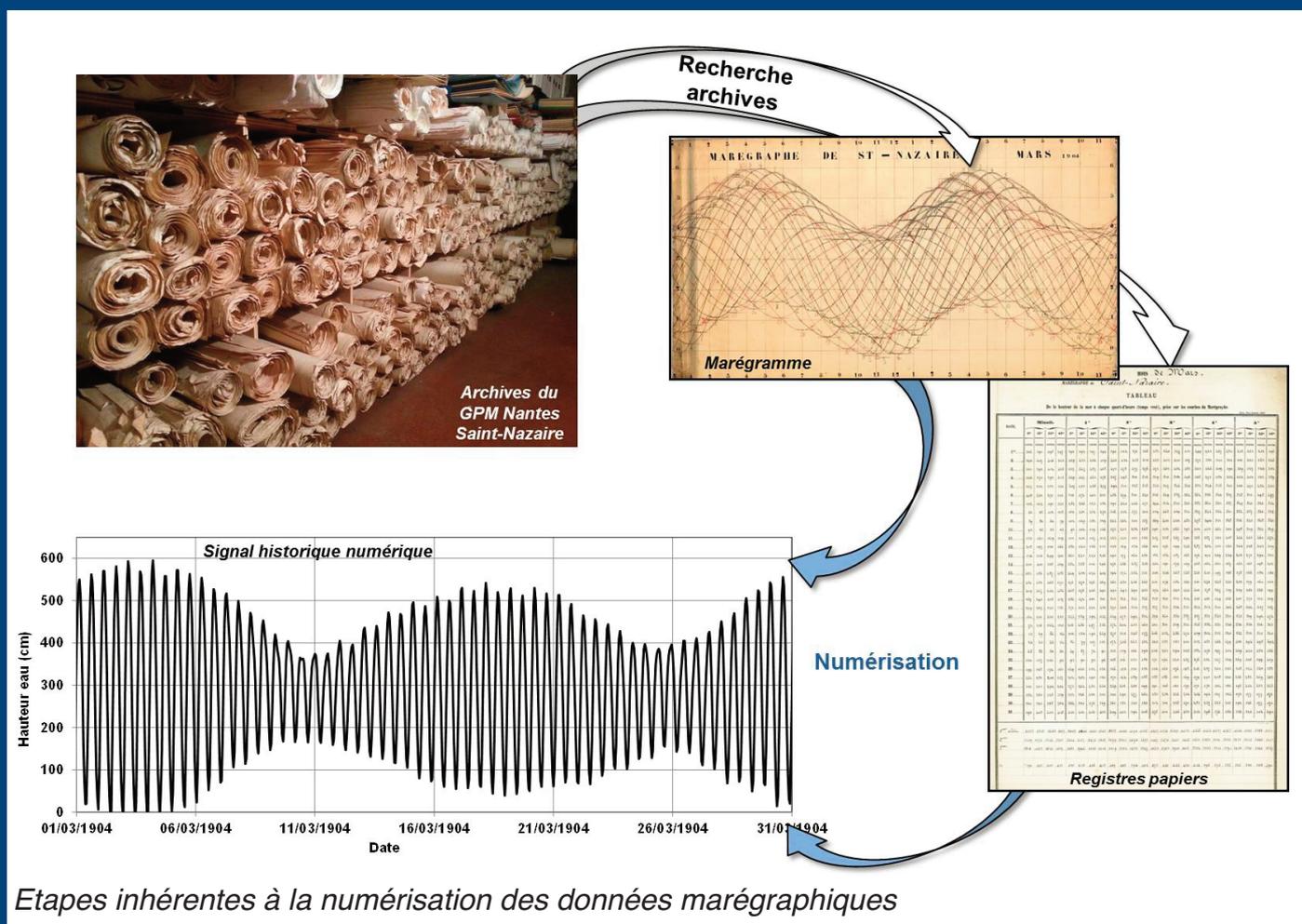


Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire

par Yann Ferret



Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire

Rapport n° 27 SHOM/DOPS/HOM/MAC/NP

du 22 septembre 2016

Yann Ferret

Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

Département HOM/Marée-Courants

Septembre 2016

Contenu

Fiche synthétique de rendu final de projet: reconstruction de la série historique des hauteurs d'eau observées à Saint-Nazaire	1
Rapport Final détaillé.....	6
I. Introduction	6
I.1. Contexte général.....	6
I.2. Présentation du Projet.....	7
II. Généralités sur l'Observation du niveau marin	9
II.1. Instrumentation marégraphique.....	9
II.1.1. Méthodes de mesures	9
II.1.1.1 Le réseau marégraphique historique du Service Hydrographique.....	11
II.1.1.2 Le réseau marégraphique actuel du SHOM : RONIM	12
II.2. Valeurs caractéristiques et composantes de marée	13
II.2.1. Calcul des Niveaux moyens.....	13
II.2.2. Les variations du niveau marin moyen à long terme	14
II.3. Prédiction de la marée	14
II.4. Reconstruction de série historique de hauteurs d'eau : évolution des systèmes de mesures de temps et de hauteurs	14
III. Recherche documentaire : documents nécessaires à la reconstruction.....	16
III.1. Documents comportant des mesures historiques à Saint-Nazaire	17
III.1.1. Mesures du niveau marin à Saint-Nazaire.....	17
III.1.2. Mesures météorologiques à Saint-Nazaire	19
III.2. Métadonnées	20
III.2.1. Informations relatives aux mesures marégraphiques	20
III.2.2. Documents relatifs à l'histoire de l'Observatoire marégraphique de Saint-Nazaire.	22
IV. Synthèse de l'analyse documentaire historique de l'observatoire de marée de Saint-Nazaire..	23
IV.1. Histoire de la Loire Aval depuis le 19 ^{ème} siècle : aménagements et études.	23
IV.1.1. Bref historique du développement de la ville de Saint-Nazaire.....	23
IV.1.2. Réseau marégraphique historique en Loire.....	27
IV.2. Historique de l'observatoire de marée de Saint-Nazaire	29
IV.2.1. Etablissement du marégraphe (1860 – 1863).....	29
IV.2.2. Marégraphe opéré par le Service hydrographique (1863 – 1920).....	34

