

+

UNIVERSITE BRETAGNE SUD - FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR

MASTER mention : **Sciences de la Terre, Planètes, Environnement**

Parcours : **Ingénierie, Gestion et Ressources des Environnements Côtiers (IGREC)**

2ème ANNEE



Traitement et valorisation de données marégraphiques pour Antsiranana (Diego Suarez)

Léo SCHAFFER

Mémoire présenté le 27 juin 2025

Organisme d'accueil :

Service **H**ydrographique et **O**céanographique de la **M**arine (**SHOM**)

Encadrant de stage : Giloy Nathalie

Tuteur UBS du stage : Lambert Clément

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce stage et à l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie tout particulièrement Madame Nathalie Giloy, mon encadrante au Shom, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long du stage. Son expertise, sa rigueur scientifique et sa bienveillance ont été de précieux atouts qui m'ont permis d'avancer sereinement dans mes travaux. Je lui suis reconnaissant pour la confiance qui m'a été accordée ainsi que la qualité de nos échanges, qui ont largement enrichi ce stage.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur Clément Lambert, mon encadrant universitaire, pour son suivi pédagogique, ses conseils et son soutien. Son regard scientifique a été un plus quant à la bonne conduite de ce travail.

Je souhaite remercier chaleureusement Inge, ma collègue de bureau, pour son aide précieuse, sa disponibilité et ses conseils toujours pertinents. Son soutien au quotidien et sa bonne humeur ont grandement facilité mon intégration et rendu mon stage plus agréable.

Je remercie aussi l'ensemble des membres du département Marée-Courants du Shom pour leur accueil, leur disponibilité et leur esprit d'équipe. Leur partage d'expérience et leur soutien m'ont permis de travailler dans un environnement stimulant et enrichissant.

Je n'oublie pas de remercier l'administration de mon université ainsi que tous les enseignants et personnels qui, par leur accompagnement, ont rendu possible la réalisation de ce stage et dans les meilleures conditions.

Enfin, je tiens à adresser une mention spéciale à ma famille et à mes proches, pour leur soutien, leur patience et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours. Leur présence et leur confiance m'ont donné la motivation nécessaire pour mener à bien ce projet.

A toutes et à tous, je vous exprime ma plus sincère reconnaissance pour votre aide et votre soutien tout au long de cette expérience enrichissante.

Résumé

Ce stage s'inscrit dans le cadre des activités de valorisation des archives marégraphiques, visant à reconstituer et diffuser une série chronologique du niveau de la mer pour Antsiranana (Madagascar). Le port d'Antsiranana, extrémité nord de Madagascar, dispose d'un marégraphe permanent depuis 1902, avec des observations nominales de 1888 à 1970. Ce site stratégique est l'une des rares archives longues de l'océan Indien occidental, une zone encore peu documentée (Wenzel et al., 2014). L'objectif principal du stage est de construire une série homogène validée couvrant 1888-1970, conforme aux standards internationaux (GLOSS/PSMSL). Pour ce faire, une méthodologie de Data Archaeology a été appliquée : inventaire multi-sources des documents historiques (registres manuscrits, marégrammes, carnets de nivellement...), numérisation haute résolution des supports originaux, et extraction numérique des courbes de marée par traitement assisté (outils logiciels comme NUNIEAU). La qualité des données a été contrôlée dans l'environnement Tide Data Base (TDB), avec validation par comparaison aux prédictions harmoniques. Au total, 812 documents d'archive ont été recensés (85 % de marégrammes), aboutissant à une reconstitution numérique du signal horaire du niveau marin. Les principaux résultats montrent une élévation locale faible (quelques mm/an sur un siècle) cohérente avec la hausse globale observée par altimétrie. Plus qu'un jeu de données régional, cette série séculaire devient un patrimoine scientifique précieux pour la recherche océanographique et le suivi du changement climatique, en particulier dans l'hémisphère sud mal documenté.

Abstract

This internship contributed to the conservation and enhancement of tide-gauge archives by reconstructing and processing a long-term sea-level record for Antsiranana (Madagascar). The port of Antsiranana, on Madagascar's northern tip, has hosted a tide gauge since 1902, with nominal records from 1888-1970. As one of the few centennial records in the western Indian Ocean (a globally under-sampled region), it holds strategic value. The main goal was to produce a homogenized, quality-controlled hourly sea-level series for 1888-1970, compliant with international standards (GLOSS/PSMSL). We applied data archaeology methods: comprehensive archival inventory (handwritten registers, analog tide charts, leveling notes), high-resolution scanning of documents, and digital extraction of sea-level curves via assisted processing (using tools like the NUNIEAU software). Data validation was performed in the Shom Tide Data Base (TDB), including comparisons with tidal predictions. In total 812 archival documents were identified (85% tide charts), yielding a complete digitized time series. Results indicate a small long-term rise (~1–2 mm/yr) consistent with global trends. Beyond the data itself, this century-long Antsiranana series is a unique scientific heritage for ocean and climate studies, especially valuable in the southern hemisphere where records are sparse.

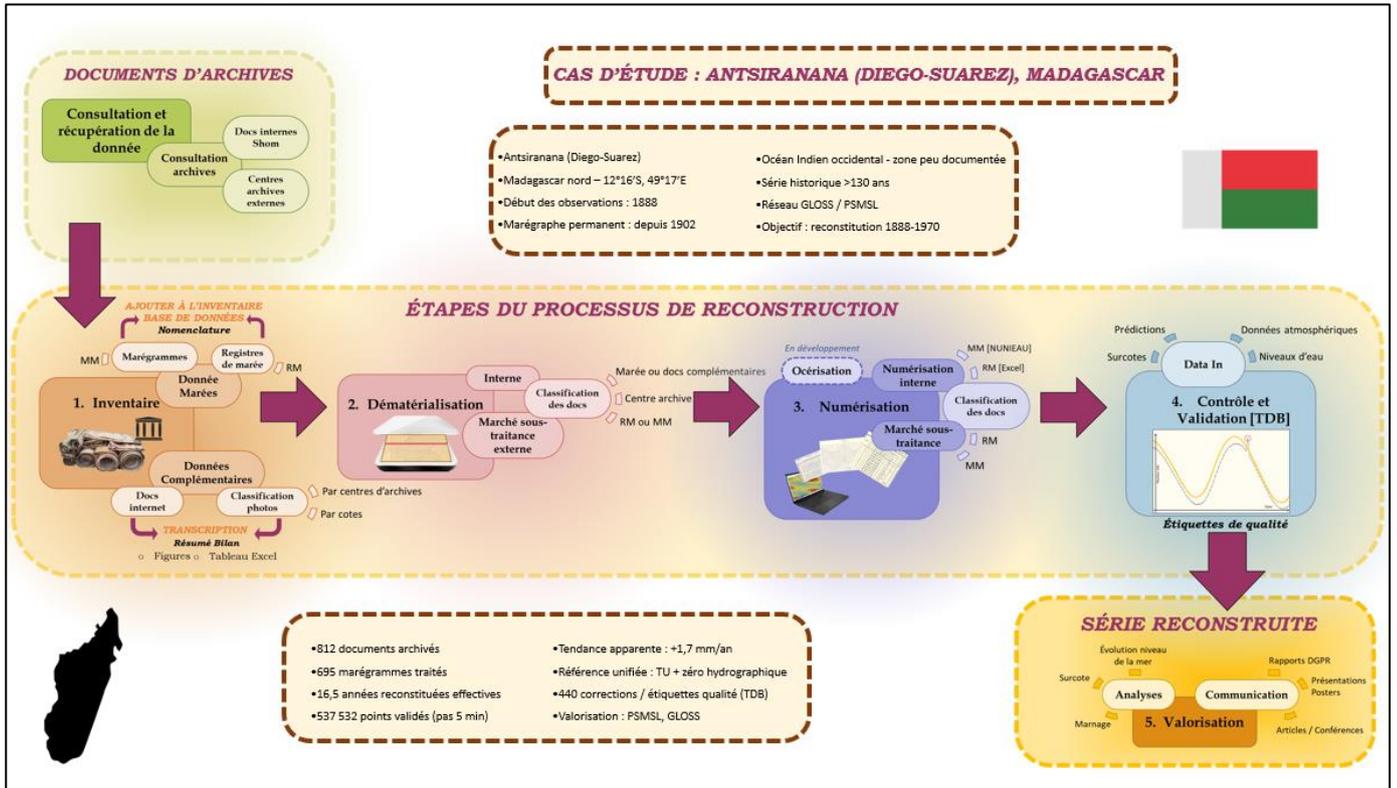


Figure 1 Schéma du workflow Data Archeology du Shom, illustrant chaque étape du processus de la collecte d'archives à la série validée (SHOM, 2025)

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	4
Abstract	4
Résumé graphique	5
Table des matières	6
Liste des figures.....	8
Liste des tableaux	8
Glossaire.....	9
Introduction	10
1. Etat de l'art.....	12
1.1 Contexte marégraphique et techniques d'observation du niveau de la mer	12
1.2 Data Archaeology marégraphique	13
1.3 Contexte géographique d'Antsiranana	14
2. Matériel et méthode	17
2.1 Matériel d'archives	17
2.1.1 Stratégie de recherche multi-sources et collecte documentaire	17
2.1.2 Classification typologique et nomenclature des données marégraphiques.....	17
2.1.3 Exploitation des métadonnées complémentaires et contextualisation historique	19
2.2 Dématérialisation et préservation du patrimoine documentaire	20
2.2.1 Numérisation haute résolution et techniques de capture.....	20
2.2.2 Sous-traitance spécialisée et contrôle qualité.....	21
2.3 Numérisation et digitalisation des données historiques	21
2.3.1 Saisie des registres de marée par saisie assistée	21
2.3.2 Extraction automatisée des marégrammes via NUNIEAU.....	21
2.4 Homogénéisation temporelle et préparation des données	22
2.4.1 Concaténation et organisation des fichiers de données.....	22
2.4.2 Conversion temporelle et gestion des références verticales historiques	23
2.5 Validation et contrôle qualité dans l'environnement TDB	23
2.5.1 Configuration de l'environnement de validation.....	23
2.5.2 Typologie des corrections et système d'étiquetage qualité	24
2.6 Processus de validation par repasse avec prédictions affinées	24
2.7 Export et valorisation des données validées	25

2.7.1 Procédures d'export et traçabilité documentaire	25
2.8 Analyse statistique	25
2.8.1 Extraction des statistiques descriptives via TDB	25
2.8.2 Décomposition harmonique et analyse des phases via MAS.....	25
3. Résultats	27
3.1 Résultats de l'inventaire archivistique	27
3.2 Résultats de la dématérialisation	28
3.3 Résultats de la numérisation	28
3.3.1 Numérisation externe	28
3.3.2 Digitalisation interne via NUNIEAU.....	29
3.4 Résultats de l'homogénéisation.....	29
3.6 Résultats de la validation dans TDB.....	30
3.7 Analyses statistiques de la série validée	32
3.7.1 Analyse du niveau moyen et des niveaux extrêmes.....	32
3.7.2 Analyse harmonique	34
4. Discussion	36
4.1 Apports scientifiques et valorisation du patrimoine	36
4.2 Limites méthodologiques et sources d'incertitude	37
4.3 Perspectives d'amélioration et développements futurs.....	38
4.4 Implications pour la gestion des risques côtiers	38
4.5 Bilan critique et recommandations	38
Conclusion.....	40
Références bibliographiques	41

Liste des figures

Figure 1 Schéma du workflow Data Archeology du Shom, illustrant chaque étape du processus de la collecte d’archives à la série validée (SHOM, 2025).....	5
Figure 2 Évolution du niveau moyen marin global (GMSL) mesuré par les missions altimétriques TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 et Sentinel-6MF de 1993 à aujourd’hui (CNES, 2024).....	12
Figure 3 Localisation d’Antsiranana et de sa zone portuaire (Shom, 2025)	15
Figure 4 Image satellitaire d’Antsiranana et la pointe nord de Madagascar (CNES, 2024)	16
Figure 5 Photo des archives marégraphiques au Shom à Brest (Shom, 2025).....	17
Figure 6 Registre de marée (Archives Shom, 2025)	18
Figure 7 plan du marégraphe Chazallon (Shom, 2025).....	18
Figure 8 Exemple de marégramme (Shom, 2025)	19
Figure 9 Interface Excel de la transcription d’un registre de marée (Shom, 2025)	21
Figure 10 Interface du logiciel Nunieau pendant l’extraction d’une courbe de marée sur 1 jour (Shom, 2025).....	22
Figure 11 Figure de classification des étiquettes de qualités (Shom, 2025)	24
Figure 12 Répartition typologique des documents complémentaires (Shom, 2025)	27
Figure 13 Distribution temporelle des documents d’archive (Shom, 2025)	28
Figure 14 Captures d’écran de la validation globale dans TDB (avant-après) (Shom, 2025)	31
Figure 15 Evolution du niveau moyen par ans + tendance (Shom, 2025)	32
Figure 16 Evolution des niveaux extrêmes par ans + tendances (Shom, 2025).....	33
Figure 17 Evolution des composantes harmonique M2, S2, N2 et K2 et de leurs phases respectives sur toute la série après reconstruction (Shom, 2025)	34
Figure 18 Enregistrements marégraphiques RLR : > 100 ans (bleu), > 50 ans (rouge) (Marcos et al., 2019)	36

Liste des tableaux

Tableau 1 Principaux résultats de l’homogénéisation (Shom, 2025).....	29
---	----

Glossaire

Data Archaeology : Ensemble de méthodes pour rechercher, récupérer et numériser des données océaniques historiques non disponibles en bases de données modernes. Cela inclut l'inventaire des archives manuscrites, la collecte des métadonnées associées (instruments, dates, événements locaux) et la conversion numérique. Cette démarche promeut la conservation du patrimoine marégraphique mondial en comblant les lacunes des réseaux actuels.

Dématérialisation / Numérisation : Processus de capture d'informations analogiques sous format numérique. Dématérialisation désigne le passage au numérique (ex. prise de vue photographique de documents), tandis que numérisation (ou scanning) réfère au numériseur haute résolution pour conserver fidèlement les marégrammes ou registres papier.

Homogénéisation temporelle : Opération de mise en cohérence des séries par la conversion des dates (ex. passage à l'heure universelle) et par l'interpolation ou le comblement des lacunes pour créer un enregistrement continu. Cela permet d'éviter les erreurs d'alignement entre instruments ou époques différentes.

