courbes d'observations de marée du 21 janvier au 22 mars 1964 (51 jours) ont été numérisées et analysées. Le tracé comparatif prédiction/observation (mas 1 3 14 15) et l'analyse statistique par (mas 1 14 18 16) montrent qu'une partie des données ne sont pas calées (cf. figure 16). Une note sur le marégramme indique ce décalage en hauteur et recommande une correction de +1 m : c'est effectivement la différence entre observations et prédictions sur la figure 16.

<u>Figure 16</u>. Tracé comparatif prédiction/observation de la série Antalaha (1964)-. En trait noir : prédiction et en vert observation.



4.2.4.4. HELL-VILLE (1969)

La série de Hell-Ville (1969) est constituée de mesures marégraphiques de la Station Océanographique de Nosy-Be. Ce marégraphe (type Saint-Chamond Granat) est installé à l'extrémité de l'appontement (lat. : 13°24.4S ; lon. 48°17.3 E) de la station et est doté d'une autonomie de 15 jours². (cf. Figure 17).

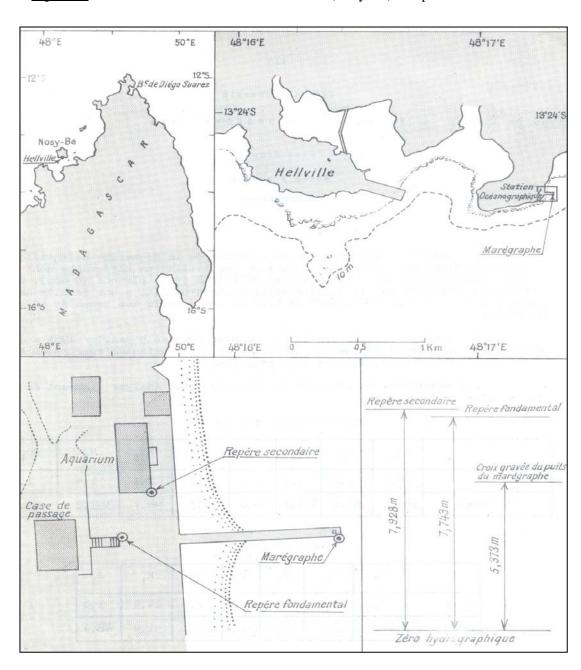


Figure 17. Position de l'observatoire de Hell-Ville (Nosy-Be) et repères d'altitude

-

² Cahier d'observation de la marée, 1958.

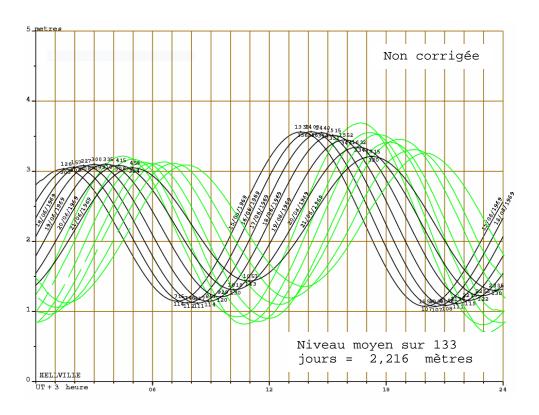
La cote zéro de la graduation en hauteur est repérée par rapport à un repère fondamental (Rfm) constitué par une rondelle SH (Service Hydrographique) scellée dans le pilier nord du portique conduisant à l'appontement. Deux repères secondaires ont été placés, à savoir :

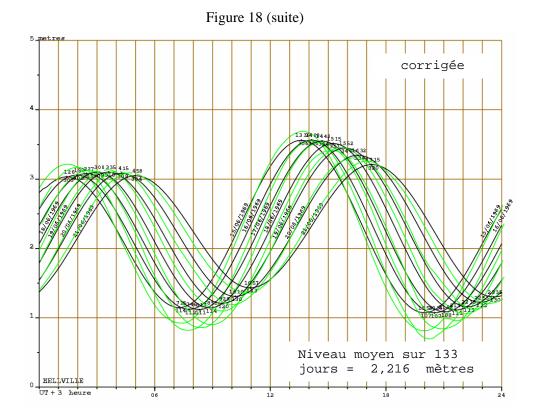
- tête du boulon plantée dans le sol de la véranda sud du bâtiment de l'aquarium dans le coin sud-est du bâtiment ;
- tête du boulon plantée dans le sol de la véranda sud du laboratoire d'Océanographie Physique près de la porte d'entrée.

Entre 1958 et 1974, le repère fondamental A1 n'a pratiquement pas bougé (cf Fiche du Service Hydrographique n°405). Sa cote se trouve à 7,743m au-dessus du zéro hydrographique. Le temps local est TU + 3, La série numérisée recouvre 6 mois de mesure du 14 juin au 25 décembre 1969.

Après numérisation, le tracé comparatif prédiction/observation (les prédictions étant en TU+3) montre un décalage en temps de 3 heures, ce qui indique que l'enregistrement s'est fait en TU + 6, et non en temps local UT+3. La correction consiste donc ici à ramener en TU +3 les données des hauteurs horaires numérisées. Ce type de correction peut se faire à l'aide du programme « mamodif».

<u>Figure 18</u>. Tracé comparatif prédiction/observation de la série Antalaha (1964)-. En trait noir : prédiction et en vert observation.





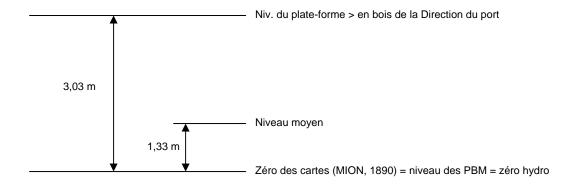
4.2.5. LA VALIDATION DES MESURES HISTORIQUES

Des séries de mesures de marée sont archivées au SHOM dont certaines d'entre elles ne sont pas encore validées. Il s'agit en particulier des données de marée des ports principaux tels que Antsiranana, Toamasina et Toliara. Etant donné l'importante charge de travail pour valider les données, toutes les données n'ont pas été vérifiées durant le stage. L'étude s'est principalement focalisée sur Antsiranana, où les séries sont les plus longues et les informations les plus complètes.

Il s'agit des données de la période 1902 – 1911 dont les valeurs des hauteurs horaires ne sont pas calées en hauteurs. Le système horaire a été vérifié et validé (UT +3) par comparaison prédiction/observation. Les éventuels décalages en hauteurs doivent également être corrigés. Les hauteurs de ces séries sont rapportées au zéro hydrographique (identique au zéro des cartes de M. Mion 1890) ³ défini comme suit :

_

³ Rapport de Mission hydrographiques de Madagascar, M. COURTIER (1906-1907). Annales hydrographiques 1908-9-10-11. p. 215.



Les cotes des repères de 1907 et du zéro hydrographique (plan de réduction des sondes ou zéro des cartes d'Antsiranana et des abords) sont récapitulés dans le tableau suivant :

	COTE AU-DESSUS du zéro hydrographique	COTE AU-DESSUS du zéro des travaux hydrauliques
Zéro hydrographique (cartes, annuaires de marées).	0	-0,15
Zéro des Travaux hydrauliques (bassins, marégraphe).	+0,15	0
Seuil de la fenêtre Nord de la petite face Ouest du		
magasin Ouest de la Marine (repère fondamentale)	+5,75	+5,60
Plate-forme horizontale cimentée de l[extrémité		
maçonnée de l'appontement en bois actuel de la		
Direction du port (1907)	+3,079	+2,929

Par ailleurs, des comparaisons faites en 1907 (travaux de Courtier) entre les marées prédites et les marées observées tous les jours pendant deux à trois mois de fortes marées, montrent que les prédictions de l'annuaire de 1907 sont généralement bonnes à 0,10 m en moyenne et présentent quelquefois des écarts de 0,20 m, voir exceptionnellement de 0,30 m (COURTIER, 1907). De ce fait, Courtier a adopté en 1907 une correction de 20 cm pour toutes les séries de 1902 à 1912. Pour l'heure, on ne dispose pas des informations supplémentaires sur l'acquisition des données, cette correction a été provisoirement reprise pour corriger les données. Le tableau 4 suivant montre les statistiques des séries de 1902-1911, obtenues à partir de mas 1 14 18 16. (4)

_

⁴ Mas 1 14 18 16 permet de calculer les écarts moyens entre valeurs prédîtes et observations ainsi que les statistiques relatives.