IV.2.2.1	Les observateurs des marées de Saint-Nazaire.....	34
IV.2.2.2	Lacunes dans les mesures	35
IV.2.3.	Marégraphe opéré par les Ponts et Chaussées / GPM-NSN(1920-2007).....	37
IV.2.3.1	Cession du marégraphe de la Marine au Service des Ponts et Chaussées (1920-1922) 37	
IV.2.3.2	Fonctionnement de l'Observatoire des marées entre 1920 et 1950.....	37
IV.2.3.3	Reprise des mesures et nouvel emplacement du marégraphe (1950).....	39
IV.2.3.4	Fonctionnement de l'observatoire des marées entre 1950 et 2007.....	43
IV.2.3.5	Lacunes dans les mesures	45
IV.2.4.	Intégration du Marégraphe au réseau RONIM (2007-Aujourd'hui).....	46
IV.2.5.	Synthèse sur les marégraphes utilisés au cours du temps	47
IV.3.	Suivi historique du zéro hydrographique / zéro du marégraphe.....	48
IV.3.1.	Chronologie des références verticales.....	49
IV.3.1.1	Continuité du zéro hydrographique de Saint-Nazaire	49
IV.3.1.2	Suivi du zéro du marégraphe depuis 1863.....	53
IV.3.1.3	Synthèse.....	57
IV.3.2.	Stabilité des repères de nivellement	58
IV.4.	Suivi des systèmes de temps utilisés	61
V.	Reconstruction de la série marégraphique historique de Saint-Nazaire	62
V.1.	Inventaires et détails des mesures	62
V.2.	Numérisation des documents	63
V.2.1.	Numérisation des registres papiers	63
V.2.2.	Numérisation des marégrammes.....	67
V.3.	Nettoyage/Correction des données numérisées.....	70
V.4.	Mise en cohérence des données	75
V.4.1.	Homogénéisation en temps des mesures de hauteurs d'eau digitalisées	75
V.4.1.1	Conversion TSV en TSM : Equation du temps	75
V.4.1.2	Conversion TSM en TU : Correction en longitude	76
V.4.1.3	Conversion Temps légal en TU	76
V.4.1.4	Corrections dues à des erreurs de mesures	76
V.4.1.5	Synthèse des corrections temporelles appliquées.....	81
V.4.2.	Homogénéisation verticale des mesures de hauteurs d'eau digitalisées.....	83
V.5.	Validation des données historiques	84

V.5.1.	Etude de la corrélation avec des niveaux moyens de stations proches	84
V.5.2.	Etude des résidus.....	86
V.5.3.	Utilisation des données de pression atmosphérique historiques	90
V.5.4.	Nettoyage des données : définition des étiquettes qualité	93
V.6.	Résultats obtenus sur la série marégraphique historique de Saint-Nazaire.....	99
VI.	Evolutions des composantes du niveau de la mer à Saint-Nazaire.....	103
VI.1.	Evolution des caractéristiques de la marée.....	103
VI.2.	Tendance long terme	105
VI.3.	Evolution du marnage.....	108
VII.	Conclusion & Perspectives	111
	Bibliographie.....	114
	ANNEXES	115

Acronymes / abréviations

AD44 : Archives Départementales de Loire-Atlantique

BDL : Bureau Des Longitudes

BM : Basse mer

COI : Commission océanographique intergouvernementale

EPSHOM : Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

FOM : Fiche d'observatoire des marées

GLOSS : Global Sea Level Observing System

GPM-NSN : Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire

MAS : logiciel de calcul des prédictions de marée développé par le SHOM

MEEM : Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer

NMa : Niveau Moyen annuel de la mer

NMj : Niveau Moyen journalier de la mer

NMm : Niveau Moyen mensuel de la mer

PANSN : Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire

PM : Pleine mer

PSMSL : Permanent Service for Mean Sea Level

P&C : Ponts et Chaussées

SH : Service Hydrographique

SHD : Service Historique de la Défense

TDB : Tide Data Base (Base de données nationale du niveau de la mer hébergée, gérée et entretenue par le SHOM)

TPE : Travaux Publics de l'Etat

ZH : zéro hydrographique ou zéro des cartes marines ou zéro des sondes

FICHE SYNTHÉTIQUE DE RENDU FINAL DE PROJET: RECONSTRUCTION DE LA SÉRIE HISTORIQUE DES HAUTEURS D'EAU OBSERVÉES À SAINT-NAZAIRE

Le projet relatif à la reconstruction et au contrôle de la série analogique des hauteurs d'eau observées à Saint-Nazaire, financé par le MEEM (convention SHOM/MEDDE n°2200681230 du 6 décembre 2012¹), la région Pays de Loire (note n° 839 région Pays de La Loire /NP du 28/09/2015 – attribution d'une participation financière) et par le SHOM, a débuté le 19 août 2013. Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme international GLOSS (Global Sea Level Observing System) de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO² et du SOERE – SO SONEL³. Elle a pour objectif de sauvegarder les observations historiques séculaires du niveau de la mer à Saint-Nazaire, et d'étudier les variations du niveau marin à plus ou moins long terme, ce qui constitue un enjeu sociétal actuel fort. Ce projet, d'une durée initiale de 2 ans, a été prolongé d'un an par avenant (Avenant n°1 de la convention n°2200681230 du 4 juin 2015), dans le but de permettre la fourniture d'un produit final de qualité et pouvoir réaliser une expertise scientifique des données. Cette fiche synthétise l'ensemble des travaux effectués et des résultats obtenus au cours de ces 3 années. Un rapport plus exhaustif détaille l'ensemble des travaux réalisés à la suite de cette fiche.

Le projet de reconstruction de la série historique des hauteurs d'eau observées à Saint-Nazaire se décompose en 4 actions principales : (1) recherche des données et d'archives documentaires, (2) numérisation et contrôle des données, (3) exploitation et analyse des résultats et (4) valorisation des résultats. Le tableau ci-après synthétise les jalons prévus initialement et le temps réellement passé sur chaque action :

Actions prévues		2013					2014					2015					2016									
		Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Bilan des données et recherche d'archives documentaires	1					★																				
Numérisation des données.	2																									
Contrôle et production de la série homogène	2																									
Exploitation/Analyse	3																									
Valorisation	4																									

T0 : Début du projet
T0+12 mois : Mi-projet initialement prévue
T0+24 mois : Fin de projet initialement prévue

Nota : Les étoiles bleues et rouges correspondent respectivement aux jalons prévus initialement et actualisés. Les mois en bleu représentent le temps passé.

Au cours des deux premières années, la totalité des principaux centres d'archives identifiés comme disposant potentiellement des documents en lien avec la mesure marégraphique à Saint-Nazaire a été consultée : les archives du SHOM à Brest, les archives du GPM-NSN à Nantes, les archives des SHD de Rochefort et de Vincennes, les archives départementales de Loire-Atlantique à

¹ Réf. SHOM : 88/2012 du 6 décembre 2012

² http://www.gloss-sealevel.org/news/documents/iho_cl48.pdf

³ <http://sonel.org>

Nantes et les archives municipales incluant les archives de l'écomusée de Saint-Nazaire (Action 1). Plusieurs types de documents complémentaires ont été (re)trouvés et consultés dans ces centres d'archives : certains correspondent à des mesures marégraphiques (registres de marée, marégrammes), alors que d'autres apportent plutôt des informations relatives à ces dites mesures (métadonnées). Ces métadonnées constituent une source d'informations essentielle pour connaître l'histoire de l'observatoire de marées de Saint-Nazaire, et ainsi augmenter la cohérence et la qualité de la série finale.

La totalité des documents marégraphiques permet de couvrir une période d'environ 195 ans (de 1821 à aujourd'hui) et de reconstruire au moins 125 ans de mesures continues du niveau marin à Saint-Nazaire. La collaboration du GPM-NSN a été grandement appréciée et a fortement aidé au bon déroulement de cette étude. Cette collaboration a notamment permis la mise à notre disposition de l'intégralité des marégrammes et métadonnées historiques relatifs à Saint-Nazaire disponibles dans leurs archives.