Marégramme : Trace graphique continue du niveau de la mer enregistrée par un marégraphe. Il représente l'évolution temporelle du niveau d'eau, après numérisation, on peut en extraire des séries de hauteurs d'eau à intervalles réguliers.

Marégraphe : Instrument installé sur site côtier mesurant en continu le niveau de la mer par rapport à une référence locale. Les marégraphes peuvent être mécaniques (flotteur et tambour) ou électroniques, et produisent des enregistrements appelés marégrammes.

MAS (MA-Simon) : Logiciel interne du Shom pour l'analyse harmonique des données marégraphiques. Il calcule les constantes de marée astronomiques sur des sous-séries (ex. annuelles) afin d'étudier l'évolution des amplitudes et phases des composantes de marée, utile pour dégager un signal de fond.

Métadonnées marégraphiques : Informations complémentaires décrivant un enregistrement de niveau de la mer (emplacement, instrument, référence, dates, événements exceptionnels). Ces données contextuelles (nivellements de repères, équipements utilisés) sont essentielles pour valider et interpréter la série marégraphique reconstituée.

Référence verticale : Niveau de référence (par exemple "zéro hydrographique") auquel sont rattachées les mesures de niveau de la mer. Les changements historiques de repère (conversion vers un datum géodésique) affectent la comparabilité des données d'époques différentes et doivent être pris en compte lors de l'homogénéisation des séries.

Série marégraphique : Ensemble chronologique de mesures du niveau de la mer issues d'un marégraphe, homogénéisé sur une longue période. Cette série peut être discontinue (manque de données) et nécessite une référence verticale stable pour l'interprétation.

Tide Data Base (TDB) : Logiciel du Shom pour l'archivage, le traitement et la validation des données marégraphiques. Il permet de comparer les observations numériques aux prédictions de marée (calculées par des logiciels astronomiques) et d'appliquer les corrections nécessaires, tout en conservant la traçabilité des modifications.

Introduction

La mesure du niveau de la mer est un enjeu majeur de l'océanographie côtière et du suivi du climat. Les zones côtières, densément peuplées et stratégiques, sont en effet fortement exposées à la montée du niveau de la mer et aux événements extrêmes marins induits par le changement climatique. Pour comprendre ces évolutions et anticiper leurs impacts, il est indispensable de disposer à la fois de données satellitaires (altimétrie spatiale) et d'observations in situ par marégraphes (Ponte et al., 2019). Or les enregistrements marégraphiques historiques sont rares et irremplaçables : ils constituent un véritable patrimoine scientifique permettant d'analyser des variations séculaires du niveau marin et de valider les modèles océaniques sur le long terme. Dans ce contexte, l'archivage et la numérisation des données anciennes sont désormais des priorités internationales (GLOSS/IOC, PSMSL) afin de combler les vides géographiques des observations et de mobiliser les séries tropicales et de l'hémisphère Sud sur lesquelles les données manquent (GLOSS, 2025).

En France, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (Shom), et plus spécifiquement le département Marée-Courants (MAC) coordonne ces efforts de Data Archaeology pour les données marégraphiques. Il développe une méthodologie rigoureuse pour inventorier et digitaliser les archives marégraphiques (registres de marée, cartes de marée, documents techniques) et intégrer les séries dans les bases de données nationales et mondiales (TDB, PSMSL). Les normes internationales de GLOSS encouragent le partage et la diffusion de ces données, notamment dans les régions peu couvertes.

L'océan Indien est une région avec peu d'observations marégraphiques. Cette région montre des taux de variation locale du niveau marin comparables aux tendances globales, mais reste mal muni en séries longues. Le site d'Antsiranana (ex-Diego-Suarez), s'avère exceptionnel à cet égard. Troisième port de Madagascar et centre régional, Antsiranana disposait d'un marégraphe permanent dès 1902, pour les besoins hydrographiques coloniaux. La série de marée historique y débute en 1888, ce qui en fait l'une des plus longues de la région et la plus ancienne de l'océan Indien occidental. Sa richesse documentaire, bien que présentant des lacunes de couverture, offre un enjeu scientifique majeur pour la compréhension de la variabilité côtière dans l'hémisphère sud.

Ainsi l'objectif de ce stage est de reconstituer une série chronologique continue et validée pour Antsiranana couvrant 1888-2023. Pour atteindre ce but, plusieurs étapes ont été menées : (1) un inventaire exhaustif des archives marégraphiques (registres manuscrits, marégrammes, documents associés) a été réalisé au Shom ; (2) la dématérialisation des documents a été assurée (scans haute résolution des marégrammes, photographies des archives complètes) pour préserver le patrimoine papier tout en le rendant exploitable numériquement ; (3) les données analogiques ont été extraites et traitées par des outils semi-automatisés (logiciel Nuniveau et saisie assistée) pour obtenir des séries numériques à pas de 5 minutes ; (4) l'ensemble des données brutes a été fusionné et homogénéisé (conversion des dates, concaténation, gestion des différents niveaux zéro) ; enfin (5) la qualité des mesures a été vérifiée dans l'environnement TDB, où les valeurs digitalisées ont été comparées à des prédictions de marée astronomiques et corrigées si nécessaire. Cette méthodologie assure la conformité aux standards GLOSS/PSMSL et garantit la fiabilité scientifique de la série finale.

Ce rapport est structuré de la manière suivante : la première partie présente un état de l'art sur la marégraphie, la data archaeology et le contexte régional d'Antsiranana. La deuxième partie détaille le matériel utilisé et la méthodologie appliquée pour la collecte, la numérisation et la validation des données marégraphiques. La troisième partie expose les résultats obtenus, depuis l'inventaire des archives jusqu'à la production de la série validée. Enfin, la discussion met en perspective les apports scientifiques, les limites méthodologiques et les perspectives d'exploitation de la série reconstituée, avant de conclure sur l'intérêt patrimonial et scientifique de ce travail.

1. Etat de l'art

Avant de présenter la démarche méthodologique adoptée pour le traitement des données marégraphiques d'Antsiranana, il est nécessaire de replacer ce travail dans son contexte scientifique global. Cette section propose ainsi un état de l'art sur la marégraphie, les principes de la Data Archaeology, et les enjeux régionaux spécifiques à l'océan Indien occidental.

1.1 Contexte marégraphique et techniques d'observation du niveau de la mer

Les premières mesures du niveau de la mer modernes remontent au 17^e-18^e siècle (par exemple la plus ancienne série connue en France est celle de Brest en 1679 (SONEL, 2025)). Au 19^e siècle, la France institua un réseau national de marégraphes pour la marine : Antoine-Marie-Rémi Chazallon mit au point le premier appareil en 1843 et organisa en 1838 le premier réseau dans les ports français, aboutissant à la publication d'un annuaire de marée dès 1839 (Shom, 2020). Dans le monde, le réseau mondial de marégraphes s'est densifié au cours du 19^e-20^e siècle, fournissant des séries locales de longue durée. Les synthèses des années 2010 (Church & White 2011), (Wenzel & Schröter 2010) montrent que la hausse globale du niveau de la mer en 1901–1990 est d'environ 1,7 mm/an. Cependant les synthèses actuelles mesurée par altimétrie satellitaire présentent un rythme d'élévation du niveau moyen global d'environ 4,1 mm/an pour la période 2016-2024 (CNES, 2024).

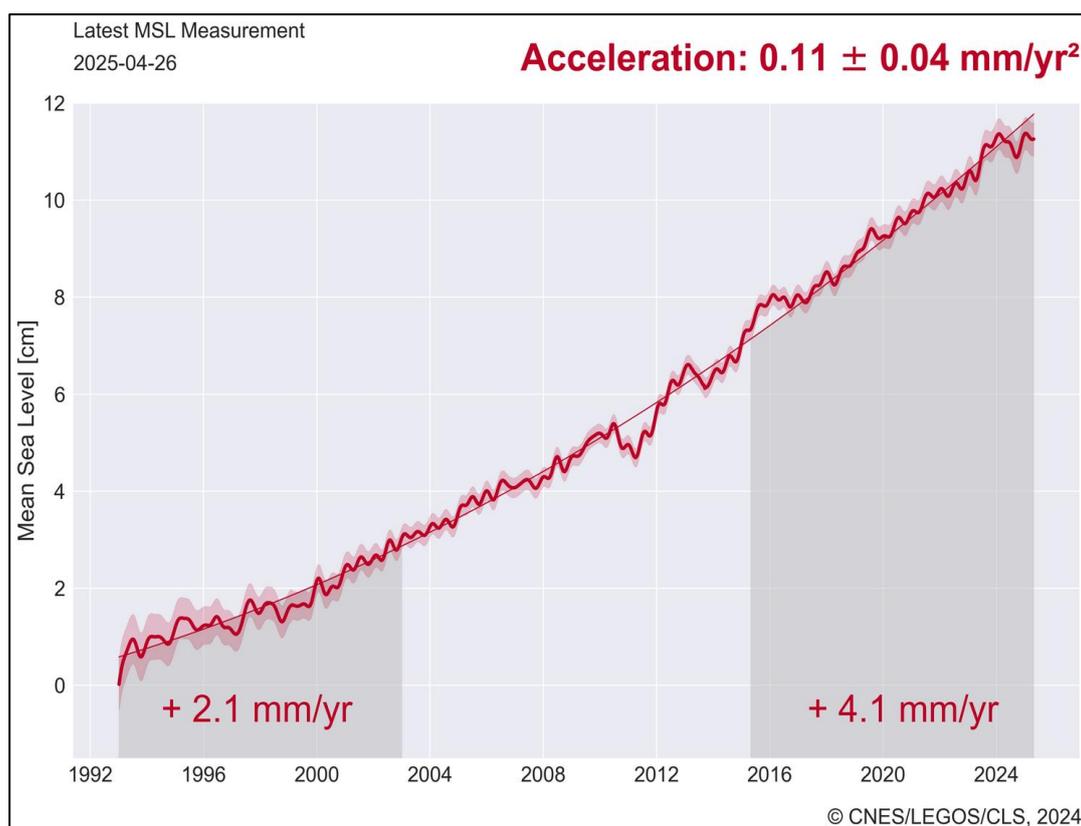


Figure 2 Évolution du niveau moyen marin global (GMSL) mesuré par les missions altimétriques TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 et Sentinel-6MF de 1993 à aujourd'hui (CNES, 2024).

Depuis 1992, l'altimétrie satellitaire (TOPEX/Poseidon, puis Jason-1/2/3, Sentinel-6) offre des mesures quasi-globales du niveau de la mer en continu. Les relevés altimétriques se comparent bien aux enregistrements marégraphiques mondiaux (Church & White 2011). Comme le montrent Cipollini et al. (2017) et Ablain et al. (2016), ces deux techniques sont complémentaires : les marégraphes fournissent des séries historiques locales fiables et haute résolution (utiles pour calibrer les niveaux de référence côtiers), tandis que l'altimétrie couvre l'océan mondial et permet de déterminer le niveau moyen global à haute résolution spatio-temporelle. En pratique, les marégraphes servent à valider et réajuster l'altimétrie près des côtes, et l'altimétrie complète les régions dépourvues de stations in situ. Cette complémentarité permet aujourd'hui de quantifier finement les tendances et la variabilité du niveau de la mer à l'échelle planétaire (Cipollini et al., 2017).

En France, le réseau national de marégraphes est géré par le Shom. Les installations françaises, initialement développées pour la navigation et la défense navale, ont une longue histoire : Chazallon (1838–1843) fût le pionnier de ce réseau national. En 1886 le dépôt des cartes devint officiellement le Service Hydrographique de la Marine (SHM) rattaché à l'état-major de la marine. Pendant l'ère coloniale, des stations de mesure furent aussi implantées dans les territoires sous influence française (Caraïbes, Afrique, Océan Indien, Pacifique). Comme l'a documenté Pouvreau (2008), les archives de marée françaises incluent de nombreux relevés métropolitains et outre-mer : “Les observatoires se trouvent aussi bien en France qu'à l'étranger, principalement dans les pays ayant eu des liens étroits avec l'hexagone”. Aujourd'hui le Shom dispose d'un patrimoine important de données historiques, couvrant plus de trois siècles de mesures (les plus anciennes séries françaises étant à Brest dès le 17^e siècle). Les marégraphes historiques (papier) et modernes (électroniques) alimentent ainsi les inventaires nationaux et mondiaux (PSMSL, GLOSS) de séries de marée.

1.2 Data Archaeology marégraphique

La Data Archaeology marégraphique vise à numériser et reconstituer les données historiques de niveau de la mer jusque-là inexploitées, car en format papier ou oubliées. En pratique, il s'agit de “récupérer, digitaliser et analyser des centaines d'années-station de mesures autrefois perdues ou oubliées” (Talke & Jay 2017). Cette démarche permet d'allonger les séries disponibles, c'est un prérequis pour étudier les tendances à long terme ou les événements extrêmes (il est estimé qu'une série de > 60 ans est nécessaire pour établir une tendance séculaire robuste (Refmar / Shom, 2025)). La méthodologie standard comprend plusieurs étapes successives :

- **Inventaire des données et données contextuelles** : identifier toutes les sources historiques pour un site (cahiers, marégraphes, journaux) et collecter les informations auxiliaires (instruments, références verticale et temporelle, interruptions, etc.).
- **Dématérialisation** : scanner en haute résolution des marégrammes, registres et documents complémentaires.
- **Numérisation** : scanner haute résolution des marégrammes et registres, puis extraction numérique des hauteurs (via saisie manuelle ou détection semi-automatique, selon le support). Par exemple, les registres papier sont transcrits dans un tableur numérique afin de capturer les hauteurs horaires.
- **Homogénéisation** : unifier le repère temporel et la référence verticale. En général, les temps solaires anciens sont convertis en temps universel et toutes les hauteurs sont réduites au même niveau de référence. L'objectif est d'obtenir une série cohérente dans le temps, avec correction des dérives d'instrument ou changements de repère.

- **Validation et contrôle qualité** : vérifier la cohérence des données numérisées, corriger les erreurs évidentes, et labelliser la qualité des mesures. Dans les reconstitutions Shom par exemple, des “étiquettes qualité” sont attribuées pour éliminer ou marquer les valeurs douteuses (erreurs de relevé ou de saisie) et produire une série finale validée.