<u>Tableau 4</u>. Ecart moyen et écart type des valeurs (observations-prédictions) des séries de 1902-1911

1902	:	écart	moyen	41.9cm	écart	type 8.1	cm
1903	:	écart	moyen	38.9cm	écart	type 7.7	cm
1904	:	écart	moyen	35.7cm	écart	type 8.2	cm
1905	:	écart	moyen	26.4cm	écart	type 9.1	cm
1906	:	écart	moyen	21.7cm	écart	type 7.2	cm
1907	:	écart	moyen	26.0cm	écart	type 7.3	cm
1908	:	écart	moyen	20.3cm	écart	type 6.9	cm
1909	:	écart	moyen	36.3cm	écart	type 7.0	cm
1910	:	écart	moyen	26.0cm	écart	type 6.6	cm
1911	:	écart	moyen	19.0cm	écart	type 7.1	cm

Le tableau suivant récapitule les valeurs moyennes calculées après corrections en hauteur.

<u>Tableau 5</u>. Niveaux moyens annuels (provisoire) des hauteurs de marée d'Antsiranana sur la période 1902-1911

	Non corrigé	Hauteurs Corrigées (+20 cm)	Moyenne COURTIER (1907)
1902	1,013	1,212	-
1903	1,041	1,240	-
1904	1,074	1,274	1,300
1905	1,161	1,361	1,350
1906	1,210	1,410	1,410
1907	1,161	1,361	1,340
1908	1,235	1,435	-
1909	1,065	1,263	-
1910	1,170	1,369	-
1911	1,248	1,448	-

4.2.6. MISE À JOUR DES CONSTANTES HARMONIQUES

A partir des constantes harmoniques, on peut réaliser des prédictions de marée d'un port. Plus les constantes calculées sont précises, meilleures sont les prédictions. Pour obtenir de bonnes constantes, les données de mesures de marée doivent couvrir une période suffisamment longue (en général, 1 an pour une analyse harmonique, 1 mois pour une analyse par

concordance par espèce). Dans le cas présent, des observations simultanées entre deux ports (port principal : Antsiranana et secondaire : Antalaha) sont disponibles pour une période de 82 jours (21 janvier à 23 mars 1964), ce qui permet de calculer les constantes harmoniques d'Antalaha par la méthode de concordance par espèces avec le port d'Antsiranana.

Les constantes disponibles pour Antalaha ne contiennent que 10 composantes harmoniques (cf. tableau 6).

<u>Tableau 6</u>. Fichier de constantes harmoniques d'Antalaha

0039 -145	380 50	1690	30ANTAL	AHA		2	27	6
Z05BHI-95								
NIV MOY	80.00 0.	00 05555	5 1000	0	0			
Q1	1.40 29.	70 13565	5 1000	189	0			
01	4.50 42.	20 14555	5 1000	189	0			
P1	1.90 39.	40 16355	5 1000	0	0			
K1	6.80 42.	20 16555	5 -1000	20	-135			
MU2 2MS2	1.50139.	10 23755	5 1000	-37	0			
N2	7.30 57.	80 24565	5 1000	-37	0			
M2	37.70 81.	30 25555	5 1000	-37	0			
S2	12.60115.	00 27355	5 1000	2	0			
K2	3.20117.	90 27555	5 1000	32	298			

Les nouvelles constantes harmoniques calculées pour Antalaha par concordance par espèces se trouvent en annexe 6. Cinquante (50) composantes harmoniques ont été calculées, ce qui permettra une prédiction de bien meilleure qualité.

4.3. TENDANCES DES NIVEAUX MOYENS ET AUTRES DONNEES REGIONALES

A partir des séries numérisées, les niveaux moyens annuels sont calculés en utilisant les données des hauteurs horaires journaliers (filtre de Demerliac). Seuls, les deux ports qui présentent des séries temporelles plus longues ont été retenus pour le calcul. Il s'agit du port d'Antsiranana et de Hell-Ville dont les données (quoique présentant des lacunes) couvrent respectivement les périodes 1958-1998 pour Hell-Ville et 1902-1972 pour Antsiranana (Figure 19 et 20). Seules les années pour lesquelles on dispose de suffisamment de données (>200 jours) sont gardées pour calculer des niveaux moyens annuels, étant donnée que les variations saisonnières peuvent être très importantes.

Ces deux figures montrent que les tendances vont en sens inverse. Alors qu'à Hell-Ville, le niveau de la mer semble diminuer, à Antsiranana, on constate une tendance à la hausse. On ne peut pas confirmer une réelle tendance pour l'instant, du fait que pour des séries de mesures (en orange), on ne dispose pas des informations suffisantes sur les mesures.

Figure 19. Evolution interannuelle du niveau de la mer d'Hell-Ville sur la période 1958-1998.

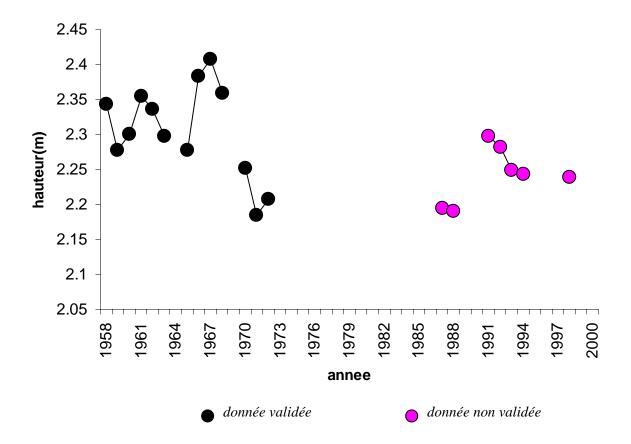
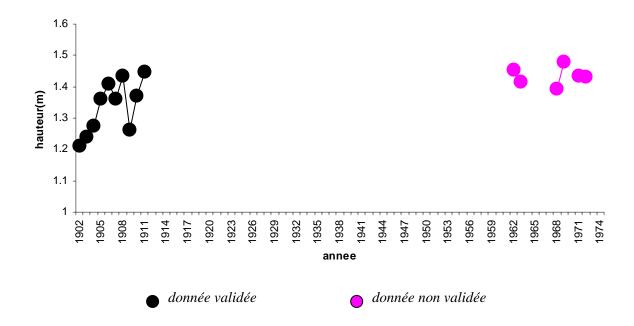
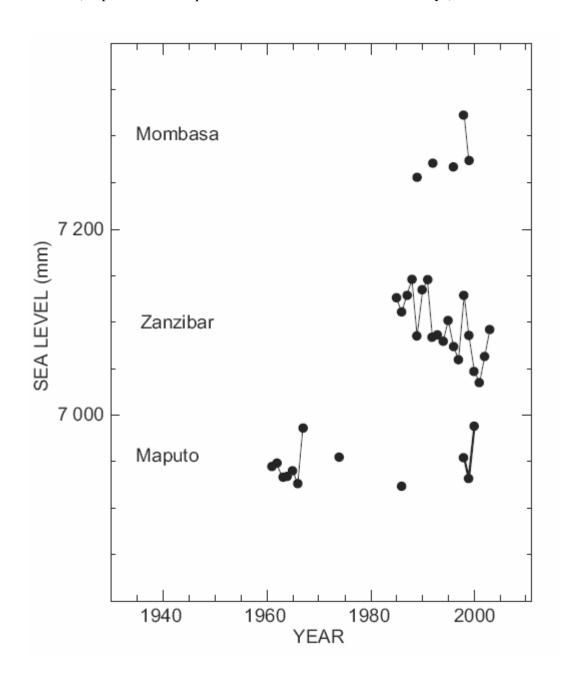


Figure 20. Evolution interannuelle du niveau de la mer d'Antsiranana sur la période 1902-1972.



Des tendances similaires sont aussi observées dans la région, notamment en Afrique de l'Est (Mombasa, Zanzibar et Mozambique) comme le montre la figure 21 suivante. En effet, le niveau moyen semble diminuer à Zanzibar, alors qu'il semble stagner à Maputo. Cependant, il faut faire très attention à la taille des échantillons, les données de Mombasa sont trop courtes pour permettre d'évaluer une tendance, au vu des variations annuelles du niveau moyen.