Une fois les données inventoriées et récupérées, la deuxième étape du travail a consisté à numériser ces données afin de les rendre disponibles au format numérique (Action 2).

L'ensemble des registres de marée inventoriés a été numérisé: ce sont **plus de 500.000 valeurs de hauteurs d'eau qui ont été numérisées manuellement, soit 59 ans de mesures selon un pas de temps horaire**. Les marégrammes ont nécessité d'être préalablement scannés avant l'extraction des mesures de hauteurs d'eau en fonction du temps. La difficulté de cette tâche résidait surtout dans l'état de conservation parfois mauvais des marégrammes et dans leurs dimensions. A l'exception des marégrammes récents (post-1980) dont les données existaient déjà au format numérique, l'ensemble des marégrammes papiers a été scanné, ce qui correspond à **plus de 1 km de documents scannés**. Une fois les marégrammes scannés, ils ont été digitalisés grâce au logiciel NUNIEAU (NUMérisation des Niveaux d'EAU) développé par le CETE Méditerranée (CEREMA, depuis 2014) dans le but d'extraire les données de hauteurs d'eau en fonction du temps. L'expérience a montré que l'automatisation de cette action était impossible et qu'environ deux semaines étaient nécessaires pour digitaliser une année de hauteurs d'eau (soit généralement 25 marégrammes de 15 courbes chacun). Dans le cadre de l'étude, l'ensemble des marégrammes définis comme prioritaires, car inédits (période 1932-1965), a été digitalisé grâce à Nunieau, ce qui correspond **au traitement d'environ 500 documents et à l'extraction de plus de 8000 courbes journalières de marée**. Du fait des difficultés rencontrées lors de la numérisation des documents papiers, la durée d'exécution de cette tâche s'est révélée être beaucoup plus longue que prévue initialement. Ainsi, 2 années ont été nécessaires pour mettre au format numérique ces données inédites du niveau marin.

A l'issue de la digitalisation de ces données, ces dernières doivent être validées. Cette étape a pour objectifs de rendre cohérente en temps (TU) et en hauteur (exprimée selon le zéro hydrographique défini en 1996) la série reconstruite (Fig. I) et de qualifier les mesures inédites en fonction de leur qualité. Pour cela, il a été nécessaire de prendre en considération l'ensemble des métadonnées relatives aux mesures de hauteurs d'eau disponibles et des procédures ont été adaptées ou développées pour permettre de détecter et corriger/supprimer les anomalies dans les mesures.

La qualification de ces données est une étape nécessaire avant toute analyse ultérieure (évolution du niveau de la mer, niveaux extrêmes...). Par manque de temps, seules les données inédites ont pu être validées dans le cadre de cette étude. Cette action a été réalisée grâce à l'utilisation de différentes méthodes (analyse des résidus en temps et en hauteurs des PM et BM, comparaisons

inter-série, utilisation des données de pression atmosphérique pour évaluer l'effet du baromètre inverse) associées à une inspection visuelle des données. Cela a permis d'identifier les périodes pour lesquelles les données étaient de mauvaise qualité (environ 16 % des données numérisées). Il a ainsi été possible de mettre en évidence que l'observatoire des marées de Saint-Nazaire était régulièrement soumis à un envasement de la base du puits de tranquillisation et d'identifier des périodes pour lesquelles les données étaient certainement mal calées (1935-1937). A partir de ces données validées, les niveaux moyens journaliers, mensuels et annuels ont pu être calculés (Fig. I).

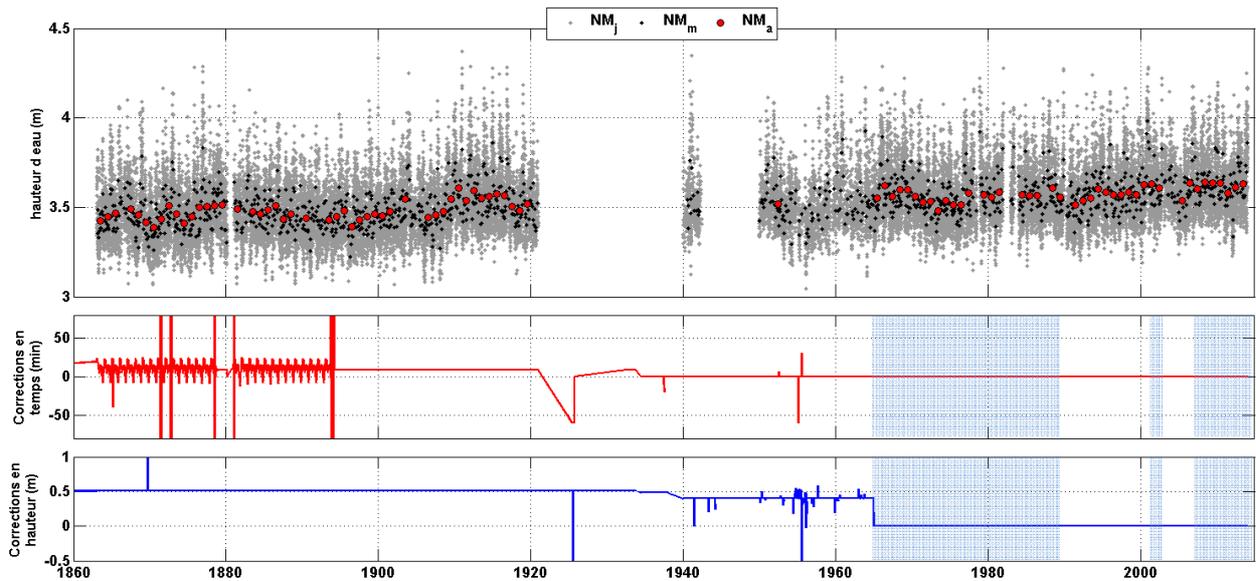


Fig. I : Calcul des niveaux moyens journaliers (NMj), mensuels (NMm) et annuels (NMa) à Saint-Nazaire à partir de la série marégraphique reconstruite qualifiée (haut) ; corrections temporelles (milieu) et en hauteurs (bas) appliquées pour rendre la série cohérente.

Les périodes indiquées en bleu correspondent aux données numériques censées être validées et n'ont pas fait l'objet de contrôle durant ce travail.

Le travail d'exploitation et d'analyse des données (Action 3) a été réalisé au cours de la dernière année du projet. L'essentiel des analyses effectuées sur les données avait pour but de vérifier la qualité des données et tenter de l'améliorer. Néanmoins, l'analyse de ce jeu de données inédit a permis d'étudier l'évolution séculaire des niveaux moyens mensuels validés à Saint-Nazaire (Fig. II). Le niveau moyen de Saint-Nazaire a augmenté à raison de $+1.03 \pm 0.05$ mm/an depuis 1863. Cette tendance est plus faible que celles observées par ailleurs sur la façade atlantique sur des périodes comparables : à Brest et au Pertuis d'Antioche, les tendances calculées entre 1860 et 2010 sont respectivement de $+1.32 \pm 0.07$ mm/an et $+1,38 \pm 0.07$ mm/an. Cette faible évolution de la tendance séculaire à Saint-Nazaire peut être réelle, mais peut également être due à des problèmes de calage vertical des données entre 1863 et 1920. Les métadonnées retrouvées à l'heure actuelle ne permettent pas d'être sûr que cette période n'est pas affectée par de type de problème. Il serait nécessaire d'effectuer des analyses complémentaires afin de s'en assurer car, bien que de nombreuses méthodes aient été utilisées pour tenter de fournir un produit le plus qualitatif possible, il est vraisemblable que la série finale puisse être encore plus perfectible.