Sur le plan international, plusieurs programmes structurent ces efforts d’archivage. Le PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level, Royaume-Uni) centralise désormais les séries corrigées issues des reconstitutions et encourage le dépôt des données historiques. Le rapport PSMSL (2019) indique que le PSMSL a pris “la tête de la Data Archaeology dans le cadre du programme GLOSS de l’IOC”, en définissant notamment des lignes directrices pour le scanning, la numérisation et le contrôle qualité des anciens registres marégraphiques. De même, le réseau GLOSS (Global Sea Level Observing System, IOC-UNESCO) a mis en place un groupe d’experts chargé de publier des normes pour la collecte et l’homogénéisation des séries historiques. Ainsi, les nouvelles données archivées sont partagées via ces plateformes internationales (PSMSL, Hawaii Sea Level Center, etc.) pour enrichir le réseau mondial. En France, le Shom a lancé depuis les années 2000 de nombreux chantiers de “data rescue” (reconstructions longues à Brest, Saint-Nazaire, etc.) conformément aux recommandations GLOSS.

1.3 Contexte géographique d’Antsiranana

Antsiranana s’ouvre sur la baie de Diego-Suarez (156 km de rivages) au nord de Madagascar. Cette baie est l’une des plus grandes au monde et est située à l’entrée du canal du Mozambique à proximité des côtes africaines, de Mayotte, des Comores et des Seychelles. Cette position en faisait une base navale stratégique française durant la colonisation (CNES, 2025). La mer à Antsiranana est influencée par les conditions océanographiques et climatiques de l’Océan Indien occidental. Cette région tropicale est dominée par les moussons : les vents soufflent du nord-est pendant l’été austral (novembre-avril) et s’inversent au sud-ouest en hiver. Ce cycle entraîne des circulations océaniques associées, notamment le courant somalien réversible et le puissant courant des Aiguilles ($\approx 1,6$ m/s), alimenté essentiellement par le courant est-malgache et le courant du Mozambique (Guyomard et al., 2006).

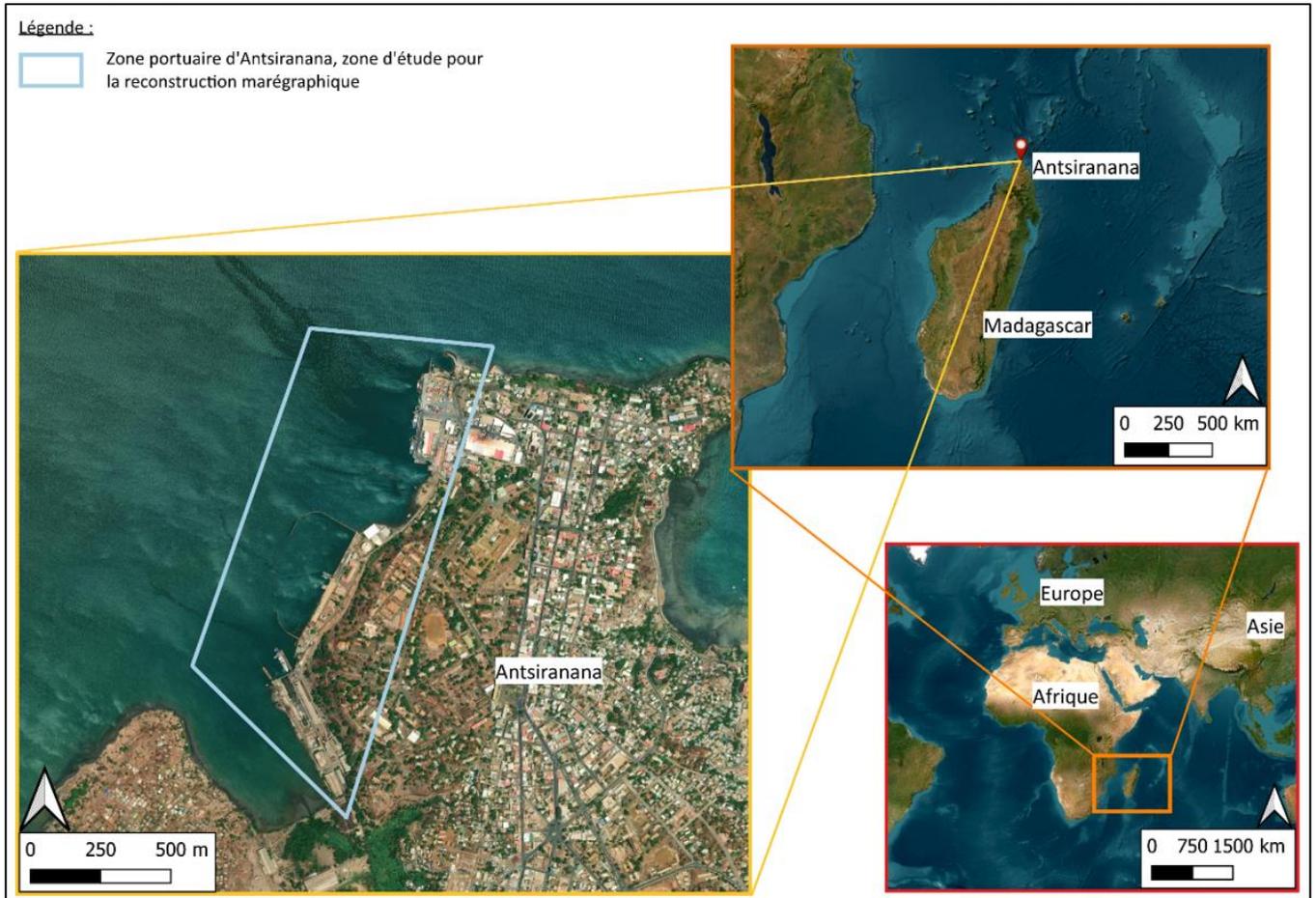


Figure 3 Localisation d'Antsiranana et de sa zone portuaire (Shom, 2025)

La baie de Diego-Suarez (Antsiranana) reçoit ainsi les masses d'eau de l'océan Indien et connaît une température de surface chaude ($\approx 26\text{--}28^\circ\text{C}$) avec des variations saisonnières marquées. La région subit aussi des cyclones tropicaux annuels (zone cyclonique sud-ouest de l'océan Indien) et des fluctuations interannuelles liées à l'oscillation de l'océan Indien et à des phénomènes climatique lointains (comme El Niño).



Figure 4 Image satellitaire d'Antsiranana et la pointe nord de Madagascar (CNES, 2024)

La ville d'Antsiranana (ex-Diego-Suarez) est ainsi le troisième port malgache et la capitale régionale du nord. Un marégraphe permanent y a été installé des 1902 pour servir les besoins hydrographiques de la marine. La série de marée correspondante couvre nominalement la période 1888-1970 (environ 16 années de données disponibles). Ces archives historiques (cahiers, cartes de marée) sont conservées au Shom et sont traitée dans le cadre du projet national Refmar. Le climat local est de type tropical à saison sèche, avec une courte mousson pluvieuse (décembre–mars) et des vents alizés dominants le reste de l'année.

2. Matériel et méthode

Cette partie présente l'ensemble des matériels d'archives utilisés ainsi que les différentes étapes méthodologiques mises en œuvre pour le traitement et la validation des données marégraphiques historiques d'Antsiranana, en suivant les procédures de "Data Archaeology" en vigueur au Shom. L'approche vise à garantir la traçabilité, la rigueur scientifique et est aussi un moyen d'uniformiser le traitement des données marégraphiques issues de différentes séries, en n'appliquant que des corrections justifiées et classées par des informations vérifiées issues des archives (voir résumé graphique).

2.1 Matériel d'archives

2.1.1 Stratégie de recherche multi-sources et collecte documentaire

La première étape du processus de reconstruction consiste à réaliser un inventaire de tous les documents marégraphiques et complémentaires nécessaires à la reconstruction de la série d'Antsiranana. Cette recherche archivistique s'organise autour d'une approche multi-sources, explorant systématiquement les fonds d'archives internes du Shom ainsi que les centres d'archives externes susceptibles de détenir des informations pertinentes.

La stratégie de recherche mise en œuvre suit une approche systématique couvrant plusieurs types d'institutions. Les archives internes du Shom constituent la source principale, comprenant les fonds historiques conservés sur site à Brest, et les archives techniques des stations marégraphiques. Le centre d'archives externe consulté est le Service Historique de la Défense (SHD) de Rochefort.



Figure 5 Photo des archives marégraphiques au Shom à Brest (Shom, 2025)

2.1.2 Classification typologique et nomenclature des données marégraphiques

Les données marégraphiques identifiées pour Antsiranana se répartissent en deux catégories principales : les registres de marée et les marégrammes.

Les registres de marée correspondent aux observations de niveaux d'eau relevées manuellement par les observateurs, soit directement sur une échelle de marée, soit par lecture de niveau sur marégrammes. Ces documents se présentent sous forme de tableaux où les niveaux d'eau sont consignés selon des pas de temps réguliers : horaires, quart d'heure, ou observations spécifiques de pleines et basses mers (PM/BM).

Observations des Marées faites à *Diego Suarez*
le SOIR du *7 juillet* 19 *(23^e jour de la Lune)*.

HEURES.	HAUTEUR		VENTS.	LAME. Hauteur.	Éch. n°	HEURES.	HAUTEUR		VENTS.	LAME. Hauteur.
	OBSERVÉE.	CORRIGÉE.					OBSERVÉE.	CORRIGÉE.		
Midi 0 ^m	2,78					4 ^h 0 ^m	2,51			
15	2,73					15	2,53			
30	2,69					30	2,56			
45	2,65					45	2,59			
1 ^h 0 ^m	2,61					5 ^h 0 ^m	2,63			
15	2,57					15	2,69			
30	2,53					30	2,76			
45	2,50					45	2,83			
2 ^h 0 ^m	2,48					6 ^h 0 ^m	2,91			
15	2,47					15	2,97			
30	2,46					30	3,02			

Figure 6 Registre de marée (Archives Shom, 2025)

Les marégrammes constituent la seconde catégorie documentaire majeure. Ces courbes continues, issues des marégraphes mécaniques à flotteur développés à partir du milieu du XIXe siècle, représentent l'évolution du niveau marin en fonction du temps. Le principe de fonctionnement repose sur la transmission des variations du niveau marin à un stylet connecté au flotteur par un système de fils et de poulies. Ainsi une courbe est tracée sur une feuille enroulée sur un tambour enregistreur dont la rotation régulière est contrôlée par un mécanisme d'horlogerie (Simon, 2007)

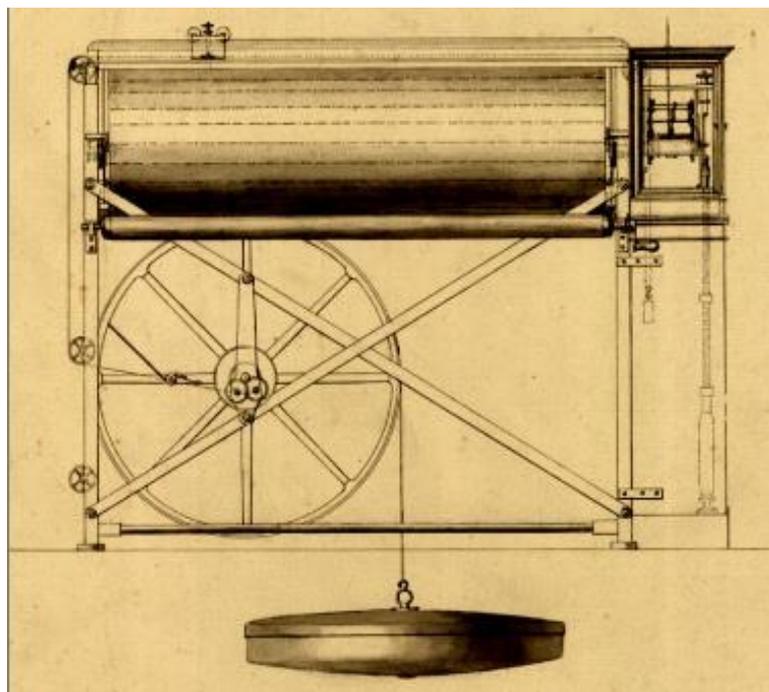


Figure 7 plan du marégraphe Chazallon (Shom, 2025)

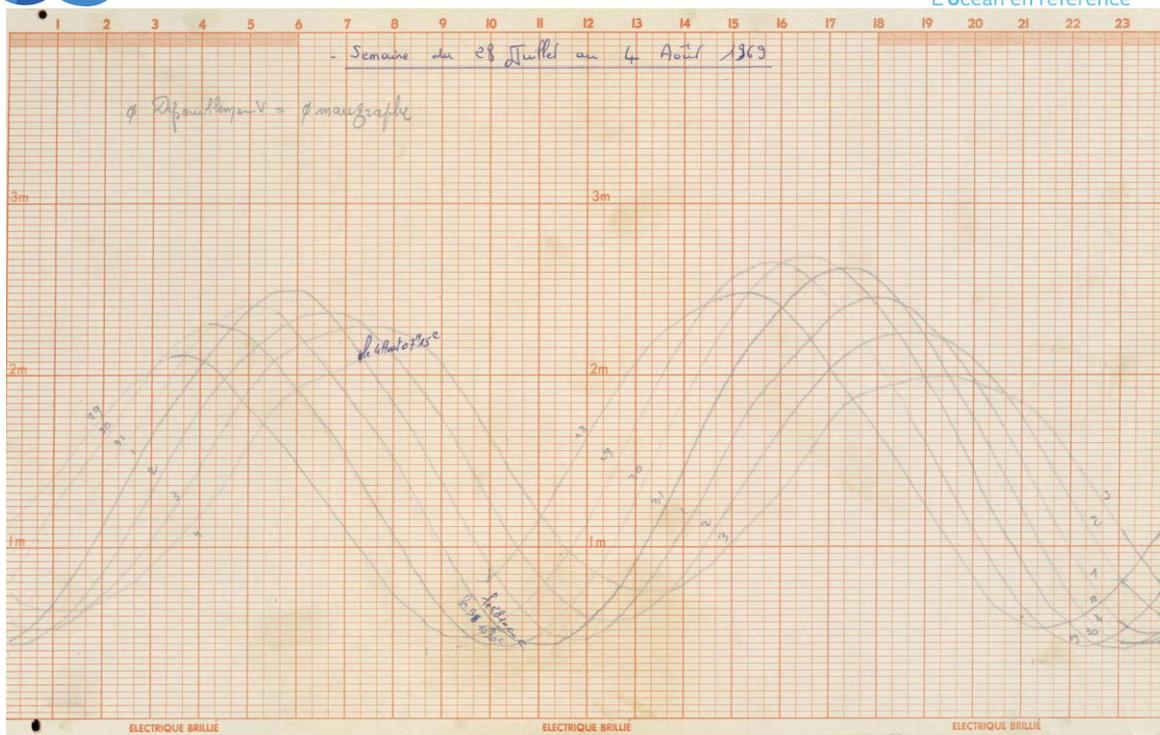


Figure 8 Exemple de marégramme (Shom, 2025)

Le système de nomenclature des documents marégraphiques suit rigoureusement la règle standardisée du Shom :

Nom_Port + _ + DateDebut + _ + Date_Fin + _ + Type.