<u>Figure 21.</u> Séries temporelles des niveaux moyens de la mer pour les trios ports de l'Afrique de l'Est (Maputo, Mozambique ; Zanzibar, Tanzanie; Mombasa, Kenya). *Source:* Woodworth *et al.* (2007)



CONCLUSION

Le séjour de trois mois au sein du SHOM m'a permis (à travers les cours dispensés durant le stage) d'approfondir mes connaissances sur la théorie de la marée ainsi que l'hydrographie côtière, de découvrir le réseau de marégraphes du SHOM, de maîtriser les traitements de données marégraphiques (contrôle qualité, validation, analyse, prédiction).

Un réseau de type RONIM à Madagascar constituerait un outil important pour la gestion de données sur la marée dans le cadre du système national d'alerte aux tsunamis et pour assurer la maintenance et la pérennité des futurs équipements d'observatoires côtiers de Madagascar. L'analyse de quelques séries marégraphiques montre que le niveau moyen de la mer autour de Madagascar semble en accord avec certaines tendances observées dans la région : une augmentation à Antsiranana et une diminution à Hell-Ville. Des tendances qu'il faudrait considérer avec une certaine prudence, dans la mesure où, d'une part, les séries numérisées ne sont pas toujours suffisamment longues pour fournir une tendance fiable à long terme, et d'autre part, les informations manquantes sur certaines séries de mesures ne permettent pas leur validation.

Perspectives

Au vu du volume très important des données disponibles à Madagascar, le temps imparti (3 mois) ne permet malheureusement pas de tout exploiter. Cependant, les connaissances acquises pendant ce stage permettront d'une part un transfert de compétences et d'autre part d'assurer ainsi la viabilité de nos centres nationaux de données océanographiques.

Il est fortement souhaitable que l'effort de numérisation et de validation des séries marégraphiques à Madagascar soit poursuivi afin d'établir les tendances à long terme de variation du niveau de la mer à Madagascar.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'UNESCO-IOC pour l'IOTWS Fellowship Program qui m'a permis de réaliser cette formation intéressante. Je remercie en particulier Madame Martin Belén Miguez, qui s'est beaucoup investie pour la réalisation de ce stage.

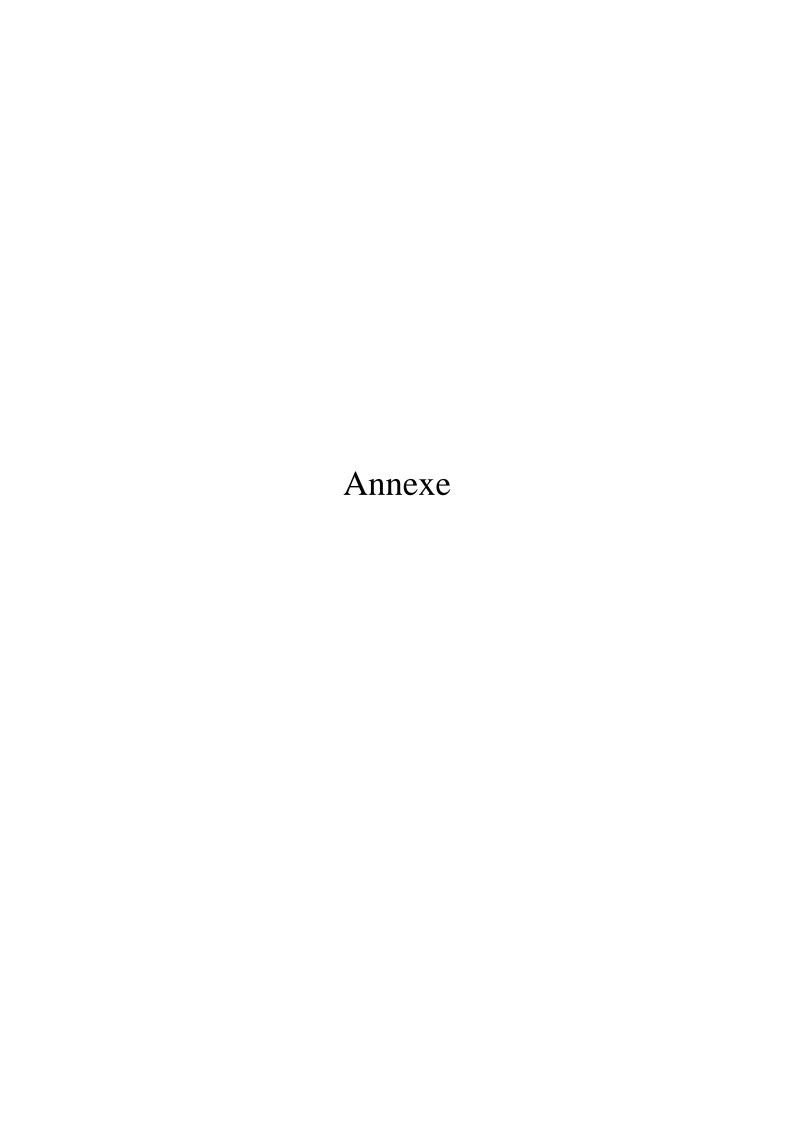
Je remercie le SHOM pour m'avoir accueilli pour ces 3 mois de formation, et en particulier la section MIP/PEP (Laurent Louvart). Je remercie également le secrétariat MIP pour sa disponibilité et toute l'équipe de la cellule Hydrodynamique Côtière pour leur accueil chaleureux et leur hospitalité. Lucia Pineau-Guillou et Ronan Créach reçoivent en particulier mes remerciements pour l'encadrement technique et scientifique qu'ils ont apportés, ainsi que François Lucas, Joëlle Laurent, Virginie Goirand, Michel Le Goff et Pascal Le Dû pour leur support technique. Enfin, je remercie Raymond Jehan pour l'ambiance conviviale qu'il apporte à l'équipe.

Enfin, je remercie vivement Bernard Simon qui était à l'initiative de cet échange.

QUELQUES REFERENCES

- Favé (1888). Rapport de la Mission Hydrographique de Madagascar 1887-1888. *Annales Hydrographiques 1889-90, p. 39*.
- Fichot M. (1899-1900). Rapport de Mission Hydrographiques de Madagascar, *Annales Hydrographiques* 1903-4.5, p. 103.
- Mion (1890). Rapport de Mission hydrographiques de Madagascar, M. COURTIER (1906-1907). *Annales hydrographiques 1908-9-10-11. p. 215.*
- Mission Hydrographique de Madagascar (10 mai 1957-7mai 1959). *Annales Hydrographiques 1959-1960*, p. 247.
- Okal, E. A.; Fritz, H. M.; Raveloson, R.; Joelson, G.; Pancoskova, P.; Rambolamanana, G. (2005). Field Survey of the 2004 Indonesian Tsunami in Madagascar. *American Geophysical Union, Fall Meeting* 2005, *abstract* #U11A-0827.
- Pararas-Carayannis G. (2006). The Great Earthquake and Tsunami of 26 December 2004 in Southeast Asia and the Indian Ocean
- Rastogi B. K. and Jaiswal R. K. (2006). A catalog of tsunamis in the Indian Ocean 128. *The International Journal of The Tsunami Society, Volume 25 Number 3*
- Razakafoniaina N. T (1999). Sea level measurement and analysis in the western Indian ocean. *National reports-Madagascar*.
- Unesco/ioc (2005). Expert missions to indian ocean countries to assess requirements and capacity for an effective and durable national tsunami warning and mitigation system, *Mission Report No 16 UNESCO*, *Antananarivo*, 5-7 July 2005
- Unesco/ioc (2006). Development of a sea level data service for Africa. Document projet Odinafrica, *IOC*, *Paris*; 12 July 2006
- Woodworth1 PL, Aman A and Aarup T (2007). Sea level monitoring in Africa. *African Journal of Marine Science* 2007, 29(3): 321–330





Catalogue de mesures recentes de marée à Madagascar (archive SHOM)