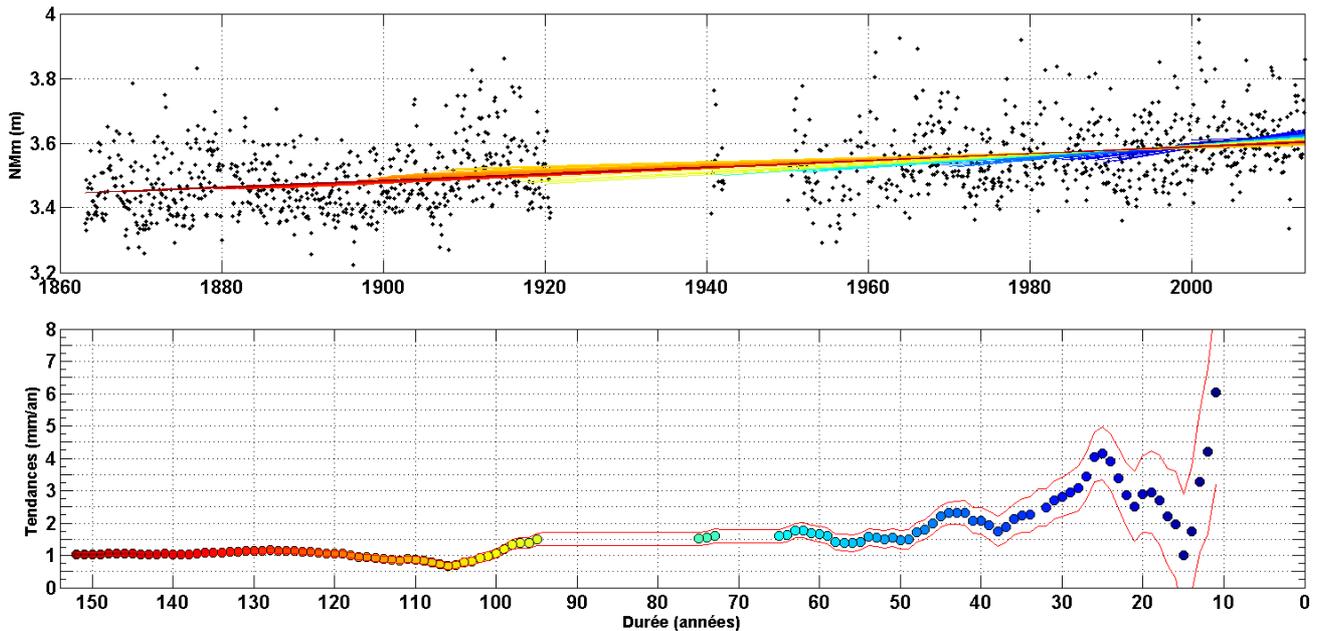


Fig. II : Evolution des niveaux moyens mensuels (NMm) calculés à partir de la série marégraphique historique validée de Saint-Nazaire (haut). Calcul des tendances linéaires et de l'erreur type associée (ligne rouge) en fonction de la durée d'observation(bas).

Les couleurs utilisées pour les tendances (droites de régressions en haut, et valeurs en bas) varient du bleu au rouge en fonction de la durée considérée pour effectuer les calculs (courtes et longues respectivement). Les tendances ont été calculées à partir de 2014.

Des analyses préliminaires montrent également une évolution des caractéristiques de la marée à Saint-Nazaire sur l'échelle de temps séculaire. Il a ainsi été possible de voir l'impact de la modification du puits de tranquillisation sur les caractéristiques des ondes de marée dominantes, mettant en évidence l'importance capitale des données contextuelles (métadonnées) pour comprendre les résultats obtenus. Le marnage moyen semble relativement stable à Saint-Nazaire depuis le 19^{ème} siècle, mais les marnages mensuels maximaux et minimaux tendent respectivement à augmenter et diminuer. Ceci pourrait être dû à l'anthropisation de l'estuaire et/ou aux modifications de l'observatoire des marées.

La participation à des colloques nationaux et internationaux constitue un moyen idéal pour présenter le projet et les résultats attendus, et cela permet de rencontrer des experts travaillant sur cette thématique afin d'échanger et établir les bases d'une potentielle future collaboration scientifique. Ainsi, dans le but de valoriser le projet et ses résultats associés (Action 4) le projet a été présenté plusieurs fois :

- Lors des journées REFMAR réunissant à Paris tous les acteurs s'intéressant au niveau de la mer, que ce soit d'un point de vue opérationnel ou scientifique (Y. Ferret, N. Pouvreau (2013). *Reconstruction et analyse des mesures de hauteurs d'eau observées à Saint-Nazaire. Poster, Journées REFMAR 2013 (17-21 juin) – Paris*)

- Lors du colloque G2 (Géodésie, Géophysique) réunissant à Rennes une communauté de chercheurs de la géophysique (Y. Ferret, N. Pouvreau, C. Daubord (2013). *Reconstruction et analyse des mesures de hauteurs d'eau observées à Saint-Nazaire depuis 1863. Présentation orale, colloque G2 (13-15 novembre) - Rennes.*)

- Dans le cadre de l'assemblée générale de l'Union Européenne des Géosciences (EGU) à Vienne en Autriche (Y. Ferret, G. Voineson, N. Pouvreau (2014). *Historical sea level data rescue to assess long-term sea level evolution: Saint-Nazaire Observatory (Loire Estuary, France) since 1821. Poster. European Geosciences Union (EGU) - General Assembly 2014 - 27 April - 2 May, Vienna, Austria.*)

- Dans le cadre de la rencontre des experts internationaux interagissant dans le programme GLOSS de la COI en octobre 2015 à Goa en Inde (Y. Ferret, V. Donato, N. Pouvreau (2015). *Historical sea level data rescue to assess long-term sea level evolution: Saint-Nazaire observatory (Loire estuary, France) since 1821. Présentation orale. Workshop. Indian Ocean Sea Level Science (19-23 octobre 2015) – NIO, Goa, India*)

- Lors des journées REFMAR 2016, à Paris du 2 au 5 février 2016 (Y. Ferret, V. Donato, N. Pouvreau (2016). *Sauvegarde et analyse des données historiques de hauteurs d'eau : exemple de la reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire depuis 1821. Présentation orale*)

- Soumission pour le colloque G2 (Géodésie, Géophysique), à Brest du 14 au 16 novembre 2016 (Y. Ferret, V. Donato, N. Pouvreau (2016). *Sauvegarde et analyse des données historiques de hauteurs d'eau : exemple de la reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire depuis 1821. Présentation orale. Colloque G2 (14-16 novembre 2016) – Brest*)

Une page internet présentant le projet a été ouverte sur le site REFMAR⁴. Cette page a été mise régulièrement à jour afin de suivre l'avancement du projet et d'accéder aux différentes présentations réalisées dans le cadre de cette étude. Elle permet également au plus grand public de s'informer et d'améliorer ses connaissances sur la thématique de l'observation du niveau marin et son évolution, par l'intermédiaire des pages internet REFMAR.