Ainsi, un marégramme d'Antsiranana du 15 juillet 1895 au 30 juillet 1895 est inventorié sous la forme ANTSIRANANA_18950715_18950730_MM.

Les documents sont systématiquement classés par type (MM pour marégrammes, RM pour registres de marée) dans une arborescence spécifique, garantissant une organisation cohérente et une traçabilité optimale.

2.1.3 Exploitation des métadonnées complémentaires et contextualisation historique

Parallèlement aux données marégraphiques, la collecte et l'exploitation de documents complémentaires sont essentielles pour comprendre l'évolution historique d'un site et contextualiser les mesures dans leur environnement. Ces documents incluent les correspondances administratives, rapports techniques, plans d'implantation des instruments, photographies historiques, carnets de nivellement, données de rattachement géodésique, ainsi que les informations sur les références verticales et temporelles, les périodes de maintenance ou les dysfonctionnements instrumentaux.

L'exploitation de ces métadonnées suit une méthodologie rigoureuse, avec une transcription numérique systématique et un codage couleur selon leur utilité pour la reconstruction. Ce système distingue notamment :

- Les données sur les références verticales, nivellements, repères et rattachement au zéro hydrographique.
- Les informations contextuelles sur le port, les instruments et leur localisation.
- Les données marégraphiques complémentaires (niveaux caractéristiques, marées exceptionnelles).
- Les événements météorologiques notables (tempêtes, cyclones, etc.).
- Les références temporelles permettant la comparaison avec d'autres ports.

Chaque document analysé fait l'objet d'une description détaillée dans un fichier de transcription, précisant la date, le type de document, et surtout les informations jugées pertinentes pour la reconstruction de la série (évolution des instruments, incidents, changements de repères, etc.). Les informations extraites sont ensuite organisées de manière chronologique afin de reconstituer l'historique du site et de ses instruments.

L'usage du code couleur permet de mettre en évidence les éléments critiques (références verticales, observations météorologiques extrêmes, modifications instrumentales), facilitant leur identification lors des phases de validation et d'homogénéisation. Ce travail mène à une base documentaire structurée, directement exploitable, dans laquelle chaque information est consignée et justifiée en vue de la reconstruction fiable de la série marégraphique. (Voir Figure X pour la répartition typologique des documents exploités).

2.2 Dématérialisation et préservation du patrimoine documentaire

2.2.1 Numérisation haute résolution et techniques de capture

La dématérialisation est une étape importante pour la préservation des documents historiques tout en les rendant exploitables pour le traitement numérique. Pour les marégrammes, une attention doit être portée au maintien à plat des documents lors du scan afin d'éviter les distorsions géométriques qui compliqueraient les phases ultérieures de calage nécessaires à la numérisation semi-automatique.

Les paramètres de dématérialisation sont standardisés selon les spécifications techniques du Shom : résolution minimale de 600 dpi pour les marégrammes, format TIFF non compressé pour préserver la qualité d'image, et calibration colorimétrique régulière du traceur. Cette exigence de qualité géométrique est d'autant plus critique que les marégrammes anciens, souvent stockés en rouleaux pendant des décennies, présentent des déformations physiques (plis, ondulations) qui peuvent introduire des erreurs systématiques lors de la conversion numérique.

Les registres de marée et documents complémentaires sont photographiés ou scannés avec un appareil photo numérique haute résolution selon des protocoles permettant une lisibilité optimale. La qualité d'image optimale est recherchée en évitant systématiquement la surexposition, les zones d'ombre, et les reflets susceptibles de compromettre la lisibilité ultérieure.

2.2.2 Sous-traitance spécialisée et contrôle qualité

Lorsque le volume de données est conséquent ou que les formats sont atypiques (grands rouleaux, très grands formats), des marchés de sous-traitance spécialisés sont mis en place selon les procédures publique du Shom. Ces prestataires disposent d'équipements professionnels adaptés aux contraintes des documents anciens : scanners de grand format à plat pour éviter les déformations, systèmes de manipulation pneumatique pour les documents fragiles, et environnements climatisés pour préserver l'intégrité des archives.

Les données livrées par les prestataires sont soumises à des procédures de vérification rigoureuses incluant la vérification de l'intégrité des fichiers selon une check-list standardisée, la conformité aux spécifications techniques (résolution, format, nomenclature), la validation de la lisibilité des informations critiques par échantillonnage, et l'évaluation de la qualité géométrique par mesure de points de contrôle. Un cahier des charges techniques garanti l'acceptation définitive avant l'intégration dans les répertoires projets.

2.3 Numérisation et digitalisation des données historiques

2.3.1 Saisie des registres de marée par saisie assistée

La numérisation des registres de marée s'effectue via des fichiers Excel spécialement développés et préformatés par les équipes du Shom pour optimiser la précision et l'efficacité de la transcription. Des modèles standardisés ont été créés pour différents pas de temps (15 minutes, 1 heure) ainsi que pour les registres de pleines et basses mers (PM/BM), chacun intégrant des fonctionnalités adaptées aux caractéristiques des données à traiter.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
1	Date	Jour_cp	00:00	00:15	00:30	00:45	01:00	01:15	01:30	01:45	02:00	02:15	02:30	02:45	03:00	03:15	03:30	03:45	04:00	04:15	04:30	04:45	05:00	
3	28/06/1912	1																						
3	29/06/1912	2	245	250	258	267	275	281	289	295	302	307	313	319	324	327	327	325	322	320	317	313	310	
4	30/06/1912	3	222	228	235	242	249	256	264	272	281	290	298	306	313	319	324	327	328	329	326	324	322	
5	01/07/1912	4	212	218	224	229	234	240	247	255	262	269	279	287	295	302	311	318	325	331	335	337	337	
6	02/07/1912	5	203	205	210	215	219	228	239	244	250	255	262	270	279	288	296	302	308	313	317	321	324	
7	03/07/1912	6	202	208	213	217	220	224	228	233	239	246	252	259	266	273	281	289	298	306	313	319	324	
8	04/07/1912	7	209	208	208	209	211	213	216	218	223	228	236	244	250	258	265	272	280	288	296	320	370	
9	05/07/1912	8	224	219	217	217	218	218	222	224	225	229	234	239	245	250	258	264	270	276	282	290	294	
10	06/07/1912	9	236	230	225	221	219	218	218	218	218	220	223	227	231	237	241	247	253	261	267	274	280	
11	07/07/1912	10	258	250	244	238	232	228	225	222	210	210	222	223	226	229	231	234	236	242	246	253	260	
12	08/07/1912	11	272	268	263	260	254	251	246	240	235	232	230	229	229	229	230	230	231	232	235	239	244	
13	09/07/1912	12	293	287	282	275	270	266	261	261	259	250	246	242	238	235	234	228	229	229	230	232	235	

Figure 9 Interface Excel de la transcription d'un registre de marée (Shom, 2025)

Ces fichiers intègrent une mise en forme par gradient colorimétrique (rouge à bleu ou rouge à vert) en fonction des valeurs saisies, permettant une détection immédiate des erreurs de transcription ou des valeurs aberrantes. Le système comprend des contrôles automatiques de plausibilité avec plages de valeurs admissibles (hauteur d'eau entre -2 m et +4 m), des algorithmes de détection d'erreurs de gradients de marée anormaux, et des outils de validation croisée entre données contemporaines.

Chaque fichier génère automatiquement des courbes graphiques journalières ou hebdomadaires permettant un contrôle visuel de la cohérence des données transcrites et la détection d'anomalies temporelles. Le processus de contrôle qualité intégré distingue les erreurs de frappe durant la numérisation, corrigées directement dans le fichier Excel, des erreurs de l'observateur d'époque, qui sont marquées spécifiquement et documentées dans un fichier de suivi des corrections séparé.

2.3.2 Extraction automatisée des marégrammes via NUNIEAU

Le traitement des marégrammes utilise exclusivement le logiciel NUNIEAU (NUMérisation des Niveaux d'EAU) développé par Frédéric Pons du CEREMA Méditerranée, outil de référence reconnu internationalement pour l'extraction de courbes marégraphiques. Ce logiciel, basé sur une ToolBox Matlab mais ne nécessitant pas de licence Matlab, permet l'extraction automatique des courbes marégraphiques selon un processus standardisé et reproductible en cinq étapes principales.

La méthodologie NUNIEAU comprend le calage géométrique du marégramme qui constitue l'étape fondamentale définissant les échelles temporelle et verticale par sélection de cinq points de référence sur la grille du document. Ces points, positionnés sur les graduations temporelles (axe horizontal) et verticales (niveaux d'eau), permettent la transformation géométrique nécessaire à la conversion pixel-coordonnées physiques. La définition du signal couleur permet la discrimination automatique entre la courbe de marée et le fond du document par analyse colorimétrique en espace RVB (Rouge-Vert-Bleu).

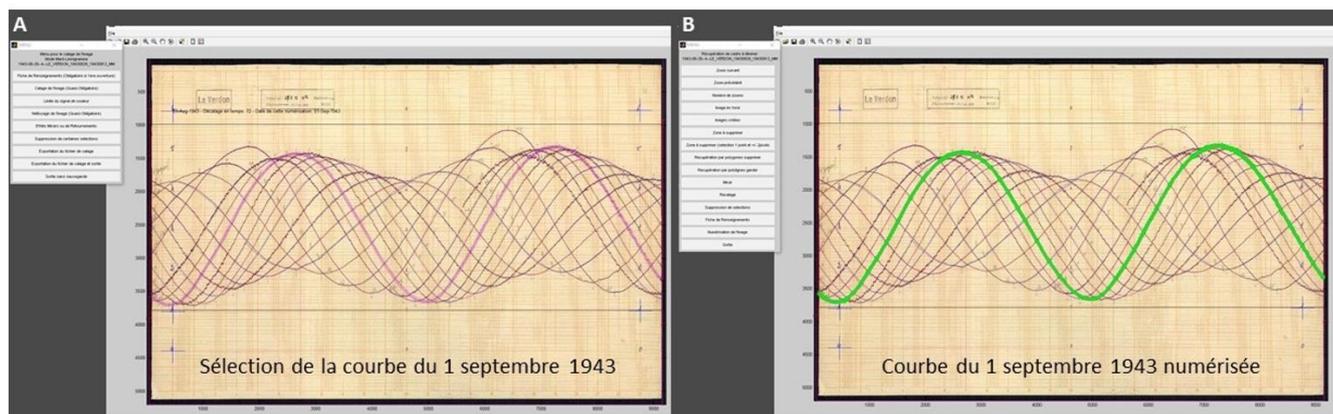


Figure 10 Interface du logiciel Nunieau pendant l'extraction d'une courbe de marée sur 1 jour (Shom, 2025)

Les paramètres de traitement incluent des seuils de reconnaissance colorimétrique adaptés à chacun des marégrammes, les zones d'exclusion pour éviter les artefacts (tampons, annotations) et les critères de validation automatique de la qualité d'extraction. La numérisation automatique s'effectue par reconnaissance colorimétrique basée sur les paramètres définis, le logiciel sélectionnant tous les pixels correspondant aux critères colorimétriques dans les zones définies par l'utilisateur.

2.4 Homogénéisation temporelle et préparation des données

2.4.1 Concaténation et organisation des fichiers de données

Les données numérisées passent par une phase de préparation méthodique incluant la concaténation des fichiers selon des critères permettant la cohérence scientifique des séries reconstruites. Les critères de regroupement incluent l'homogénéité instrumentale (regroupement par instrument identique), la cohérence géographique (emplacement physique identique) et l'optimisation des performances de traitement.

Cette organisation respecte les principes de la reconstruction de séries temporelles en garantissant que chaque segment de données provient de conditions d'observation homogènes. Des scripts Python spécialisés, développés et maintenus sur la plateforme GitLab du Shom, assurent la concaténation automatisée des données selon ces critères. Ces outils utilisent des algorithmes de détection automatique des discontinuités temporelles, des contrôles de cohérence des métadonnées, et des validations de format pour garantir l'intégrité des fichiers concaténés.

2.4.2 Conversion temporelle et gestion des références verticales historiques

L'homogénéisation temporelle constitue à la conversion de toutes les données en Temps Universel (TU) pour garantir la cohérence temporelle de la série reconstituée. Cette conversion s'appuie sur l'équation du temps et nécessite une analyse historique approfondie des systèmes horaires utilisés dans les colonies françaises, des évolutions de fuseaux horaires et des périodes exceptionnelles ayant modifié les références temporelles.

La méthodologie de conversion temporelle comprend l'identification des différents systèmes horaires utilisés selon les périodes (temps solaire moyen local avant 1912, temps colonial français, heure légale du site d'étude), la documentation des changements de fuseaux horaires liés aux évolutions administratives coloniales et post-coloniales et l'application des corrections d'équation du temps pour les périodes antérieures à la standardisation horaire. Un fichier de paramétrage spécifique documente minutieusement les périodes de transition et les corrections à appliquer.

La gestion des références verticales est une étape pour garantir la cohérence des séries marégraphiques historiques. En effet, les niveaux d'eau observés sont toujours relatifs à une référence verticale locale, qui peut évoluer au fil du temps en fonction des changements d'instruments, des travaux portuaires ou des recalages géodésiques. Ces références doivent être identifiées, quantifiées et homogénéisées pour permettre la comparaison et l'analyse des données sur le long terme.

2.5 Validation et contrôle qualité dans l'environnement TDB

2.5.1 Configuration de l'environnement de validation

Le contrôle final et la validation s'effectuent dans le logiciel Tide DataBase (TDB), logiciel pour archiver, traiter et rendre accessible les mesures in situ du niveau de la mer et les métadonnées associées, telles que les références verticales, les repères de marée, les instruments, les photographies, etc... C'est un outil métier interne du Shom pour l'ensemble des activités de traitement et d'analyse des données marégraphiques. Des sites historiques spécifiques peuvent être créés afin de traiter les données anciennes sans risque d'altération des données récentes des sites opérationnel.