Nom du Port	Auteur	Numero archive SHOM	Titre	année	Date Début	Fin	Frequence d'acquisition	Format	Commenta	aires
ANTSIRANANA			Rouleau de marée	1900	avril	mai	60 mn	papier	numerisé (2008)	exploitable
	DEVASSAY	36/127	Feuille de marrée	1901-1902				papier	non numérisé	. ?
	CAUVET	36/171	Feuille de marrée	1905				papier	non numérisé	?
	LEBAIL	36/252	Feuille de marrée	1914				papier	non numérisé	?
	SAUZAY	323	Feuille de marrée	1948-1949				papier	non numérisé	exploitable
	POUJOL		Feuille de marrée	1955				papier	non numérisé	exploitable
			Feuille de marrée	1955				papier	non numérisé	exploitable
	"JEANNE D ARC"		Cahier de maree	1955	23-Jan	31-Jan	15mn	papier	numérisé (2008)	exploitable
		616	Feuille de marrée	1955				papier		
	ROUBERTOU	762-1,2,3	Feuille de marrée	1957-1958	sept	avr		papier	non numérisé	exploitable
		850	Feuille de marrée	1958-1959	nov	et avr		papier	non numérisé	exploitable
	PUYCOUYOUL		Feuille de marrée	1960	13-Jan	29-Jan		papier	non numérisé	exploitable
	DARS		Feuille de marrée	1961	mars	avr		papier	non numérisé	exploitable
	27.11.13		Feuille de marrée	1961-1962	1-Jan	1-Jan		papier	non numérisé	exploitable
	PASQUAY		Feuille de marrée	1963,64,65	30-dec	4-Jan		papier	non numérisé	exploitable
		<u> </u>								
Port de la Nievre	ORTAIS	413	Feuille de marrée	1951	5-fev	5-fev		papier	non numérisé	exploitable
Vohémar			Feuille de marrée					papier	non numérisé	exploitable
Sambava	POUJOL	614	Feuille de marrée	1954-1955				papier	non numérisé	exploitable
Antalaha			Feuille de marrée					papier	non numérisé	exploitable
	PASQUAY	1277	Feuille de marrée	1964	20-Jan	28-fev		papier	non numérisé	exploitable
Maroantsetra	ROUBERTOU	8/0	Feuille de marrée	1958	fev	avr		papier	non numérisé	exploitable
Maioanisena	ROOBERTOO		Feuille de marrée	1957-1958	oct	et oct			non numérisé	exploitable
		650	i euille de mairee	1937-1936	OCI	el oci		papier	non numense	exploitable
Mananara	ROUBERTOU	848-1	Feuille de marrée	1957	sept	dec		papier	non numérisé	exploitable
		848-2	Feuille de marrée	1958	fev	fev		papier	non numérisé	exploitable
		848-3	Feuille de marrée	1958	mars	avr		papier	non numérisé	exploitable
		848-4	Feuille de marrée	1957-1958	dec	avr		papier	non numérisé	exploitable
	PUYCOUYOUL	870	Feuille de marrée	1960	03-fev	05-fev		papier	non numérisé	exploitable
Can Massala	ORTAIS	406	Feuille de marrée	1950	05-dec	15-dec		panior	non numérisé	ovnloitable
Cap Masoala								papier		exploitable
	ROUBERTOU		Feuille de marrée	1958	21-Sep	4-Oct		papier	non numérisé	exploitable
	DARS		Feuille de marrée Feuille de marrée	1961-1962 1962	5-Nov 23-Jan	1-Mar 09-fev		papier	non numérisé	exploitable
		1081	reulle de marree	1962	23-Jan	u9-iev		papier	non numérisé	exploitable
HELL-VILLE: Ankify, Ambaro	DEVASSAY	36/128	Feuille de marrée	1901-1902				papier	non numérisé	?
		36/129	Feuille de marrée	1901-1902				papier	non numérisé	?
	COURTHIER	36/140	Feuille de marrée	1902-1903				papier	non numérisé	?
	????	36/195	Feuille de marrée	1908				papier	non numérisé	?
			Cahier de marée	1953	6-Jun	06-dec	15 mn	papier	numerisé(2008)	exploitable
	ROUBERTOU	753-3	Feuille de marrée	1958	juin	juin		papier	non numérisé	exploitable
	PUYCOUYOUL	946	Feuille de marrée	1959-19601-9	sept -08-oct	12-13 mai		papier	non numérisé	exploitable
	????		Rouleau de marée	1969	14-Jun	31-dec	60 mn	papier	numerisé(2008)	exploitable
Analalava/Nosy-Lava/B.Narinda	DRIENCOURT	26/20	26 feuilles de marrée	1891-92				nonios	non numário á	?
M/nga/B. Bombetoka/C. St André	DRIENCOURT	00/04	0 1 1 1					papier	non numérisé	í
			Calcul de constantes	1891-92				papier	non numerise	ľ
	041157 05 111015		ondes maree M/ga	1891-92				papier	non numérisé	?
	CALLET DE L'ISLE		04 feuilles de marée	1894				papier	non numérisé	?
	FICHOT		19 feuilles de marée	1899-1900				papier	non numérisé	?
	CAUVET		05 feuilles de marée	1901				papier	non numérisé	?
	DEVASSAY		11 f. marée M/ga	1901-1902				papier	non numérisé	?
			05 f. marée Berav.	1901-1902				papier	non numérisé	?
	LESAGE		10 feuilles de marrée	1906				papier	non numérisé	?
		36/188	10 feuilles de marée	1906-1907				papier	non numérisé	?
	????	36/195	12 feuilles de marée	1908				papier	non numérisé	?
	GRELLIER	36/240	03 feilles de marée	1913-1914				papier	non numérisé	?

	POUJOL	312-1,2 Feuille de marrée	1948	mai	juin	papier	non numérisé	exploitable
	SAUZAY	337-1,2,3,4 Feuille de marrée	1948-1949		•	papier	non numérisé	exploitable
		338-1,2 Feuille de marrée	1948-1949			papier	non numérisé	exploitable
		339 Feuille de marrée	1948-1949			papier	non numérisé	exploitable
	BREMOND	371-1,2 Feuille de marrée	1950			papier	non numérisé	exploitable
	BREMOIND	372 Feuille de marrée	1950			papier	non numérisé	exploitable
	ORTAIS	379 Feuille de marrée	1950	26-Oct	31-Oct	papier	non numérisé	exploitable
	EYRIES	475-bis 1,2 Feuille de marrée		oct-nov 1951	30-Jul			•
		•				papier	non numérisé	exploitable
	PUYCOUYOUL	882 Feuille de marrée	1960	19-Apr	27-Apr	papier	non numérisé	exploitable
	DARS	1053 Feuille de marrée	1961	sept	oct	papier	non numérisé	exploitable
Port aux galets	EYRIES	449-b Feuille de marrée	1952	11-Jan	2-fev	papier	non numérisé	exploitable
TULEAR	SAUZAY	317-1,2 Feuille de marrée	1948-1949			papier	non numérisé	exploitable
	POUJOL	306-1,2,3,4,5 Feuille de marrée	1947-1948			papier	non numérisé	exploitable
	ROUBERTOU	753-2 Feuille de marrée	1957	juil	sept	papier	non numérisé	exploitable
		754-3 Feuille de marrée	1958	juin	juil	papier	non numérisé	exploitable
		867 Feuille de marrée	1958	20-Jul	14-Sep	papier	non numérisé	exploitable
	PASQUAY	1280 Feuille de marrée	1964	12-Sep	17-Nov	papier	non numérisé	exploitable
Maintirano		Feuille de marrée				papier	non numérisé	exploitable
Morondava	LEBAIL	36/245 Feuille de marrée	1914			papier	non numérisé	?
Wordinava	SAUZAY	Feuille de marrée	1948-1949			papier	non numérisé	exploitable
	ORTAIS	393-1,2,3,4 Feuille de marrée	1950	26 aout	19-Oct		non numérisé	exploitable
	EYRIES	469-2 Feuille de marrée	1952	26 aout 01-aout		papier		•
					30-Sep	papier	non numérisé	exploitable
	PUYCOUYOUL	936-1 Feuille de marrée	1959	6-Jun	22-Jun	papier	non numérisé	exploitable
Bel/Mer	POUJOL	638 Feuille de marrée	1954			papier	non numérisé	exploitable
		639 Feuille de marrée	1955			papier	non numérisé	exploitable
	BRIC	700 Feuille de marrée	1956	mai	juin	papier	non numérisé	exploitable
		701 Feuille de marrée	1956	juin	sept	papier	non numérisé	exploitable
		702 Feuille de marrée	1956-1957	sept	juin	papier	non numérisé	exploitable
	ROUBERTOU	753-1 Feuille de marrée	1957	juil	aout	papier	non numérisé	exploitable
		703 Courbe de concord	1956	•		papier	non numérisé	exploitable
Morombe	FICHOT	36/38 marées et courants	1888-90			papier	non numerisé	?
	COLLATRIX	217-16-17,6-17,7 Feuille de marrée	1924			papier	non numerisé	?
	ROUBERTOU	754-1,2 Feuille de marrée	1958	juin	sept	papier	non numérisé	exploitable
	PUYCOUYOUL	905-1 Feuille de marrée	1959	16-12 mai	2-3 juin	papier	non numérisé	exploitable
	FOICOOTOOL	905-2 Feuille de marrée	1960	30-Jun	4-Jul			•
						papier	non numérisé	exploitable
		905-3 Feuille de marrée	1960	03-aout	06-aout	papier	non numérisé	exploitable
		906-1 Feuille de marrée	1960	27-Jun	29-Jun	papier	non numérisé	exploitable
	5456	906-2 Feuille de marrée	1960	24-Jun	2-Jul	papier	non numérisé	exploitable
	DARS	1023 Feuille de marrée	1961	mai	juin	papier	non numérisé	exploitable
		1024 Feuille de marrée	1961	juil	juil	papier	non numérisé	exploitable
		1025 Feuille de marrée	1960	mai	juil	papier	non numérisé	exploitable
		1026 Feuille de marrée	1961	mai	juil	papier	non numérisé	exploitable
Sarodrano		1027 Feuille de marrée	1961	mai	juin	papier	non numérisé	exploitable
Saint-Augustin	EYRIES	482-2 Feuille de marrée	1952	30-Apr	29-May	papier	non numérisé	exploitable
Soalara	SAUZAY	317-1,2 Feuille de marrée	1948-1949			papier	non numérisé	exploitable
- 3	POUJOL	305-1,2	1947-1948			papier	non numérisé	exploitable
Nosy-Ve	. 00002	Feuille de marrée				papier	non numérisé	exploitable
Androka	AURTAIS	385-1,2 Feuille de marrée	1950			papier	non numérisé	exploitable
Fort-Dauphin	EYRIES	464-2 Feuille de marrée	1951	29-Nov	16-dec	papier	non numérisé	exploitable
<u> </u>						papioi		
TOAMASINA	SAUZAY	351-4 Courbe de marrée	1948-1949			papier	non numérisé	exploitable
	BOURERTOU	562-2 Maregrammes	1954	dee	do-	papier	non numérisé	exploitable
	ROUBERTOU	861 Feuille de marrée	1958	dec	dec	papier	non numérisé	exploitable
	PUYCOUYOUL	980-1,2,3,4,5 Feuille de marrée	1959-1960	2-Nov	11-Mar	papier	non numérisé	exploitable