⁴ http://refmar.shom.fr/fr/applications_maregraphiques/programmes-projets/construction-analyse-series-coherentes-niveau-mer/port-de-saint-nazaire

RAPPORT FINAL DÉTAILLÉ

I. Introduction

I.1. Contexte général

L'étude du changement climatique global et son influence sur les variations du niveau marin à plus ou moins long terme constitue un enjeu sociétal fort (IPCC, 2013). Depuis les années 1990, les données altimétriques satellitaires permettent d'avoir une vision globale de ces changements et rendent compte de l'inhomogénéité spatiale des variations du niveau marin. Les technologies embarquées pour réaliser ces études ne cessent de s'améliorer et permettent des observations de plus en plus précises, à raison d'une observation tous les 10 jours environ. Néanmoins, il est toujours nécessaire de valider ces mesures avec des mesures ponctuelles : les marégraphes côtiers. L'utilisation de ces appareils est d'autant plus essentielle que les produits satellitaires ont tendance à être peu précis près des côtes.

Bien que les mesures effectuées à l'aide de marégraphes puissent être influencées par des phénomènes locaux à régionaux (affaissement d'un quai, subsidence, rebond postglaciaire, ...), ce sont pratiquement les seules données du niveau marin historiques disponibles depuis des décennies voir des siècles. Il est admis qu'au moins 60 ans d'enregistrement sont raisonnables pour estimer les variations eustatiques actuelles et filtrer les contributions cycliques et irrégulières du signal marégraphique (Douglas, 1991), d'où la nécessité d'avoir des séries temporelles de hauteur d'eau les plus longues possibles.

Dès le milieu du 19^{ème} siècle, les hauteurs d'eau sont mesurées de manière systématique et continue en de nombreux sites le long des côtes françaises grâce à l'utilisation de marégraphes. Le patrimoine marégraphique français est conséquent, mais un état des lieux des données historiques du niveau marin met en évidence le fait que la majorité de ces mesures sont encore sous forme papier et n'est donc pas exploitée. Les longues séries historiques de hauteurs d'eau restent rares : actuellement en France, les seules séries d'une durée supérieure à cent ans disponibles au format numérique sont celles de Brest, Marseille et du Pertuis d'Antioche. Dans ce contexte, un important travail de « *Data rescue* », ou sauvetage des données historiques, est entrepris au SHOM afin d'inventorier et de sauvegarder les nombreuses données historiques encore au format papier (projets SCANARCH et ARCHIPEL⁵). Ces projets ont pour objectif à terme de pérenniser l'ensemble des documents historiques conservé dans ses archives afin de permettre l'amélioration de la connaissance des évolutions historiques du littoral (évolution du trait de côte, des fonds marins, du niveau moyen de la mer, ...). Dans ce cadre, un important travail d'inventaire des documents marégraphiques a été initié au SHOM, ce qui a permis de confirmer l'incroyable potentiel de ces archives pour l'évaluation des tendances séculaires du niveau marin (Figure 1). Ce travail d'inventaire est une étape préliminaire essentielle au travail de reconstruction de série marégraphique historique. Une fois les données identifiées, un long mais nécessaire travail de numérisation doit être réalisé pour rendre ces mesures exploitables et valorisables.

L'exemple de la reconstruction de la série historique de hauteurs d'eau mesurées à Saint-Nazaire est présenté dans ce rapport.

⁵<http://www.shom.fr/le-shom/actualites/les-communicues/actualite-detaillee/article/ouverture-du-patrimoine-cartographique-du-shom/>

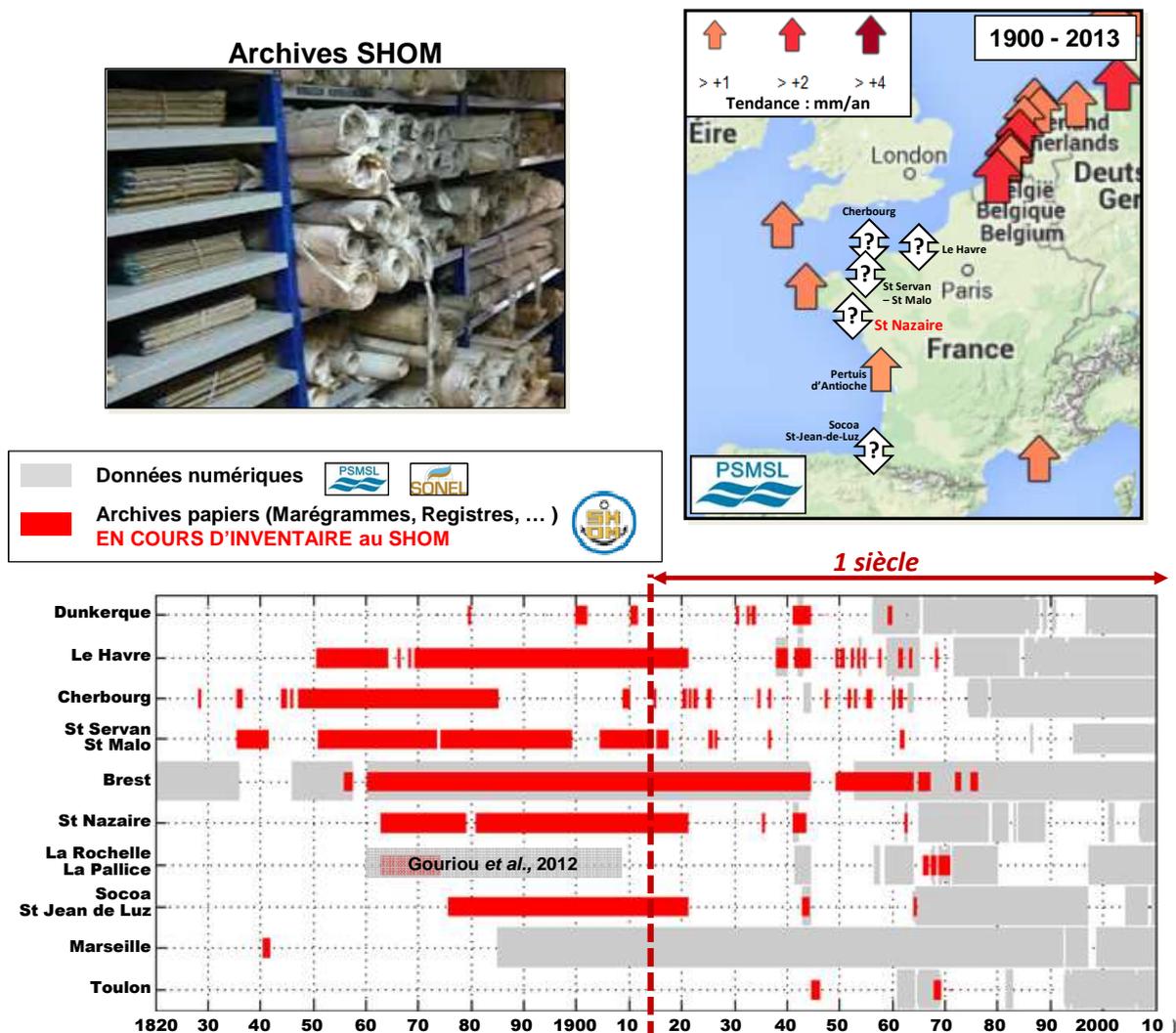


Figure 1: Inventaires des séries de hauteurs d'eau historiques disponibles en France en format numérique (sources SONEL, PSMSL, ...) et illustration du potentiel des archives papiers du SHOM pour l'évaluation des tendances séculaires du niveau marin.