Cette séparation garantit la sécurité des données opérationnelles utilisées pour les besoins quotidiens de navigation et d'hydrographie tout en facilitant les corrections sur les séries historiques. L'interface TDB permet la visualisation simultanée des observations numérisées, des prédictions de marée calculées pour la période historique, des métadonnées associées (référence verticale, système temporel), et des données complémentaires (pression atmosphérique, surcotes, ...).

L'environnement de validation comprend des modules spécialisés pour l'importation des données en différents formats (.csv, .txt), la génération automatique de prédictions de marée pour la validation croisée, l'interface de visualisation multi-données avec zoom et navigation temporelle, et les outils de correction et d'annotation avec traçabilité complète des interventions.

2.5.2 Typologie des corrections et système d'étiquetage qualité

Afin d'assurer la traçabilité et la transparence des interventions sur les données, chaque point de la série marégraphique reconstruite est associé à une étiquette de qualité, selon un système à cinq niveaux, comme illustré par la figure ci-dessous. Ce système d'étiquetage permet de distinguer :

- Qualité 1 : données non corrigées et ajustement vérifié pour le rattachement au zéro hydrographique, le rattachement au TU et pour une erreur de numérisation
- Qualité 2 : données corrigées de façon mineure (ajustements justifiés et documentés)
- Qualité 3 : données présentant des incertitudes sur plusieurs heures mais conservées avec un commentaire explicite
- Qualité 4 : données douteuses ou très incertaines, à utiliser avec précaution, qui ne semble pas correcte après intervention justifiée
- Qualité 5 : données supprimées du jeu principal en raison d'erreurs majeures ou d'absence de fiabilité

Ce système assure une traçabilité complète des corrections appliquées et permet à l'utilisateur final d'adapter le niveau de confiance accordé à chaque donnée, en fonction de ses besoins scientifiques ou opérationnels.

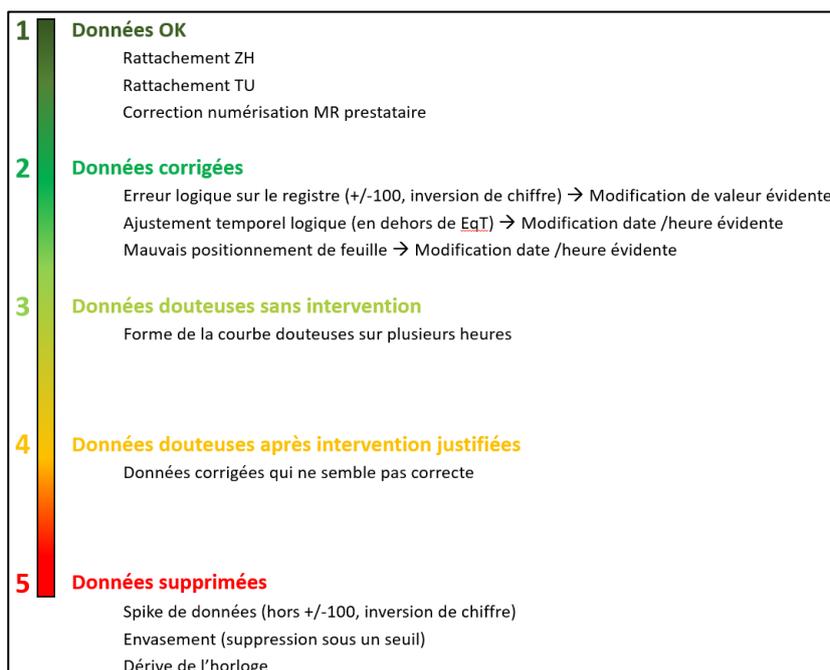


Figure 11 Figure de classification des étiquettes de qualités (Shom, 2025)

2.6 Processus de validation par repasse avec prédictions affinées

Après une première validation des séries marégraphiques dans l'environnement TDB, une seconde phase de validation, dite "repassé", est mise en œuvre pour affiner la qualité des corrections et optimiser la fiabilité des données finales. Ce processus repose sur la génération de nouvelles prédictions de marée, spécifiques à chaque année, à partir des observations validées lors de la première passe. La sélection des années repose principalement sur le taux de complétude des données, garantissant une base suffisante pour produire des composantes harmoniques.

Les séries corrigées sont exportées, puis analysées à l'aide du logiciel interne MAS (MARée-Simon). Un script Python dédié permet de connecter MAS aux jeux de données, d'automatiser le formatage des fichiers et de paramétrer les analyses. Pour chaque année sélectionnée, une décomposition harmonique du signal est réalisée (méthode des moindres carrés), permettant de générer des prédictions de marée plus précises. Lorsqu'une année ne dispose pas suffisamment de données, les composantes harmoniques d'une année voisine jugée plus robuste sont utilisées à titre de substitution.

Ces nouvelles prédictions sont ensuite réimportées dans TDB pour effectuer la repasse. Cette étape comparative entre observations et prédictions affinées permet de détecter plus finement les anomalies résiduelles, d'améliorer les corrections et d'optimiser l'étiquetage qualité. En parallèle, l'extraction des constantes harmoniques annuelles offre un jeu de données riche permettant une analyse temporelle fine.

2.7 Export et valorisation des données validées

2.7.1 Procédures d'export et traçabilité documentaire

Après validation des données dans l'environnement TDB, les séries corrigées sont exportées via le module "TDB Export" selon des formats compatibles avec les exigences de diffusion scientifique et opérationnelle. Un script Python complémentaire fusionne automatiquement les commentaires de correction avec les données validées, garantissant la traçabilité complète du processus de reconstruction depuis l'archive papier jusqu'à la donnée numérique finale.

2.8 Analyse statistique

2.8.1 Extraction des statistiques descriptives via TDB

Le logiciel TDB dispose de fonctionnalités d'analyse statistique intégrées permettant d'extraire les paramètres statistiques fondamentaux des séries marégraphiques. Ces analyses sont réalisées à deux échelles temporelles distinctes : sur l'ensemble de la série reconstituée et par années, permettant ainsi l'identification d'évolutions temporelles dans les caractéristiques statistiques.

Les paramètres extraits incluent les niveaux extrêmes (maximums et minimums absolus observés), le niveau moyen calculé sur l'ensemble des observations disponibles, ainsi que les statistiques annuelles correspondantes permettant d'analyser la variabilité interannuelle de ces paramètres. Cette extraction s'effectue via les modules de calcul statistique de TDB.

L'analyse comparative avant/après reconstruction constitue un élément central de cette démarche, permettant d'évaluer l'impact du processus de Data Archaeology sur les caractéristiques statistiques de la série. Les données brutes issues de la numérisation sont comparées aux données finales validées, offrant une mesure quantitative de l'amélioration apportée par les corrections et la validation scientifique.

2.8.2 Décomposition harmonique et analyse des phases via MAS

Les constantes harmoniques extraites à l'échelle annuelle offrent un cadre d'analyse fréquentielle particulièrement adapté à l'étude de l'évolution temporelle des composantes de marée. Leur suivi permet d'identifier d'éventuelles variations de phase ou d'amplitude, de détecter des ruptures, ou encore de mettre en évidence des tendances de long terme.

L'analyse est facilitée par une extraction automatisée des constantes pour chaque année disposant de suffisamment de données, assurant une homogénéité de traitement. Ces constantes constituent un complément essentiel aux statistiques descriptives classiques, notamment pour les études orientées vers la variabilité interannuelle, la stabilité du régime de marée ou les changements potentiels liés à des facteurs environnementaux, instrumentaux ou climatiques.

Il est à noter que la représentativité statistique des indicateurs extraits (niveaux moyens, extrêmes, constantes harmoniques) dépend fortement de la couverture temporelle effective de chaque année, c'est-à-dire du pourcentage de données disponibles par rapport à la période théorique, ce qui influe directement sur la fiabilité des analyses interannuelles

3. Résultats

Cette section présente les résultats obtenus à la suite de l'application de la méthodologie de Data Archaeology aux archives marégraphiques d'Antsiranana. Les données présentées couvrent l'ensemble du processus de reconstruction, depuis l'inventaire des documents historiques jusqu'à la production de la série marégraphique finale validée, en suivant la méthodologie.

3.1 Résultats de l'inventaire archivistique

Toutes les recherches archivistiques ont été réalisées en amont du stage. L'ensemble des fonds d'archives, qu'ils soient documentaires ou marégraphiques, a été fourni directement en version numérique pour être traité et analysé pendant la durée du stage.

L'inventaire des archives marégraphiques d'Antsiranana a permis d'identifier un total de 812 documents répartis sur la période 1888-2023. Cette synthèse révèle une répartition typologique comprenant 695 marégrammes (85,7%), 1 registres de marée (0,1%), et 116 documents complémentaires (14,2%) incluant des données techniques, des correspondances administratives et des carnets de nivellement.

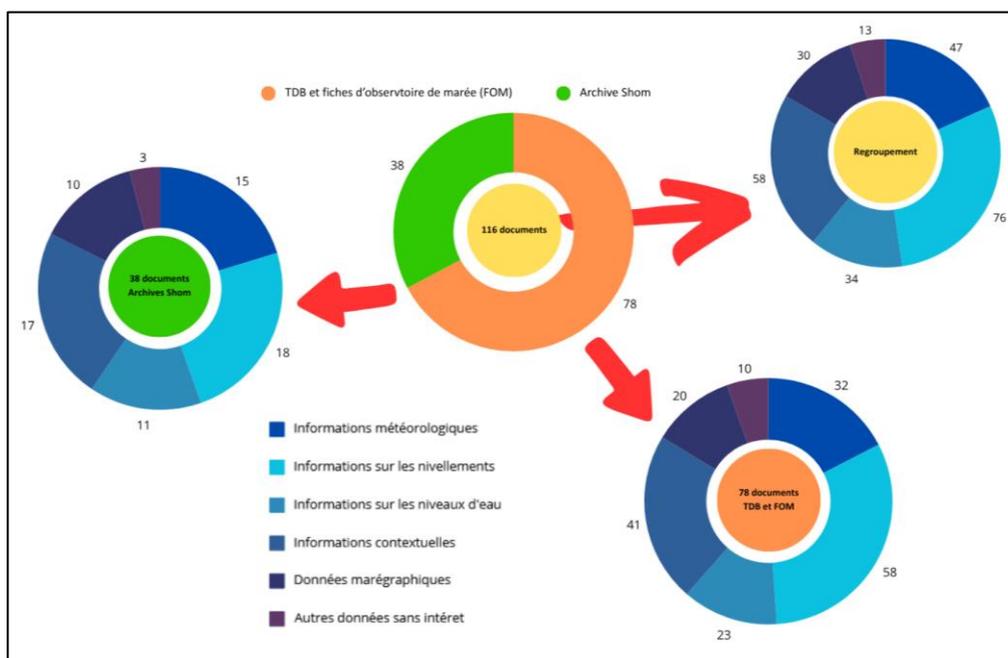


Figure 12 Répartition typologique des documents complémentaires (Shom, 2025)

L'analyse de la distribution temporelle révèle trois périodes de forte densité documentaire identifiables sur la Figure X : la période (1888-1910) avec 88% de couverture, la période (1960-1975) avec 70% de couverture, et la période (1995-2023) avec 10% de couverture. Les lacunes principales s'étendent sur les périodes 1920-1940 et 1976-1994, représentant respectivement 17 années et 19 années d'interruption documentaire de 1888 à 1971.

Cette répartition temporelle reflète les évolutions géopolitiques et techniques de Madagascar, avec une richesse documentaire exceptionnelle pour les premières décennies de l'observatoire colonial, confirmant l'importance stratégique d'Antsiranana dans le dispositif hydrographique français de l'océan Indien (Pouvreau et al., 2008).

Les 116 documents complémentaires ont été analysés, et leurs informations retranscrites dans un document de transcription de 76 pages, structuré chronologiquement et enrichi d'un code couleur facilitant la traçabilité des faits marquants (changements de références altimétriques, incidents techniques, événements climatiques, etc.). Parmi ces documents, 58 (soit 50 %) ont apporté au moins une information jugée utile à la reconstruction ou à la sécurisation de la série temporelle. Ces éléments couvrent notamment les nivellements de référence, la description des dispositifs marégraphiques, la morphologie portuaire, les niveaux d'eau historiques, ou encore des données météorologiques locales. L'ensemble des clichés d'archives représente un volume de 5,7 Go d'images, capturées, et conservées en haute définition pour garantir leur exploitation à long terme.

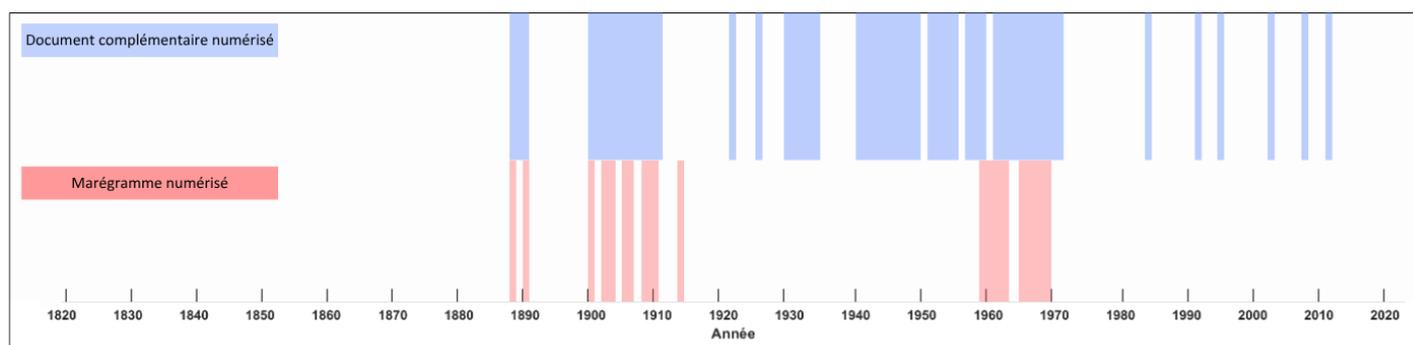


Figure 13 Distribution temporelle des documents d'archive (Shom, 2025)

3.2 Résultats de la dématérialisation

Le travail de dématérialisation des documents a également été effectué en amont, et l'ensemble des fonds, tant documentaires que marégraphiques, a été fourni directement en version numérique pour être traité et analysé pendant la durée du stage.