	DARS	999 Feuille de marrée	1960	nov	nov	papier	non numérisé	exploitable
Ste-Marie	EYRIES	Feuille de marrée	1954	19-Jan	28-Jan	papier	non numérisé	exploitable
Ste Mane	POUJOL	614 Feuille de marrée	1954-1955	15 0411	20 Juli	papier	non numérisé	exploitable
	BRIC	675 Feuille de marrée	1956-1957	1-Oct	30-Apr	papier	non numérisé	exploitable
	Bitto	676 Feuille de marrée	1956	1-Jan	30-Apr	papier	non numérisé	exploitable
		677 Feuille de marrée	1956	oct	nov	papier	non numérisé	exploitable
		678 Feuille de marrée	1957	mars	mars	papier	non numérisé	exploitable
		679 Feuille de marrée	1956-1957	dec	avr	papier	non numérisé	exploitable
		680 Feuille de marrée	1957	mars	avr	papier	non numérisé	exploitable
		681 Courbe de concord	1001	maro	uv.	papier	non numérisé	exploitable
	ROUBERTOU	852 Courbe de concord	1957	nov	dec	papier	non numérisé	exploitable
Soanierana	EYRIES	559 Feuille de marrée	1953	29-Nov	14-dec	papier	non numérisé	exploitable
		562	1953	27-Nov	01-dec	papier	non numérisé	exploitable
		562	1954	18-Jan	08-fev	papier	non numérisé	exploitable
Fenerive-Est	ORTAIS	419-1,2,3,4 Feuille de marrée	1951	16-fev	28-Apr	papier	non numérisé	exploitable
	EYRIES	428-1,2,3,4 Feuille de marrée	1952	11-Mar	26-Mar	papier	non numérisé	exploitable
		429-2 Feuille de marrée	1952	28-fev	6-Mar	papier	non numérisé	exploitable
		560 Feuille de marrée	1954	17-Apr	30-Apr	papier	non numérisé	exploitable
		561 Feuille de marrée	1954	1-May	3-May	papier	non numérisé	exploitable
Foulpointe	SAUZAY	351-1,2,3 Feuille de marrée				papier	non numérisé	exploitable
•	BREMOND	370-1,2,3 Feuille de marrée	1950			papier	non numérisé	exploitable
Manakara								•
	ROUBERTOU	861 Feuille de marrée	1958	dec	dec	papier	non numérisé	exploitable
Mananjary								
Farafangana	????	36/228 13 feuilles de marrée	1911-1912			papier	non numérisé	?

NOTE: Les dates en rouge indiquent que la feuille de marée se trouve hors SHOM

Annexe 2. Protocole de numérisation des marégrammes

DE LA NUMERISATION AU FICHIER AU FORMAT.HHS

La numérisation des feuilles de marée se fait à l'aide d'une table à numériser model BENSON 6301.

Reliée à un PC, et munie d'un programme écrit sous MS-DOS, elle permet la visualisation directe et instantanée des courbes de marée issues de la numérisation. Ceci permet de réaliser, de visu, une première appréciation de la qualité de données, et d'effectuer une correction si nécessaire. Une préparation préalable des feuilles de marée s'impose pour faciliter la tâche et éviter d'éventuelles erreurs lors de la numérisation.

1. Conditions requises

Les feuilles de marée doivent contenir des courbes nettes et cohérentes. La fréquence de mesures de marée peut être variable: continue, tous les quart d'heures (15 mm) ou toutes les heures 60 mm).

2. Préparation préalable

Toutes les courbes doivent comporter la date (année, mois, jour, heure). Le cycle de marée est mesuré en jour solaire (24H), les heures 00H et 23H doivent figurer sur la feuille de marée ainsi que les hauteurs minimales (0m ou la hauteur des plus basses mers du marégrammes) et maximales (hauteur maximale des plus hautes mers du marégramme).

3.La numérisation

Une fois les feuilles ainsi préparées, il faut procéder au "calage" de la (ou des) courbe(s) à numériser. Cette opération consiste à transmettre à la table de numérisation toutes les informations concernant les courbes à numériser. Les informations de la courbe de marée à numériser doivent impérativement se situer à l'intérieur de la zone active de la table. Cette zone est définie par quatre points virtuels sur la table: en bas à gauche, en bas à droite, en haut à droite et en haut à gauche.

La numérisation proprement dite débute par la mise en route du programme "AC.EXE" sous le répertoire de travail, en tapant à partir de l'invite DOS (C:\MAREE\) la commande "AC.EXE" suivi d'une validation. Des lignes d'options de numérisation apparaissent et invitent l'utilisateur à répondre:

L'affirmation à cette dernière question conduirait à l'étape suivante:

POINTER 1H
POINTER 23H
POINTER HAUTEUR A 1H

Un écran vierge de visualisation de courbes de marée apparaît avec des informations rappelant la date et l'heure de début de la numérisation. En glissant le pointeur de la table le long de la courbe (ou en cliquant par pas de 1H), les hauteurs horaires s'affichent à l'écran (par pas de 1H). Une courbe apparaît à chaque fin de cycle(à 23H) permettant d'apprécier la qualité de la numérisation. Elle est toujours suivie par:

CORRECT (O/N)---->

ce qui permet la reprise ou non de la numérisation.

4. Du fichier ASCII vers .HHS (fichier horaire)

Le fichier issu de la numérisation est en format ASCII (.txt). Pour être exploitable, une conversion en format horaire (.HHS) s'impose. Pour cela, un script "mahh_newf" est utilisé, et le fichier ".hhs" résultant pourra être utilisé à des fins d'analyses diverses.