1.2. Présentation du Projet

Le projet relatif à la reconstruction et au contrôle de la série analogique des hauteurs d'eau observées à Saint-Nazaire, financé par le MEEM⁶, la Région Pays de Loire⁷ et par le SHOM, a débuté le 19 août 2013. Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme international GLOSS (Global Sea Level Observing System) de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO. Elle a pour objectif de sauvegarder les observations historiques séculaires du niveau de la mer à Saint-Nazaire, et d'étudier les variations du niveau marin à plus ou moins long terme, ce qui constitue un enjeu sociétal actuel fort. Ce projet, d'une durée initiale de 2 ans, a été prolongé d'un an⁸, dans le but de permettre la fourniture d'un produit final de qualité et de pouvoir réaliser une expertise scientifique des données.

⁶ Convention SHOM/MEDDE n°2200681230 du 6 décembre 2012

⁷ Note n° 839 Région Pays de La Loire /NP du 28/09/2015 – Attribution d'une participation financière

⁸ Avenant n°1 de la convention n°2200681230

Si l'objectif principal de ce projet est de pérenniser l'ensemble des mesures du niveau marin réalisées à Saint-Nazaire depuis le 19^{ème} siècle et ainsi constituer une chronique cohérente de qualité, sa réalisation devrait entre autres permettre :

- d'appréhender l'évolution des composantes du niveau marin observées et l'éventuelle influence locale de la Loire et/ou des modifications anthropiques ;
- d'améliorer la connaissance de l'évolution du niveau marin sur le littoral atlantique français, puis d'intercomparer les résultats avec d'autres séries pluriséculaires du niveau de la mer du littoral européen et mondial ;
- d'apporter des éléments primordiaux pour l'étude séculaire des niveaux extrêmes et permettre l'amélioration des statistiques dans le cadre de mise en place des Plans de prévention des risques littoraux (PPRL) et/ou du risque inondation (PPRI) par exemple.

II. Généralités sur l'Observation du niveau marin

II.1. Instrumentation marégraphique

La variation du niveau marin est une grandeur observée depuis déjà plusieurs siècles, et les méthodes d'observation n'ont cessé de se diversifier et de s'améliorer depuis lors. Dans cette partie, les principales méthodes (et instruments associés) utilisées pour mesurer le niveau de la mer vont être brièvement présentées. Pour plus de détails, il faudra se référer par exemple à la thèse de N. Pouvreau (2008) dans laquelle est rappelé de façon relativement exhaustive l'histoire de la marégraphie.

II.1.1. Méthodes de mesures

Les plus anciennes données marégraphiques ont été obtenues grâce à la lecture diurne du niveau marin sur une **échelle de marée** (Figure 2-A). Ce système de mesure, bien que très simple, est toujours utilisé de nos jours car il est un des seuls permettant d'obtenir une lecture directe de la hauteur d'eau. Il correspond simplement à une perche verticale graduée, dont l'altitude du zéro est connue et souvent attaché au zéro hydrographique (ZH) de la zone. La précision d'une telle mesure va dépendre de l'état de mer, mais il est généralement admis qu'elle est de l'ordre de +/- 2.5 cm.

A partir du milieu du 19^{ème} siècle, l'invention du **marégraphe mécanique à flotteur** permet l'observation automatique et en continu du niveau marin. Le fonctionnement de ce type d'appareil est relativement simple (Figure 2-B) : un flotteur, disposé à la surface de l'eau dans un puits de tranquillisation est connecté à un enregistreur par l'intermédiaire d'un jeu de fils, poulies et contrepoids. Les variations du niveau marin sont transmises à un stylet et sont alors tracées sur une feuille, ou marégramme, enroulée sur un tambour enregistreur dont la rotation régulière est réglée par une horloge. Le puits de tranquillisation, qui a pour rôle d'atténuer les oscillations hautes-fréquences du niveau marin, est généralement surmonté d'un abri permettant de protéger le marégraphe des aléas météorologiques.

La précision des mesures va dépendre entre autres des dimensions du cylindre enregistreur. Plus ces dernières sont importantes, plus le rapport de réduction verticale est grande et donc meilleure est la précision. Par exemple, si l'on considère deux marégraphes dont les taux de réduction verticaux sont respectivement de 1/10 et 1/20, et que l'épaisseur du signal tracé sur le marégramme est de 1 mm, la précision des mesures sera alors de 1 cm pour le premier et de 2 cm pour le second.

Les marégraphes à flotteur, bien que peu sophistiqués, sont généralement fiables. Néanmoins, les données de hauteurs d'eau acquises par ce type d'appareil peuvent être affectées par des erreurs. Elles sont liées, par exemple, à un problème d'envasement du puits de tranquillisation, un mauvais calage (vertical ou horizontal) du marégramme lors de sa pose, à un retard/avance de l'horloge, à des variations de rotation du tambour liées aux défauts des engrenages d'entraînement, ... Malgré ces défauts, les mesures effectuées par les marégraphes à flotteur représentent la source presque exclusive des données historiques du niveau marin disponibles actuellement dans le monde (Simon, 2007). Aujourd'hui encore, leur utilisation est encore assez répandue à l'échelle mondiale.

Dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, les méthodes de mesures marégraphiques s'améliorent de façon importante : **les marégraphes** à sonde aérienne, de type acoustique d'abord, puis **radar**, sont développés et de plus en plus utilisés. Ces marégraphes permettent la mesure de la

distance entre le capteur et la surface de l'eau, ou tirant d'air, qui est par la suite convertie par la centrale d'acquisition en une hauteur d'eau référencée par rapport au ZH du port, le marégraphe étant en effet systématiquement rattaché par nivellement à l'observatoire de marée du port. Les hauteurs d'eau ne sont plus enregistrées sur des marégrammes papier mais directement en numérique, ce qui en facilite grandement leur exploitation et leur analyse.

Dans le cas des marégraphes acoustiques, le principe de mesure est basé sur la mesure du temps de parcours aller-retour d'une onde acoustique émise par un transducteur au-dessus de la surface de l'eau et réfléchi par cette dernière. Connaissant la vitesse de propagation de l'onde dans l'atmosphère, il est alors possible de convertir cette mesure de temps en distance. Ces marégraphes, utilisés au début des années 1990 en France, ont rapidement été abandonnés au profit des marégraphes radar, car ils étaient très sensibles aux variations de températures atmosphériques (modification de la célérité du son).