Dans le cadre du projet, la numérisation d'une partie des archives papier a été confiée à un prestataire externe, spécialisée dans la numérisation de documents scientifiques. Les marégrammes ont été scannés à une résolution minimale de 600 dpi, au format TIFF non compressé, afin de garantir la fidélité des détails et la qualité nécessaire aux traitements ultérieurs (Shom, 2025).

- Au total, 695 marégrammes ont été scannés pour le site d'étude.

En parallèle de cette démarche externalisée, les documents complémentaires (correspondances, rapports, plans, carnets de nivellement, photographies historiques, etc.) ont été pris en photo directement dans les archives, à l'aide d'un appareil photo numérique. Cette méthode de capture, réalisée sur site lors des campagnes d'inventaire, permet de préserver l'intégrité des documents originaux tout en assurant une qualité d'image suffisante pour l'exploitation ultérieure des informations. Au total, 116 documents complémentaires ont été photographiés dans le cadre de la reconstruction marégraphique.

3.3 Résultats de la numérisation

3.3.1 Numérisation externe

Sur les 695 marégrammes dématérialisés, 620 (89%) ont été numérisés par un prestataire externe en amont du projet. Les livrables correspondent à des séries temporelles au pas de 5 minutes, avec extraction des valeurs minimales, maximales et moyennes pour chaque intervalle.

3.3.2 Digitalisation interne via NUNIEAU

Cependant, 75 marégrammes (11%) présentant des dégradations importantes (courbes effacées, annotations superposées, ou contrastes insuffisants) n’ont pas pu être traités par le prestataire ou ont été oublié. Ces documents ont nécessité une intervention complémentaire en interne via le logiciel Nunieau.

Pour l’instant 27 marégrammes dans le marché de sous-traitance ont été digitalisés en interne à l’aide du logiciel NUNIEAU. Avec en moyenne 2 marégrammes numérisés par jours. Ce processus a impliqué :

- Calage géométrique manuel des axes temporel et vertical sur chaque marégramme, avec sélection précise de 5 points de référence pour corriger les distorsions.
- Réglages colorimétriques avancés pour isoler la courbe marégraphique des annotations manuscrites et du fond dégradé, en exploitant les fonctionnalités RVB de NUNIEAU.
- Nettoyage semi-automatique des artefacts via l’outil de suppression des pixels hors plage, efficace pour les documents partiellement illisibles.
- Validation pas à pas et extraction des données toutes les 5 minutes pour chaque marégramme traité.

Cette intervention a permis de récupérer 48918 points de données supplémentaires, soit environ 169 jours complets.

3.4 Résultats de l'homogénéisation

La phase d’homogénéisation a permis de rassembler toutes les données marégraphiques issues de la digitalisation (interne et externe) et de les harmoniser dans un format commun, avec un pas de temps de 5 minutes. L’ensemble des observations disponibles, qu’elles proviennent de marégrammes ou de registres, a été fusionné dans un fichier unique, constituant une série continue et cohérente couvrant la période 1888 à 1970, soit environ 16,5 années de données effectives.

Un travail spécifique a été réalisé pour garantir l’homogénéité temporelle et altimétrique de la série. Les mesures initialement exprimées en TU+3 ont été converties en temps universel coordonné (UTC) en appliquant un décalage de -3 heures à toutes les données. Une correction de référence verticale a également été appliquée : les mesures antérieures à 1912 ont été ajustées de +10 cm pour tenir compte du passage de l’ancien au nouveau zéro hydrographique, conformément aux indications trouvées dans les carnets de nivellement.

Tableau 1 Principaux résultats de l’homogénéisation (Shom, 2025)

Elément homogénéisé	Résultat obtenu
Nombre total de points concaténés (pas de 5 minutes)	1 739 950
Période couverte par la série homogénéisée	1888 – 1970
Durée totale de données effectives	≈ 16,5 années
Nombre de corrections temporelles (UTC)	1 (décalage de -3h pour conversion TU+3 → UTC)
Nombre de corrections altimétriques	1 (ajustement de +10 cm pour les données <1912)
Nombre de fichiers produits pour validation	1 fichier homogène prêt à être intégré dans TDB

Le fichier produit constitue désormais une base fiable pour des exploitations marégraphiques futures, notamment dans le cadre de travaux de validation, de modélisation portuaire ou de gestion des données historiques.

3.6 Résultats de la validation dans TDB

1^{ère} passe :

La série après la repasse, introduite dans TDB, comprenait 537 740 points de données échantillonnés toutes les 5 minutes. La différence, soit 1 202 210 points (environ 69,1% du total), correspond en grande partie à la suppression des données de 1900 à 1912 et de l'année 1960 et à toutes les données classées qualité 5.

2^e passe :

Au terme du processus de validation, la série finale validée conserve 537 532 points sur la même période (1888-1970). La différence, soit 208 points (environ 0.04% du total), correspond à des données jugées irrécupérables ou incohérentes, pour lesquelles un rattachement fiable n'a pu être établi.

Un total de **440** corrections et qualifications a été appliqué et documenté au sein de TDB. La répartition de ces interventions est la suivante :

- Qualité 1 (Données OK) : **24** points ont été confirmés comme corrects après vérification.
- Qualité 2 (Données corrigées) : **4** corrections mineures (ajustements logiques de valeur ou de temps) ont été apportées.
- Qualité 3 (Données douteuses sans intervention) : **56** points, présentant des incertitudes notables mais conservés avec un commentaire explicite.
- Qualité 4 (Données douteuses après intervention justifiée) : **3** points ont été corrigés tout en conservant une note d'incertitude.
- Qualité 5 (Données supprimées) : **353** points ont consisté en la suppression de données dues à des erreurs majeures (spikes, envasement, dérives d'horloge).

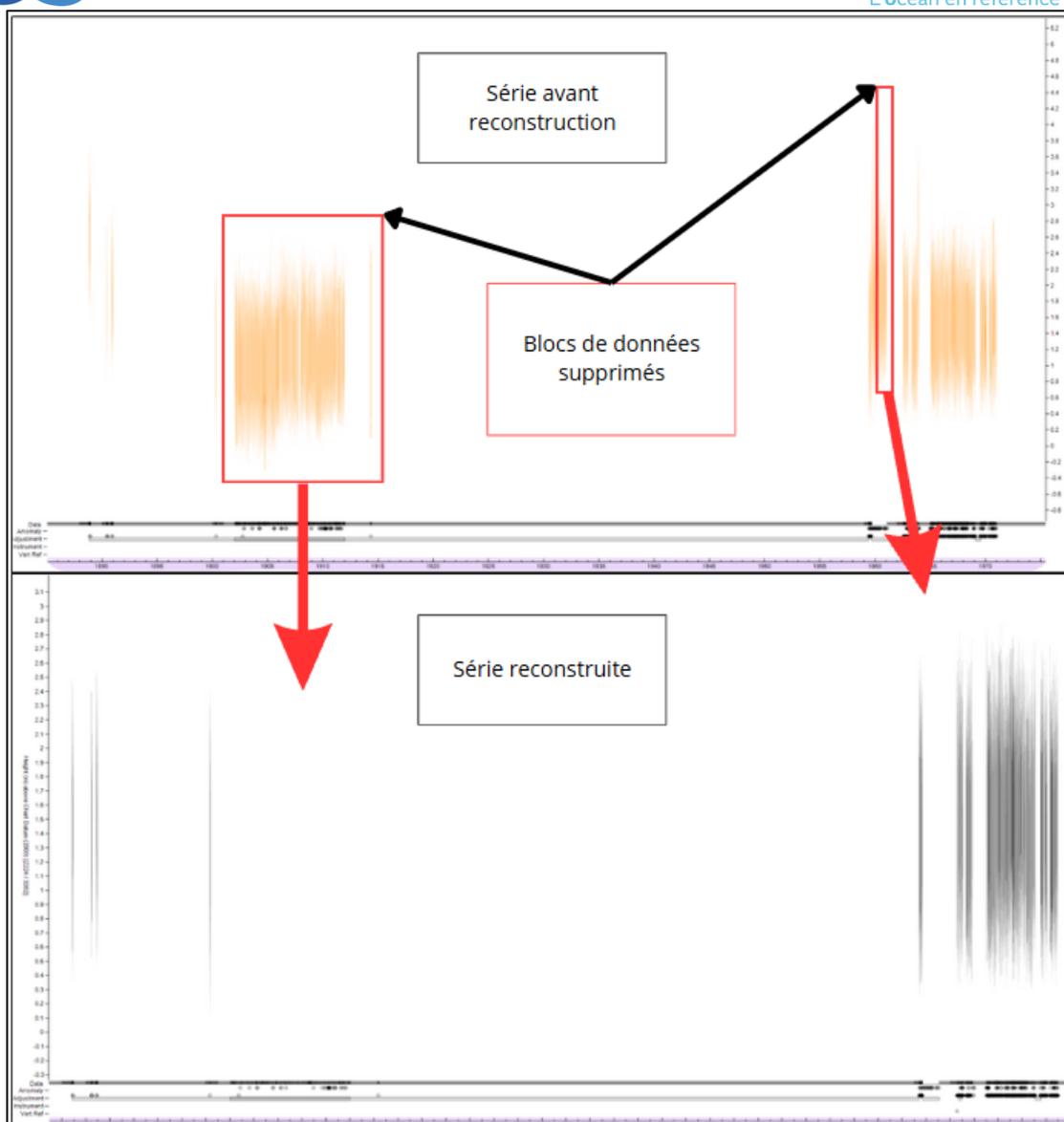


Figure 14 Captures d'écran de la validation globale dans TDB (avant-après) (Shom, 2025)

La Figure 14 offre une visualisation de l'impact du processus de validation. Le graphique supérieur montre la série avant validation détaillée, où des artefacts ou des segments de données problématiques sont visibles. Les encadrés rouges identifient des portions qui ont été écartées lors de la validation.

En revanche, deux importants blocs de données compris entre 1900 et 1912 et la plupart de 1960 n'ont pas pu être recalé par rapport au zéro actuel, en raison de l'absence de repères de nivellement ou d'informations fiables sur la référence verticale utilisée à cette époque.

Le graphique inférieur présente la série finale. Chaque point de cette série est désormais associé à une étiquette de qualité, garantissant la traçabilité des interventions. C'est cette série reconstruite et validée qui sert de base aux analyses présentées ci-après.

3.7 Analyses statistiques de la série validée

3.7.1 Analyse du niveau moyen et des niveaux extrêmes

Une fois la série marégraphique d'Antsiranana validée dans TDB, des analyses descriptives ont été menées pour caractériser l'évolution des niveaux d'eau et les principales composantes harmoniques de la marée sur la période couverte.

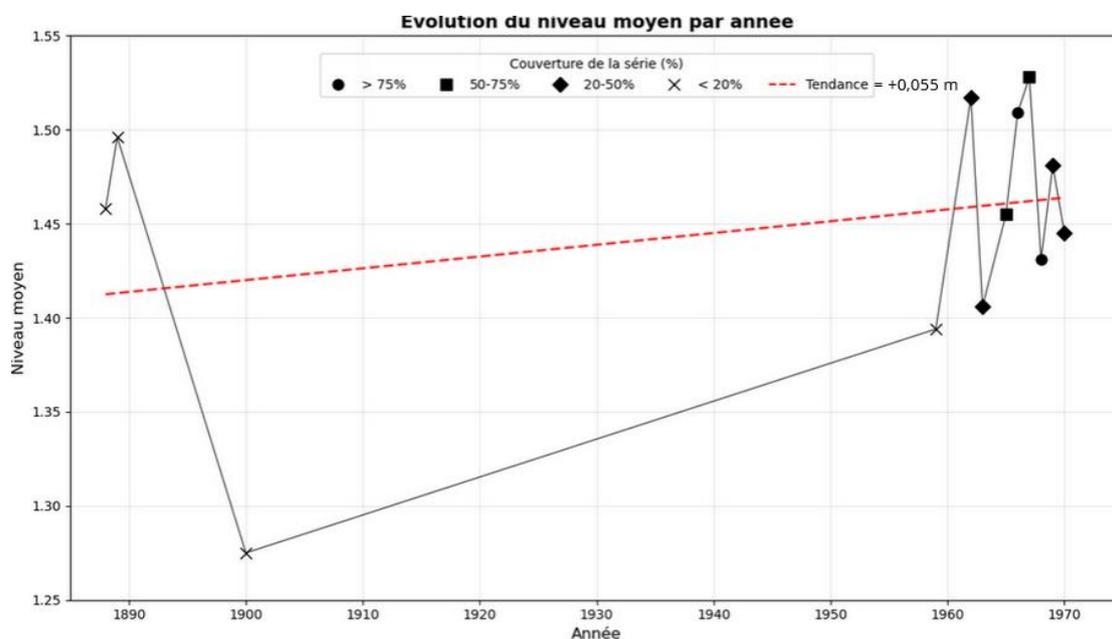


Figure 15 Evolution du niveau moyen par ans + tendance (Shom, 2025)

Ce graphique montre l'évolution du niveau moyen annuel. Une tendance générale de (ligne rouge pointillée) est superposée pour essayer de montrer une potentielle évolution à long terme du niveau marin sur le site, bien que des périodes de forte variabilité ou de moindre couverture de données doivent être considérées.

Les valeurs observées pour les premières années disponibles (entre 1888-1900), disposent d'une couverture inférieure à 20% et fluctuent entre 1,28 et 1,49 m. Après une longue lacune de données, les valeurs pour la période 1960-1970 se situent principalement entre 1,41 et 1,54 m, atteignant un pic proche de 1,55 m vers 1968. La ligne de tendance rouge superposée montre une augmentation générale, partant d'environ 1,42 m au début de la période pour atteindre environ 1,47 m à la fin des années 1970. La tendance générale du niveau moyen sur la période d'étude est de 0,055 m.