Annexe 3. Niveau moyen Antsiranana (1900)

```
* Niveau moyen de Antsiranana_1900.mod
                                                  Constante : 0,00
* commentaire : corrigé +20 cm
       Avril
               Mai
        1900
               1900
    1
               1,344
               1,351
    2
    3
               1,347
    4
               1,392
    5
               1,398
               1,379
    6
   7
               1,358
   8
               1,375
   9
               1,364
   10
               1,371
   11
               1,370
               1,364
  12
               1,358
  13
  14
  15
  16
  17
  18
       1,351
       1,334
   19
       1,334
   20
   21
       1,317
       1,326
   22
       1,350
   23
       1,360
   24
       1,350
   25
   26
       1,366
   27
       1,362
       1,351
   28
   29
       1,352
       1,346
   30
   31
Niveau
moyen 1,346 1,366
mensuel
```

Niveau moyen sur 26 jours = 1,356 mètres

Annexe 4. Niveau moyen Antalaha 1964.

```
* Niveau moyen de 039.ANTALAHA_1964_corrige
                                            Constante : 0,00
* commentaire : *** neant ***
        Janv.
               Fevr.
                       Mars
        1964
               1964
                       1964
                0,807
                       0,957
    1
                       0,929
    2
               0,834
                       0,893
    3
               0,857
                       0,883
    4
               0,831
                       0,880
    5
               0,846
    6
               0,851
                       0,881
                       0,931
   7
               0,859
   8
               0,895
                       0,898
   9
               0,916
                       0,843
                       0,842
   10
               0,935
               0,914
                       0,819
   11
   12
                       0,812
               0,920
                       0,848
               0,925
   13
                       0,846
  14
               0,921
                        0,812
  15
                        0,787
  16
                        0,775
  17
  18
                        0,793
   19
                        0,837
   20
                        0,858
   21
   22
       0,840
   23
       0,837
   24
       0,822
   25
       0,796
       0,806
   26
   27
       0,826
       0,795
   28
       0,782
   29
       0,789
   30
   31
       0,806
Niveau
moyen 0,809 0,879 0,856
mensuel
```

Niveau moyen sur 44 jours = 0,853 mètres

Annexe 5. Niveau moyen Hell-Ville (1969)

* Niveau moyen de Hellville_1969.int.mod Constante : 0,00

*	commentaire	:	corrigé	en	UT+3
---	-------------	---	---------	----	------

		3					
	Juin 1969	Juil. 1969	Aout 1969	Sept. 1969	Oct. 1969	Nov. 1969	Dec. 1969
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	2,081 2,078 2,087 2,158 2,178 2,209 2,214 2,233 2,251 2,277 2,259 2,177 2,123 2,189 2,224	2,213 2,187 2,192 2,207 2,218 2,212 2,223 2,215 2,170 2,143 2,133 2,128 2,166 2,176 2,189 2,222 2,237 2,227 2,227 2,227 2,227 2,227 2,188 2,175 2,188 2,175 2,188 2,175 2,188 2,222 2,175 2,188 2,222 2,175 2,189 2,182 2,175 2,189 2,182 2,175 2,189 2,182 2,175 2,189 2,182 2,175 2,189 2,182 2,175 2,189 2,182 2,175 2,189 2,182 2,175 2,189	2,249 2,245 2,206 2,192 2,197 2,182 2,195 2,196 2,233 2,236 2,264 2,254 2,256 2,253 2,229 2,182 2,171 2,161 2,150 2,173 2,190 2,198 2,205 2,192 2,196 2,211	2,225 2,225	2,216 2,262 2,310 2,328 2,326 2,307 2,286 2,252 2,246 2,248 2,253 2,277 2,273 2,277 2,273 2,270 2,246 2,206 2,200 2,195	2,201 2,245 2,232 2,233 2,260 2,289 2,265 2,272 2,275 2,264	2,229 2,246 2,255 2,213 2,183 2,150 2,154 2,160
moyen mensuel	2,182	2,202	2,208	2,207	2,266	2,251	2,198

Niveau moyen sur 131 jours = 2,216 mètres

<u>Annexe 6</u>. Caractéristiques des constantes harmoniques d'Antalaha, par la méthode de concordance par espèces

0 39 -1 0 9	4538000 +050	169000+03	OANTA	LAHA		1964	21	25
NIV MOY	76.76359.82	ZZZZZZZ						
SA	4.33319.70							
SSA	0.69101.03							
MSM	0.29 41.02		72	ZAXAYZB	65	ZAXAAZB		
MM	2.18 32.65		66	ZAZYYZB	65	ZAZYAZB		
MSF	2.25197.76		72	ZBXZYZZ	64	ZBXZAZB		
MF	0.24297.27		/ 2		04	ZDXZAZD		
2Q1	0.15 8.97		189	AWZBYZY				
SIGMA1	0.13 8.37			AWBZYZY				
	1.00 43.33			AXZAYZY				
Q1 RHO1	0.16112.30			AXBYYZY				
01	4.60 56.28		189					
MS1	0.34340.35		109	AYZZYZY				
MP1	0.87116.49		227	7 1737 7 371737				
A19	0.23 71.11		227	AZXAYZY				
M1	0.43 39.52							
KHI1	0.08 77.85							
PI1	0.16239.84							
P1	1.58 38.08							
S1	0.03130.01							
K1	5.75 44.20		20	AAZZYZY	135	AAZZAZA		
PSI1	0.59243.01							
PHI1	0.25149.88							
THETA1	0.07291.44							
J1	0.42 41.29							
S01	0.40124.05							
001	0.36 84.14							
KQ1	0.06121.82							
2MN2S2	0.28201.39		112	BUDAYZB				
2NS2	0.09318.16		75	BVBBYZB				
3M2S2	0.33290.10		112	BVDZYZB				
OQ2 MNK2	0.34147.00		279	BWZAYZZ				
MNS2	0.64155.70		75	BWBAYZB				
MNUS2	0.47113.30			BWDYYZB				
2N2 2NM2	0.23341.70		37	BXZBYZB				
MU2 2MS2	1.88168.59		37	BXBZYZB				
	0.43241.96							
N2	6.25 54.07		37	BYZAYZB				
NU2	1.73102.39		37	BYBYYZB				
OP2 MSK2	1.45148.15		260	BZXZYZZ				
M(SK)2	2.94 70.23							
M2	40.59 71.78		37	BZZZYZB				
M(KS)2	0.10330.83							
MKS2	3.12265.83		37	BZBZYZB	298	BZBZAZZ		
LAMBDA2				BAXAYZB				
L2 2MN2	3.84 79.10		37	BAZYYZB				
Т2	0.93141.16							
S2	18.03113.19		2	BBXZYZZ				
R2	1.03187.55	BBYZZYB						
K2	4.47119.62			BBZZBZZ		BBZZAZZ		
MSN2	1.62287.53					BCXYAZB		
KJ2 MKN2	0.05248.46		37	BCZYYZB	260	BCZYAZZ		
2SM2	0.70353.94	BDVZZZZ						
SKM2	0.59300.07	BDXZZZZ						