Les **marégraphes radar** (Figure 2-C) mesurent également un tirant d'air mais, à la différence des appareils ultrasoniques, en utilisant des ondes électromagnétiques qui sont insensibles sur de courtes distances aux conditions environnementales. Le principe de mesure est basé sur la réflexion du signal radar à l'interface air/eau, et en fonction du type de capteur utilisé, le tirant d'air est déduit du temps de trajet de l'onde, ou de la différence de fréquence entre l'émission et la réception du signal. La précision des mesures faites avec ce type d'appareil est communément admise comme étant millimétrique à pluri-millimétriques.

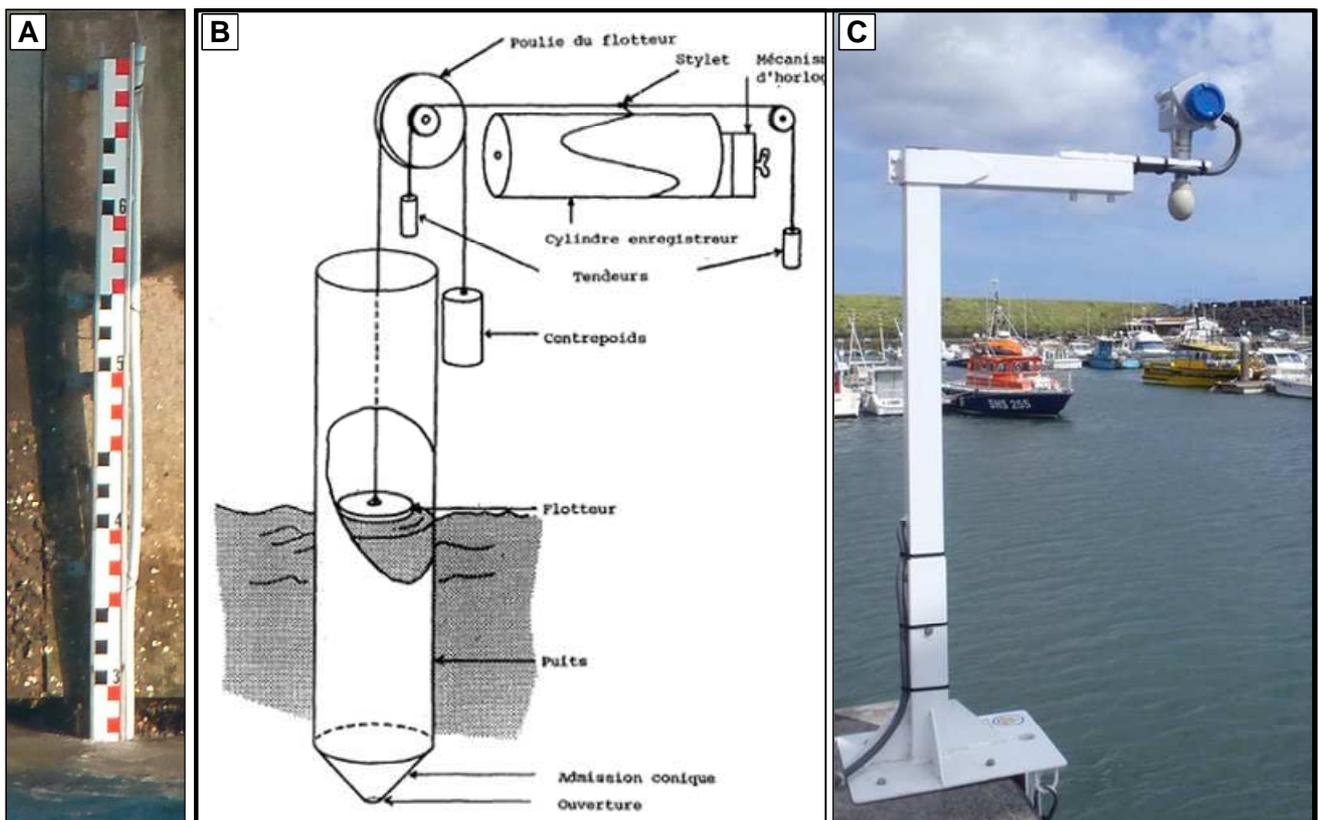


Figure 2 : Exemples de méthodes de mesures du niveau marin.

A. Exemple d'échelle de marée. Les carrés de couleur rouge ou noire ont 10 cm de côté (SHOM) ; B. Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un marégraphe à flotteur (UNESCO, 1985) ; Exemple de marégraphe radar (marégraphe RONIM de la Réunion, SHOM).

Le niveau marin est également appréhendé depuis 1992 grâce à l'utilisation d'**altimètres radar embarqués sur des satellites** (Topex/Poseidon, JASON 1, 2, 3, SARAL/AltiKa). Le principe de mesure de ces appareils est le même que pour les marégraphes radars côtiers et se base sur la mesure du temps de parcours vertical aller-retour de l'impulsion électromagnétique émise par le radar embarqué et réfléchi par la mer. Néanmoins, la grande distance parcourue par cette onde, de l'ordre de 2000 km, dans un environnement qui n'est pas homogène nécessite le calcul et l'application de nombreuses corrections pour pouvoir finalement accéder au niveau des mers. La couverture quasi globale de ces altimètres radar satellitaires a permis de cartographier la variabilité régionale des vitesses de variation du niveau de l'océan et ainsi d'accéder à une vision spatialisée de l'évolution du niveau marin. La résolution de ce type de mesure n'a cessé de s'améliorer avec le temps, et on estime qu'aujourd'hui la résolution verticale est sub-centimétrique.

II.1.1.1 Le réseau marégraphique historique du Service Hydrographique

L'ingénieur hydrographe Chazallon a mis au point en France dès 1840 le premier marégraphe à flotteur opérationnel capable d'effectuer des mesures de longues durées (Pouvreau, 2008). Sous l'impulsion de cet ingénieur, et porté par un intérêt grandissant pour la marée et son étude, le Service Hydrographique a alors commencé à développer un réseau marégraphique le long des côtes françaises : le premier marégraphe est installé de façon permanente à Toulon en 1844. Dès lors, le réseau n'a cessé de croître et lors de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, le réseau géré par le SH est relativement dense sur la côte atlantique (Figure 3), la côte méditerranéenne étant vierge de marégraphe permanent depuis 1861 (marégraphe de Toulon démonté à cette période).