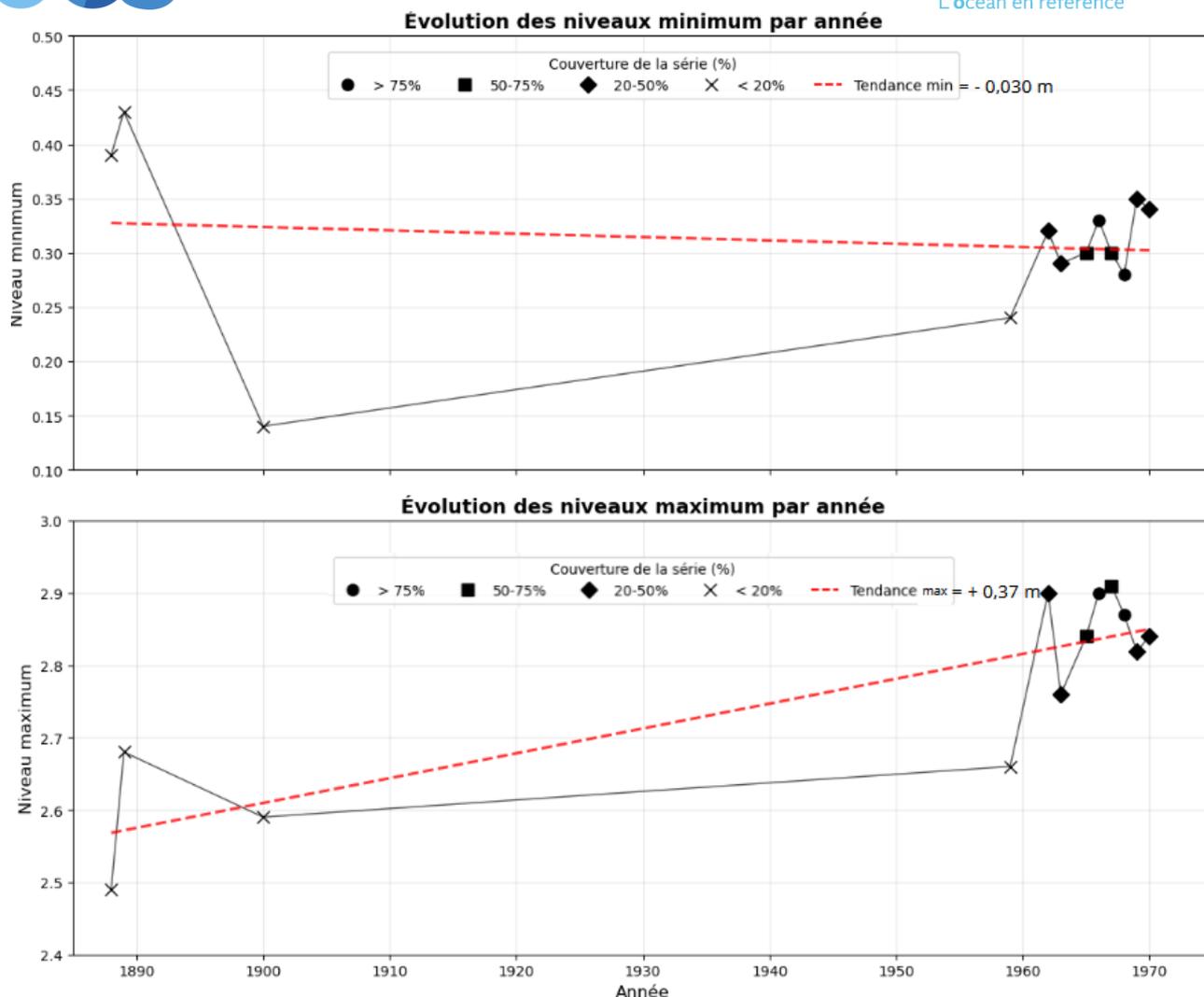


Figure 16 Evolution des niveaux extrêmes par ans + tendances (Shom, 2025)

La figure 16 présente respectivement l'évolution des niveaux d'eau les plus bas et les plus hauts enregistrés chaque année. Ils permettent d'identifier des tendances dans les extrêmes et d'évaluer la variabilité interannuelle. Comme pour le niveau moyen, la couverture des données annuelles influe sur la représentativité de ces extrêmes.

Evolution des niveaux minimums par année :

Entre 1888 et 1900, les données disponibles présentent une couverture inférieure à 20 %, avec des niveaux minimums enregistrés compris entre 0,15 m et 0,48 m. Sur la période plus dense de 1960 à 1970, ces minimums se situent dans une plage légèrement plus resserrée, entre 0,25 m et 0,45 m. Avec une tendance de $-0,03$ m.

Evolution des niveaux maximums par année :

Pour la période 1888-1900, malgré la faible couverture (< 20 %), les niveaux maximums observés se concentrent entre 2,47 m et 2,68 m. Entre 1960 et 1970, les valeurs maximales enregistrées s'étendent sur une plage plus large, de 2,28 m à 2,92 m. Avec une tendance de $+0,37$ m.

Il est important de noter que ces statistiques (moyennes, minimums, maximums) sont issues directement des fonctionnalités d'analyse de TDB, appliquées à la série validée de points mesurés toutes les 5 minutes.

3.7.2 Analyse harmonique

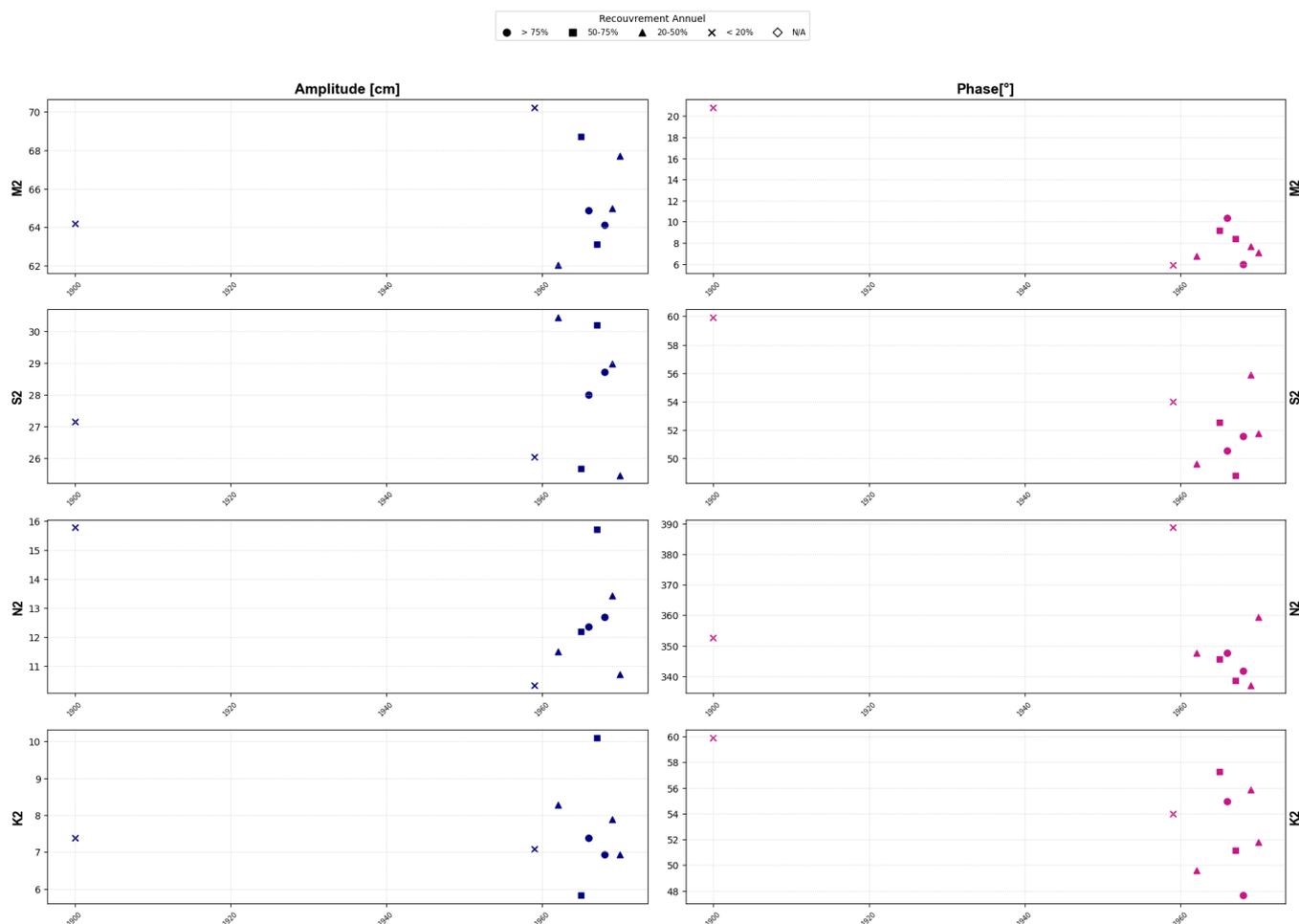


Figure 17 Evolution des composantes harmonique M2, S2, N2 et K2 et de leurs phases respectives sur toute la série après reconstruction (Shom, 2025)

La Figure 17 présente les résultats de l'analyse harmonique menée sur chaque année. Elle illustre l'évolution temporelle de l'amplitude (colonne de gauche, en cm) et de la phase (colonne de droite, en degrés) pour les principales composantes de marée M2, S2, N2 et K2. Encore une fois une attention doit être portée à la fiabilité des constantes harmoniques calculées pour une année donnée fortement de la quantité de données disponibles.

Composante

M2

:

En 1900, un unique point de données, avec une couverture inférieure à 20 %, indique une amplitude d'environ 64 cm pour la composante M2. Pour la période 1960-1970, les amplitudes observées, issues de données présentant une couverture majoritairement supérieure à 50 %, varient entre 62 cm et 70 cm. Concernant la phase, la valeur estimée en 1900 est d'environ 20,5°. Entre 1960 et 1970, les phases se situent dans une plage plus restreinte, comprise entre 6° et 12°.

Composante S2 :

En 1900, la composante S2 présente une amplitude de 27,2 cm, mesurée à partir d'un point avec une couverture inférieure à 20 %. Sur la période 1960-1970, les amplitudes s'échelonnent entre 26 cm et 30,5 cm, avec des données dont la couverture varie entre 20 % et plus de 75 %. La phase associée au point de 1900 est d'environ 60°. Pour les années 1960 à 1970, les phases se répartissent entre 50° et 58°, en cohérence avec les conditions de marée observées sur cette période.

Composante N2 :

Pour l'année 1900, une amplitude de 15,8 cm est relevée à partir d'un point faiblement couvert. Entre 1960 et 1970, les amplitudes varient de 10,5 cm à 15,8 cm, selon les années et la qualité des données. La phase mesurée en 1900 est d'environ 353°. Sur la période 1960–1970, les phases s'étalent entre 340° et 365°, soit jusqu'à 5° après remise à zéro du cycle de 360°, ce qui reste cohérent avec la variabilité naturelle de cette composante.

Composante K2 :

En 1900, l'amplitude de la composante K2 est estimée à 7,3 cm, à partir d'un point dont la couverture est inférieure à 20 %. Durant la décennie 1960-1970, les amplitudes relevées vont de 6,2 cm à 10,1 cm, avec des couvertures de qualité variable selon les années. La phase mesurée en 1900 est de 59,5°, tandis que celles observées entre 1960 et 1970 se situent entre 48° et 58°.

Ces analyses descriptives, basées sur la série de données validée dans TDB, constituent une première caractérisation essentielle du signal marégraphique d'Antsiranana, où la robustesse des observations annuelles est directement liée à la complétude des données de l'année considérée.

4. Discussion

Les résultats obtenus à l'issue du processus de reconstruction permettent à présent d'en évaluer les apports scientifiques, les limites méthodologiques, et les perspectives d'exploitation. Cette discussion vise à replacer les données reconstituées d'Antsiranana dans une lecture critique, tant du point de vue technique que dans leur contribution aux connaissances sur le niveau marin régional.

4.1 Apports scientifiques et valorisation du patrimoine

L'analyse de la série marégraphique reconstituée d'Antsiranana révèle une évolution à long terme cohérente avec les tendances globales. La tendance du niveau moyen mesurée sur toute la période d'étude est de +0,055m qui est à prendre avec des pincettes... Cette tendance suit avec la hausse moyenne globale estimée à ~1,7 mm/an pour 1901–1990 (Church & White 2011), et de l'ordre de quelques millimètres par an selon les mesures altimétriques récentes. Plus de 60 % des marégraphes de l'océan Indien occidental montrent par ailleurs un signal général de montée du niveau marin (Ragoonaden, 2006), ce qui confirme que les observations d'Antsiranana s'insèrent dans un contexte régional de hausse. Bien sûr, ces tendances locales restent à interpréter avec prudence : l'écart des données annuelles est encore dépendant de lacunes de couverture. Les chiffres précis d'élévation (par ex. ~1-2 mm/an) nécessiteraient une analyse statistique robuste (régression chronologique) qui dépasse le cadre de cette discussion, d'autant que les séries tropicales peuvent être influencées par des phénomènes interannuels (ENSO, phase de l'IOD, vents).

Du point de vue océanographique et climatique, la reconstitution apporte une contribution notable. Disposer d'une série marégraphique depuis 1888 en Afrique de l'Est enrichit le réseau mondial de stations à long terme, encore très inégalement réparties entre hémisphères. En effet, seulement une petite poignée de marégraphes historiques (environ 89) fournissent plus d'un siècle d'observations fiables, et celles-ci sont majoritairement situées en Europe et Amérique du Nord (Marcos et al., 2019).