MOS	0.16128.45	0.000.000	1 5 2	0V71V7V		
MQ3			152	CXZAYZY	20	037003037
2MK3	0.33150.70 0.18194.03		61 5.6	CYZZYZY	20	CYZZAZY
M3		_	56 100	CZZZYZA		
S03	0.36153.10		189	CAXZYZY		
MS3	0.15180.67	_				
MK3	0.55136.91	_				
A87	0.02128.70					
SP3	0.19161.04					
S3	0.08164.22					
SK3	0.26197.78		20	CCXZYZY	135	CCXZAZA
K3	0.13183.77	CCZZZZA	20	CCZZYZY	433	CCZZAZA
2NMS4	0.02166.02	DVBBZZZ	112	DVBBYZB		
2MMUS4	0.02214.39	DVDZZZZ	112	DVDZYZB		
2MNS4	0.02316.52	DWBAZZZ	112	DWBAYZB		
2MNUS4	0.04320.02	DWDYZZZ	112	DWDYYZB		
3MS4	0.07 60.20	DXBZZZZ	112	DXBZYZB		
MN4	0.12325.78	DYZAZZZ	75	DYZAYZB		
2MSK4	0.05113.55	DZXZZZZ	223	DZXZYZZ		
M4	0.31331.19	DZZZZZZ	75	DZZZYZB		
2MKS4	0.08139.20	DZBZZZZ	75	DZBZYZB	298	DZBZAZZ
SN4	0.04 79.86	DAXAZZZ	37	DAXAYZB		
3MN4ML4	0.05200.59	DAZYZZZ	112	DAZYYZB	37	DAZYAZB
2SMK4	0.05156.13		261	DBVZYZZ		
MT4	0.12121.73		37	DBWZYAB		
MS4	0.43 14.05		37	DBXZYZB		
MK4	0.16 5.13		37	DBZZYZB	298	DBZZAZZ
2SNM4	0.07139.43		37	DCVAYZB	37	DCVAAZB
2MKN4	0.02300.81		75	DCZYYZB	261	DCZYAZZ
S4	0.11 95.43		, 5	DOLLILD	201	20211122
SK4	0.10 76.12					
3MNS6	0.02 48.82		149	FWBAYZB		
2NM6	0.01229.89		112	FXZBYZB		
4MS6	0.02 44.62		149	FXBZYZB		
2MN6	0.02 44.02		112	FYZAYZB		
2MNU6	0.03279.38		112	FYBYYZB		
M6			112			
MSN6	0.06310.99			FZZZYZB		
-	0.02337.78		75	FAXAYZB	2.77	
4MN.2ML6	0.01 73.18		149	FAZYYZB	37	FAZYAZB
2MS6	0.14348.88		75	FBXZYZB	007	
2MK6	0.04 6.33		75	FBZZYZB	297	FBZZAZZ
2SN6	0.02101.67		37	FCVAYZB		
3MSN6	0.01164.26		112	FCXYYZB	37	FCXYAZB
3MKN6	0.01354.67		112	FCZYYZB	260	FCZYAZZ
2SM6	0.07 44.56		37	FDVZYZB		
MSK6	0.06 50.87		37	FDXZYZB	297	FDXZAZZ
2MNS8	0.02322.69		112	HWBAYZB		
3MN8	0.02358.54		149	HYZAYZB		
3MNU8	0.03357.17		149	HYBYYZB		
2MSK8	0.02157.58		148	HZXZYZZ		
M8	0.05319.30		149	HZZZYZB		
3MS8	0.07 12.43	HBXZZZZ	112	HBXZYZB		
3MK8	0.02 22.50		112	HBZZYZB	297	${\tt HBZZAZZ}$
MSNK8	0.02 58.28	HCXAZZZ	75	HCXAYZB	297	HCXAAZZ
4MKN8	0.01331.69	HCZYZZZ	149	HCZYYZB	260	HCZYAZZ
2(MS)8	0.07 47.67	HDVZZZZ	75	HDVZYZB		
2MSK8	0.03 67.44	HDXZZZZ	75	HDXZYZB	297	HDXZAZZ

<u>Annexe 7. Catalogue des Tsunamis dans l'Océan Indien</u> (Source : Rastogi et al., 2006)

S. N.	Date	Location	Long.	Lat.	Eq. Mag	Cau	Pr o	I	Max Run up (run ups)	Ref.
1	326 B.C.	Indus delta /Kutch region				1	4			Lisitzin (1974)
2	About 500 AD	Poompuhar, Tamilnadu (probably due to Krakatau eruption)	79.52	11.12			4			Wikipedia
3	900 AD	Nagapattinam, Tamilnadu (may be from Sunda- Andaman arc)	79.53	10.46			4			Kalaki Krishnamurt y
4	1008	Iranian Coast	60	25		1	4			Murty et al. (1999)
5	1762.04.12	Bay of Bengal (Bangladesh)	92	22		1	4		>2 (1)	Mathur (1988)
6	1819.06.16	Kutch	26.6	71.9	Mw 7.8	1	3			Macmurdo
7	1842.11.11	N.Bay of Bengal	90	21.5		1	4		(3)	Oldham (1883)
8	1845.06.19	Kutch	23.6	68.37		1	3			Nelson
9	1847.10.31	Little Nicobar Island	93.667	7.333	Mw 7.5- 7.9	1	3			Berninghaus en (1966), Heck,1947
10	1868.08.19	Andaman Islands	92.73	11.67		1	4		4	NGDC/NO AA
11	1874	Sunderbans (Bangladesh)	89	22		1	2			Mihir Guha, Free Journal
12	1881.12.31	W. of Car Nicobar	92.43	8.52	Mw 7.9	1	4		1.2	Berninghaus en (1966), Ortiz and Bilham (2003)
13	Jan. 1882	Sri Lanka (may be from Indonesia)	81.14 E	8.34		1	3			Berninghaus en (1966)
14	1883.08.27	Krakatau (Volcanic Eruption)	105.25	-6.06		6	4	4.5	2	Berninghaus en (1966)

15	1884	W. of Bay Of Bengal								Murty et al. (1999)
16	1935.05.31	Andaman- Nicobar			Mw 7.5	1	4		(1)	NGDC/NO AA
17	1935.11.25	Andaman- Nicobar	94	5.5	Ms 6.5	1	2			NGDC/NO AA
18	1941.06.26	Andaman Islands	92.5	12.1	Mw 7.7	1	4		1.25	Bilham et al. 2005
19	1945.11.27	Makran Coast	63.5	25.2	Mw 8.0	1	4		17	Murty et al. (1999)
20	1983.11.30	Chagos ridge	72.11	-6.85	Mw 7.7	1	4		1.5 (2)	NGDC/NO AA
21	2004.12.26	Off west coast of Sumatra and Andaman- Nicobar	95.947	3.307	Mw 9.3	3	4	3.0	30	NGDC/NO AA

Les événements qui devraient avoir été observés à Madagascar sont donc :

- 4 janvier 1907 la nuit de Sumatra
- 22-23 mai 1960 du Chili

Il y a quelques événements précédents qui devraient avoir été observés également :

- 28 août 1883 du Krakatau
- 13 août 1868 du Chili
- 1914
- 1935

Cependant, soit les marégrammes archivés sur Madagascar (notamment aux ports de la cote Est de l'Ile) ne montrent pas de signature de tsunamis, soit les séries de mesures trouvées à ce stade dans les archives ne coïncident pas aux dates des événements. . Le tableau suivant résume les dates des tsunamis et les situations des archives sur les enregistrements de marée à l'époque :

	Archives						
Date tsunamis	Antsiranana	Tamatave	Ste Marie	Ford-Dauphin			
4/01/1907 (La nuit de Sumatra)	4-5/01/1907, mesure à l'échelle, pas de signal	Pas de mesure	Pas de mesure	Pas de mesure			
22-23/05/1960 (Chili)	07/05/59-30/10/60 marégrammes non disponibles	23/01-25/02/60 ne coïncide pas à la date du tsunami	Pas de mesure	Pas de mesure			
28/08/1883 (Krakatau)	Pas de mesure	Pas de mesure	Pas de mesure	Pas de mesure			
13/08/1868 (chili)	Pas de mesure	Pas de mesure	Pas de mesure	Pas de mesure			
1914	non disponibles au SHOM	Pas de mesure	Pas de mesure	Pas de mesure			
1935	Pas de mesures	Pas de mesures	Pas de mesures	Pas de mesures			