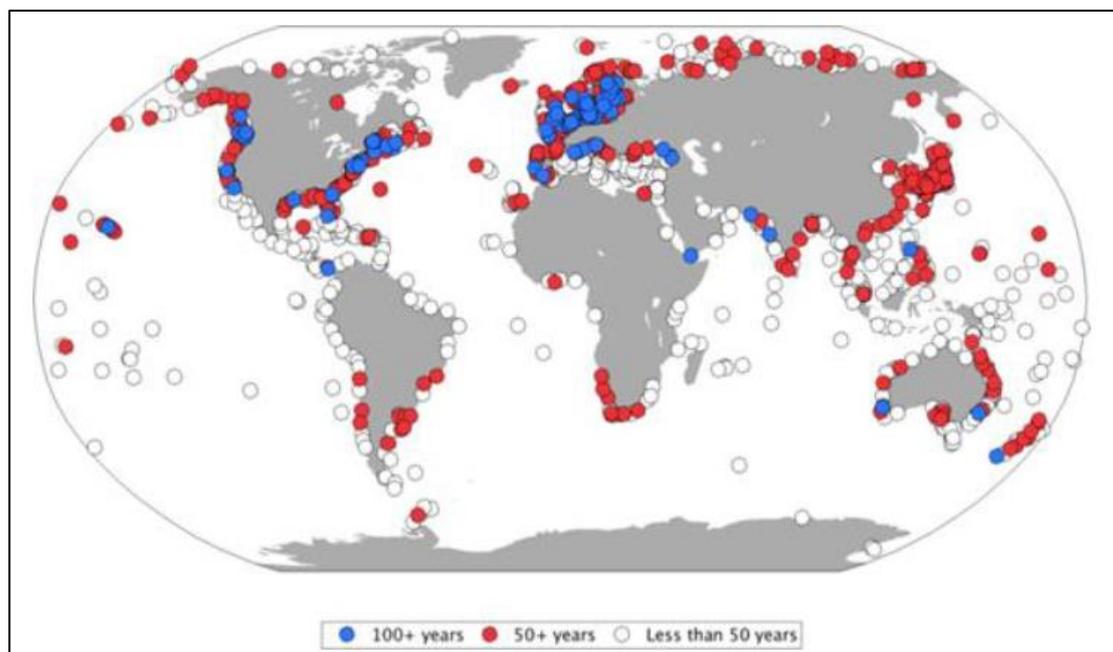


Figure 18 Enregistrements marégraphiques RLR : > 100 ans (bleu), > 50 ans (rouge) (Marcos et al., 2019)

Antsiranana devient ainsi l'une des rares séries séculaires dans l'hémisphère Sud – et la plus ancienne de l'océan Indien occidental – ce qui ouvre des perspectives pour potentiellement valider et recalibrer les modèles de marée régionaux. Des travaux antérieurs ont montré que les marégraphes historiques sont essentiels pour tester les circulations océaniques et l'évolution du niveau marin. Par exemple, Woodworth et al. (2019) soulignent que les séries longues sont un “patrimoine scientifique unique” permettant de valider les modèles océaniques et d'identifier des tendances séculaires. De même, Church & White (2011) insistent sur l'accès à des données anciennes de haute qualité pour détecter les signaux climatiques aux échelles décennales. Bien que le site ne soit plus instrumenté aujourd'hui, la série reconstituée reste précieuse pour l'étude des oscillations passées et pourra, avec précaution, contribuer à affiner les projections régionales du niveau marin.

Par ailleurs, cette démarche présente un fort enjeu patrimonial. Les archives marégraphiques d'Antsiranana, constituent un fonds exceptionnel pour l'histoire maritime régionale. Grâce à son rôle administratif et hydrographique, le site possède l'une des plus anciennes séries d'observations de l'océan Indien occidental, débutant en 1888. Sa valorisation par numérisation et diffusion selon les standards GLOSS/PSMSL s'inscrit dans une dynamique internationale de Data Archaeology, visant à préserver et exploiter scientifiquement ces données historiques aujourd'hui peu accessibles. Au-delà de l'apport quantitatif, la reconstitution de cette série contribue ainsi à enrichir les connaissances océanographiques régionales tout en redonnant une visibilité à un patrimoine scientifique sous-utilisé.

4.2 Limites méthodologiques et sources d'incertitude

Malgré ces apports, plusieurs limites méthodologiques restent à considérer. Les relevés historiques sont dispersés et hétérogènes : ils proviennent de registres manuscrits, de marégraphes analogiques différents et de métadonnées souvent lacunaires.

Les erreurs potentielles de transcription ou de compréhension des annotations anciennes sont difficilement quantifiables. De plus, la conversion des temps, en temps universel introduit des imprécisions, notamment pour les relevés du 19^e siècle.

Sur le plan vertical, la série a dû être référencée à plusieurs niveaux zéro au fil du temps. Tout recalage ou recalibration (par nivellement, passage des repères hydrographiques civils aux systèmes géodésiques) est source d'incertitude. Comme noté par Pouvreau et al. (2008), “les changements de systèmes de référence verticale et temporelle, les interruptions de séries et les évolutions instrumentales compliquent l'homogénéisation et la validation scientifique des données”. Concrètement, il subsiste une incertitude sur la constance des niveaux de référence et sur la stabilité des stations de mesure sur toute la période.

Enfin, la robustesse des statistiques (moyennes annuelles, tendances) dépend fortement de la complétude des données instrumentales disponibles. En effet, comme le montre la partie état de l'art, la “robustesse des observations annuelles est directement liée à la complétude des données de l'année considérée”. Ainsi, les années présentant une couverture inférieure à 30 % offrent une base moins fiable pour l'estimation des moyennes annuelles ou pour l'analyse des niveaux extrêmes de marée.

4.3 Perspectives d'amélioration et développements futurs

Plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées pour optimiser ce type de travaux. Sur le plan de la numérisation, les progrès récents en intelligence artificielle offrent de nouvelles possibilités d'automatisation. Par exemple, le logiciel libre MeteoSaver (Muheki et al., 2025) utilise des algorithmes de “machine learning” pour transcrire des tableaux manuscrits de données climatiques et atteint des taux de transcription de l'ordre de 95–100 % des valeurs. Une adaptation de telles méthodes au contexte marégraphique, avec reconfiguration aussi pour repérer lignes de marées ou les lire des registres de marée, pourrait accélérer la conversion des archives manuscrites. De plus, un précédent projet de hackathon mené en interne au Shom a déjà permis de développer un prototype de reconnaissance automatique de l'écriture manuscrite par OCR, appliqué à des documents anciens.

Enfin, il est crucial de prévoir la diffusion pérenne de ces données. Le respect des formats GLOSS/PSMSL et la publication sur des portails ouverts (data.shom.fr, PSMSL, SONEL) assurent une large accessibilité. À l'avenir, on peut recommander la mise en ligne d'outils interactifs (cartographie du niveau, visualisation des tendances) destinés aux gestionnaires côtiers. Cette ouverture pourrait aller de pair avec une formation des services hydrographiques nationaux à l'exploitation de ces séries historiques, pour garantir leur usage dans les études climatiques régionales.

4.4 Implications pour la gestion des risques côtiers

La série devra inclure une analyse des niveaux extrêmes et des surcotes afin de constituer une référence utile à la gestion des risques côtiers à Madagascar et dans l'océan Indien occidental. En connaissant mieux le niveau de la mer passé, on affine les projections d'élévation et d'inondation futures. Par exemple, la planification portuaire et la modélisation des ondes de tempête pourront intégrer ces nouvelles données pour recalibrer les limites de submersion. Les données anciennes aident à caractériser l'aléa des marées extrêmes historiques, fournissant une base pour les études de retour d'événements exceptionnels (crues marines, cyclones). Ces informations sont d'autant plus critiques que les zones côtières malgaches sont très vulnérables à l'érosion et à la montée du niveau. Les premières études menées dans la région (région du WIO) ont par ailleurs constaté une opinion locale en adéquation avec une augmentation du niveau marin et de l'occurrence des inondations (Ragoonaden, 2006). L'apport de la série reconstruite d'Antsiranana pourrait aider les décideurs locaux à quantifier ces tendances observées et à orienter les stratégies d'adaptation (aménagement des digues, restitution des mangroves, etc.) sur une base historique vérifiée.

4.5 Bilan critique et recommandations

En synthèse, la reconstruction de la série marégraphique d'Antsiranana a permis de sécuriser un patrimoine historique unique et de proposer un jeu de données depuis 1888. Elle offre ainsi une base pour étudier les tendances séculaires du niveau marin et pour alimenter les réseaux d'observation internationaux (GLOSS, PSMSL). Cependant, il est préconisé de poursuivre des efforts complémentaires, notamment :

- Renforcer l'intégration régionale : encourager la collecte de séries analogues sur d'autres ports de l'océan Indien (Nosy-Be, Toamasina, etc.) pour comparer les tendances régionales et établir un réseau cohérent.
- Déployer des outils numériques : investir dans le développement et l'adaptation d'outils d'OCR et de reconnaissance d'écriture automatique dédiés aux données marégraphiques historiques, afin de réduire le travail manuel et d'améliorer l'accès au patrimoine.

- Valoriser institutionnellement la série : promouvoir la série auprès des institutions scientifiques régionales (universités, instituts océanographiques) et participer à des programmes internationaux.

Ces actions permettront de consolider les apports scientifiques du travail effectué et de maximiser son utilité pour la recherche océanographique, la climatologie régionale et la gestion côtière. En somme, la série d'Antsiranana enrichit significativement la connaissance du niveau de la mer à Madagascar, et son exploitation future doit être encouragée pour soutenir les études climatiques et patrimoniales.

Conclusion

La reconstitution de la série marégraphique d'Antsiranana représente la contribution principale de ce stage. Nous avons produit une base de données numérique complète pour 1888-1970, en exploitant 812 documents d'archives et en appliquant une validation rigoureuse. Cette série constitue une contribution scientifique majeure en validant localement les tendances globales de montée du niveau marin et en renforçant le réseau des stations historiques séculaires dans l'hémisphère Sud. Sur le plan patrimonial, elle préserve des observations de début d'époque coloniale, jusque-là inexploitées, et les met à disposition pour la communauté (selon les standards internationaux).

Plusieurs limites méthodologiques restent cependant à considérer. Les données anciennes sont dispersées et hétérogènes (instruments variés, registres manuscrits incomplets). Des interruptions documentaires importantes subsistent dans la série (notamment 1920-1940 et 1976-1994), ce qui empêche l'estimation formelle d'une tendance linéaire sur toute la période. De même, les changements de système de référence verticale et les imprécisions de datation anciennes introduisent des incertitudes sur les niveaux absolus mesurés. Ces contraintes méritent une attention continue : de futures études pourraient affiner la calibration verticale (par nivellements ou données GNSS) et la conversion temporelle des anciens relevés pour renforcer la cohérence du signal.

Par ailleurs, la mise à disposition de cette série dans la base TDB du Shom, avec un transfert prévu vers les réseaux internationaux (PSMSL, SONEL, GLOSS), permettra d'enrichir les outils de suivi régional du changement climatique et de favoriser les analyses collaboratives. Ces données rénovées peuvent alimenter des analyses océanographiques ultérieures (étude des composantes harmoniques, tests de modèles régionaux de marée, analyse des oscillations interannuelles). En outre, elles fournissent des repères indispensables pour la gestion du risque côtier local (quantification des taux de hausse relatifs, scénarios d'adaptation).

Enfin, cette reconstruction historique ouvre la voie à des travaux futurs. Elle souligne l'intérêt de poursuivre la mission de Data Archaeology sur d'autres sites de l'océan Indien et ailleurs, afin de combler les lacunes globales. L'exploitation des archives marégraphiques d'Antsiranana pourra être enrichie par de nouvelles collaborations (par exemple pour affiner la subsidence locale ou intégrer les données dans des simulations climatiques régionales). Au-delà du stage, la valorisation de cette série, via sa diffusion en libre accès et son intégration dans des études scientifiques, constituera une continuation naturelle de ce travail, pérennisant ainsi ce précieux patrimoine pour la recherche.

Références bibliographiques

Church JA, White NJ. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surv Geophys* 2011;32:585–602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>.

Cipollini P, Calafat FM, Jevrejeva S, Melet A, Prandi P. Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges. *Surv Geophys* 2017;38:33–57. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9392-0>.

Data Archaeology | GLOSS. n.d. <https://gloss-sealevel.org/data-archaeology#:~:text=Data%20archaeology%20activities%20will%20help,Two%20such%20examples%20are>.

Guérou A, Meyssignac B, Prandi P, Ablain M, Ribes A, Bignalet-Cazalet F. Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement uncertainty. *Ocean Science* 2023;19:431–51. <https://doi.org/10.5194/os-19-431-2023>.

Guyomard D, Petit M, Desruisseaux M, Stretta J-M, Gardel L. Hydroclimat du Sud-Ouest de l'océan Indien et océanographie spatiale. In: Huynh F, editor. Halieutique et environnement océanique : Le cas de la pêche palangrière à l'espadon depuis l'île de la Réunion, Marseille: IRD Éditions; 2006, p. 39–65.

Madagascar - Antsiranana et le nord de la Grande Ile : de l'enclave militaire coloniale au port touristique | CNES. n.d. <https://cnes.fr/geoimage/madagascar-antsiranana-nord-de-grande-ile-de-lenclave-militaire-coloniale-port-touristique> (accessed June 16, 2025).

Marcos M, Wöppelmann G, Matthews A, Ponte RM, Birol F, Arduin F, et al. Coastal Sea Level and Related Fields from Existing Observing Systems. *Surv Geophys* 2019;40:1293–317. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09513-3>.

Méthodologie de reconstruction de séries marégraphiques | Réseaux marégraphiques français. n.d. <https://refmar.shom.fr/dataArchaeology/methodologie#:~:text=Malheureusement%2C%20les%20longues%20s%C3%A9ries%20mar%C3%A9graphiques,d%27archives%20mar%C3%A9graphiques%20papier%20est%20consid%C3%A9rable>.

Muheki D, Vercruyse B, Chandrasekar KKT, Verbruggen C, Birkholz JM, Hufkens K, et al. MeteoSaver v1.0: a machine-learning based software for the transcription of historical weather data. *EGUsphere* 2025:1–52. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3779>.

Nerem RS, Beckley BD, Fasullo JT, Hamlington BD, Masters D, Mitchum GT. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proc Natl Acad Sci USA* 2018;115:2022–5. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>.

Ponte R m, Carson M, Cirano M, Domingues C m, Jevrejeva S, Marcos M, et al. Towards Comprehensive Observing and Modeling Systems for Monitoring and Predicting Regional to Coastal Sea Level. *Frontiers In Marine Science* 2019;6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00437>.

Pouvreau N. Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest. phdthesis. Université de La Rochelle, 2008.

Ragoonaden S. Sea Level Activities and Changes on the Islands of the Western Indian Ocean. Western Indian Ocean Journal of Marine Science 2006;5:179–94. <https://doi.org/10.4314/wiojms.v5i2.28509>.

Simon B. La marée : la marée océanique côtière / Bernard Simon. Institut océanographique. Paris; 2007.

Talke S, Jay D. Archival Water-Level Measurements: Recovering Historical Data to Help Design for the Future. Civil and Environmental Engineering Faculty Publications and Presentations 2017.

Wenzel M, Schröter J. Global and regional sea level change during the 20th century. J Geophys Res Oceans 2014;119:7493–508. <https://doi.org/10.1002/2014JC009900>.

Wenzel M, Schröter J. Reconstruction of regional mean sea level anomalies from tide gauges using neural networks. J Geophys Res 2010;115:2009JC005630. <https://doi.org/10.1029/2009JC005630>.

Zawadzki L, Ablain M. Accuracy of the mean sea level continuous record with future altimetric missions: Jason-3 vs. Sentinel-3a. Ocean Science 2016;12:9–18. <https://doi.org/10.5194/os-12-9-2016>.