Annexe 8

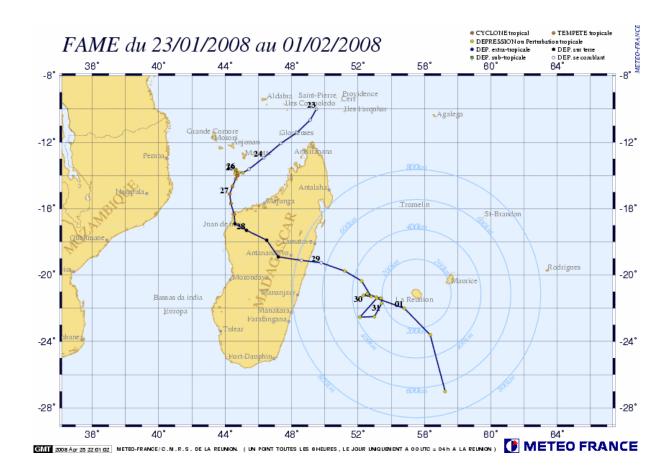
Cyclones et mesure de marée

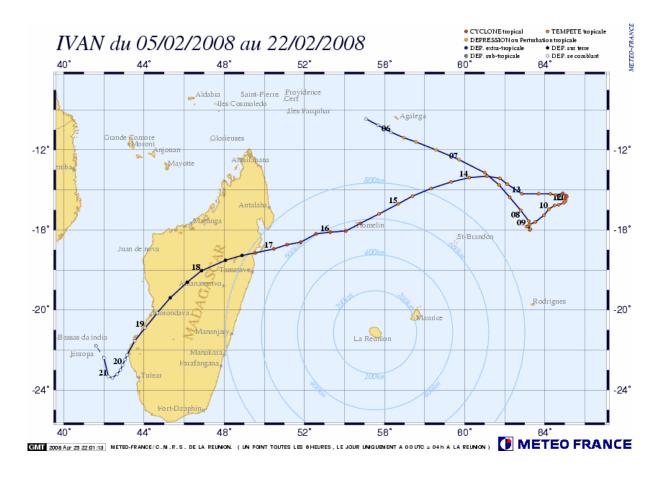
Généralités : Cyclones à Madagascar

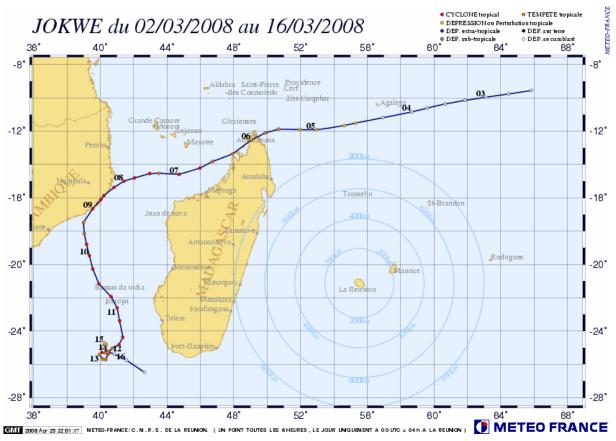
Les cyclones, provenant des Mascareignes, sont fréquents sur la cote Est pendant la saison des pluies. Les cyclones tropicaux sont à l'origine d'ondes de tempêtes, ils peuvent ainsi causer une montée du niveau de la mer et sont régulièrement à l'origine d'inondations dans les zones côtières. Il est donc très important de prendre en compte ce phénomène lors de l'installation de stations marégraphiques sur la cote Est de Madagascar qui permettront aussi de mesurer les surélévations de la mer engendrées par ces phénomènes météorologiques.

Saison cyclonique 2007-2008

Madagascar a subit en 2008 trois cyclones tropicaux : Fame, Ivan et Jokwe.







Le cyclone Ivan.

CVCLONE	tropical intense:	TVAN	Période du 05/02/2008 au 22/0	22000
CICLONE	tropical intense:	I V AIN	Trenoge au 05/02/2008 au 22/0	12/20081

IVAN	Intensité maximale
Date UTC (et heure locale)	16/02/2008 à 18UTC (22h Réunion)
Position	16.74 Sud et 51.13 Est
Nature du système	CYCLONE tropical intense
Pression estimée au centre	930 hPa
Vent moyen sur 10´ maxi	100kt, 185km/h, 51m/s
Rafales maximales associées	141kt, 261km/h, 72m/s
Sens de déplacement	Ouest-Sud-Ouest
Vitesse de déplacement	8 kt , 14 km/h

Source : Météo France

les caractéristiques de Ivan relevées à 10h00 le 16/02/2008 :

Cyclone de catégorie 3/5 sur l'échelle de Saffir Simpson

Vents moyens: 185 km/h

Vents en rafales : 231 km/h près du centre

Pression: 948 hpa

Situé à environ 666 km à l'Est Nord-Est d'ANTANANARIVO

Direction : Ouest à la vitesse moyenne de 12 km/h

Le 17/02/08 à 9h56:

Le cyclone Ivan vient de toucher la côte Est de Madagascar vers Tamatave avec des vents soufflants à près de 250 km/h en rafale près du centre.

Ivan devrait traverser l'île d'Est en Ouest tout en s'affaiblissant.

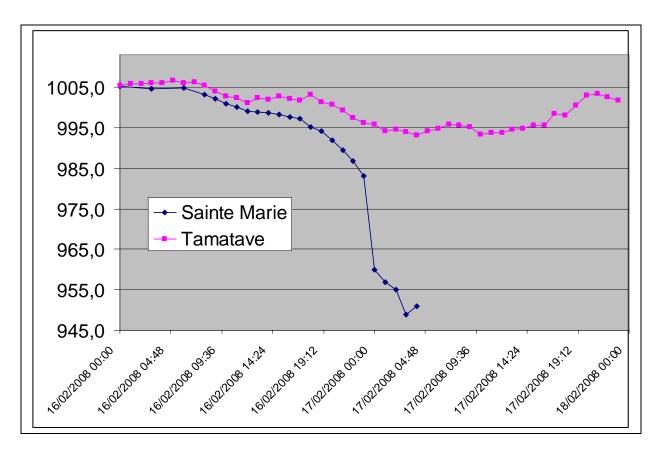
Source meteoworld.com



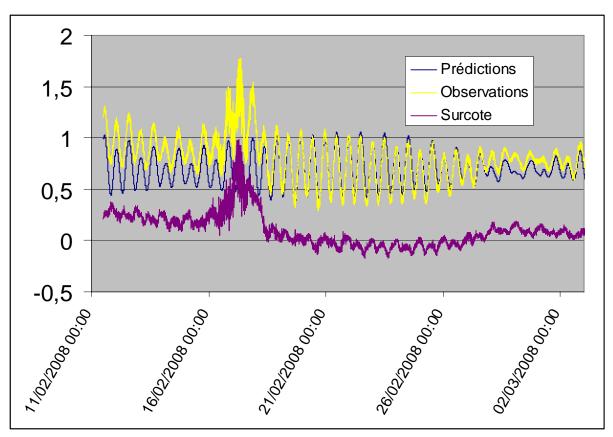
Ivan, 16 février 2008, 06h45 Z

Hauteurs d'eau.

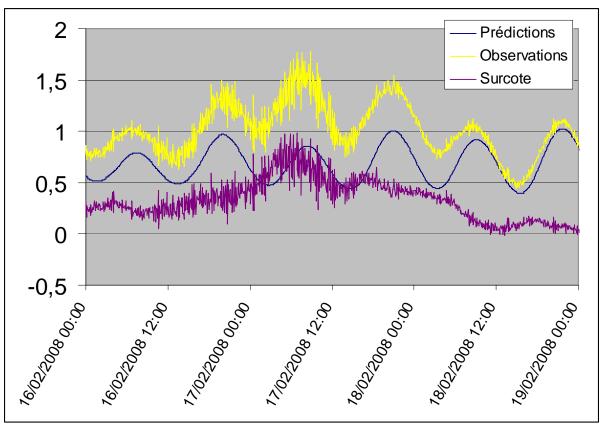
Des données de hauteurs d'eau et de pression atmosphérique pendant le passage du cyclone Ivan ont été acquises à l'occasion des travaux hydrographiques du bâtiment hydrographique Beautemps-Beaupré aux abords de Tamatave. Les données ont été acquises par des marégraphes immergés à capteur de pression. Les caractéristiques de l'acquisition sont une cadence de 5 minutes et une durée d'intégration de 4 minutes.



Pressions atmosphériques (les pressions à Sainte-Marie sont réduites au niveau de la mer et ne sont plus disponibles à partir du 17/02/2008 à 05h00 TU suite au passage du cyclone, les pressions à Tamatave sont approximativement réduites au niveau de la mer)



Observations de hauteurs d'eau en mètres à Tamatave du 11/02/2008 au 02/03/2008



Observations de hauteurs d'eau en mètres à Tamatave du 16/02/2008 au 19/02/2008

La surcote maximale mesurée à Tamatave est de 0,979m le 17 février 2008 à 06h50TU. Il convient cependant de noter que la durée d'acquisition adoptée de 4 minutes, choisie pour les seuls besoins de la correction des sondages hydrographiques, masque ici les phénomènes à plus haute fréquence tels que la houle. Ces phénomènes s'ajoutent à cette surcote mesurée. La ville de Tamatave a été frappée par de nombreuses inondations lors du passage du cyclone Ivan.