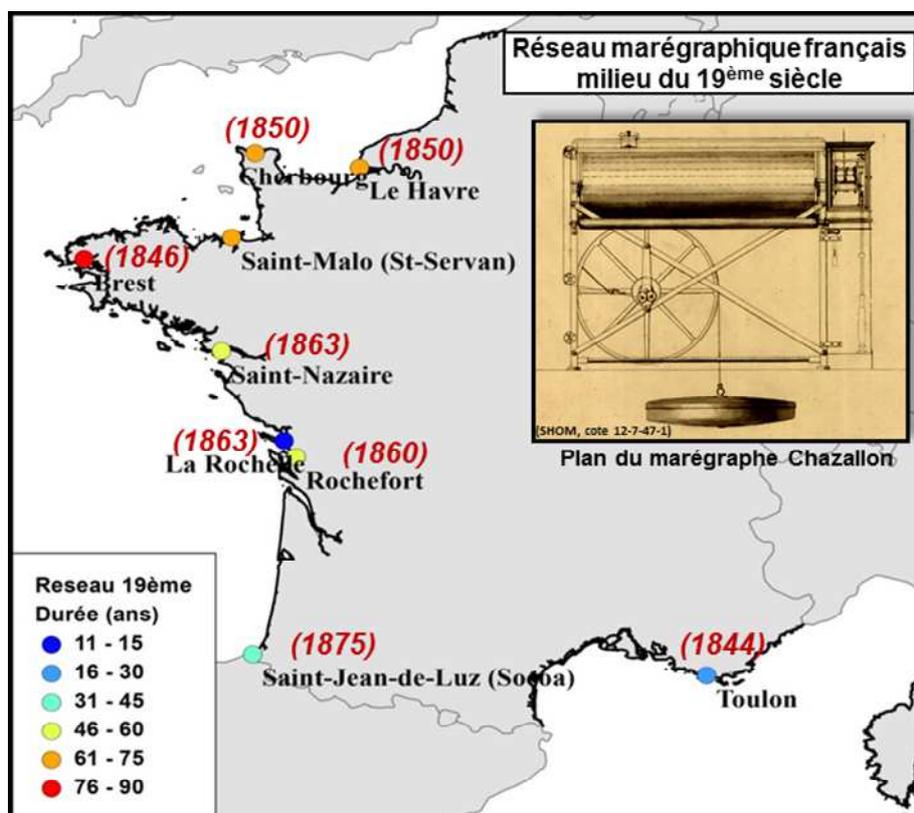


Figure 3: Réseau de marégraphes historiques géré par le Service Hydrographique (d'après Pouvreau, 2008).

Ce réseau est bien entretenu par le SH et les observations continues du niveau de la mer en différents sites le long des côtes françaises perdurent jusqu'en 1920. Au cours de cette année, l'étude

de la marée tombe en désuétude et le SH se décharge de nombreux marégraphes, à l'exception de celui de Brest.

II.1.1.2 Le réseau marégraphique actuel du SHOM : RONIM

Le SHOM, descendant du SH, a entre autres pour mission de calculer et fournir la prédiction de marée (annuaires de marées), et de réaliser des cartes marines pour lesquelles les sondes bathymétriques sont réduites de la marée. De ce fait, cette institution a continué à étudier la marée au cours du 20^{ème} siècle, mais en se basant, en fonction des besoins, sur 1) les mesures de hauteurs d'eau toujours effectuées à Brest, 2) les mesures historiques provenant du réseau du SH, ou 3) des mesures ponctuelles réalisées pour les besoins hydrographiques. Ce n'est qu'au cours des années 1980 que l'observation de la marée connaît un réel regain d'intérêt, du fait de l'augmentation importante d'études scientifiques portant sur les changements climatiques globaux et leurs conséquences.

Depuis 1992, le SHOM dispose sur les côtes françaises d'un réseau de marégraphes côtier numériques (MCN) permanents. : le Réseau d'Observation du Niveau de la Mer RONIM (Figure 4). Chaque site marégraphique reçoit l'appui d'un ou plusieurs partenaires locaux. Au fil du temps, ce réseau s'est étoffé et est constitué aujourd'hui de 47 marégraphes : 38 déployés en métropole, 8 à l'outre-mer et 1 à Madagascar. Les MCN appartenant à ce réseau et déployés par le SHOM sont tous équipés de capteurs radar.

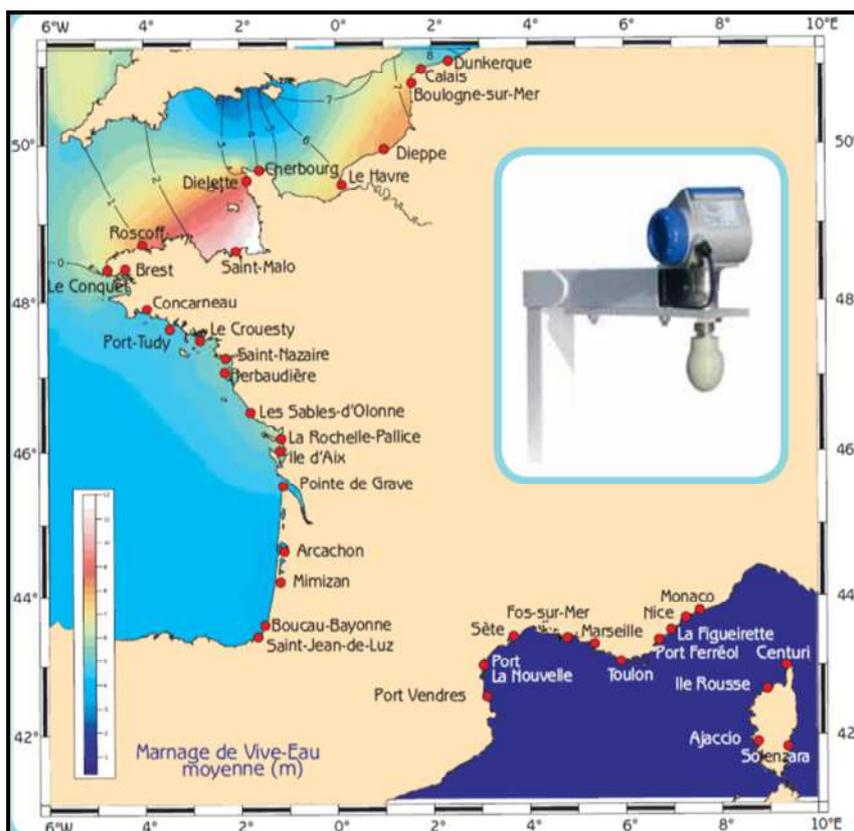


Figure 4 : Réseau actuel de marégraphes RONIM, opéré par le SHOM (Etat du réseau en 2015).

II.2. Valeurs caractéristiques et composantes de marée

II.2.1. Calcul des Niveaux moyens

Dans le but de pouvoir étudier l'évolution du niveau de la mer, il est nécessaire de filtrer les oscillations hautes fréquences de la hauteur d'eau : on parle alors de niveau moyen de la mer, qui est le résultat d'une opération sur les mesures de hauteurs tendant à éliminer au maximum la marée astronomique (Simon, 2007). Différents niveaux moyens peuvent être calculés en fonction du laps de temps considéré.

Le **Niveau Moyen journalier de la mer (NMj)** se calcule à partir des mesures de hauteurs d'eau horaires. La marée étant caractérisée par une période de 24,84 heures (jour lunaire), le NMj ne peut être calculé en réalisant une simple moyenne arithmétique des 24 hauteurs horaires observées sur un jour calendaire car des résidus des composantes de la marée subsisteraient. Pour s'affranchir de cela, il est donc nécessaire d'appliquer un filtre passe-bas. Plusieurs filtres de ce type existent et leur différence vient du nombre de hauteurs horaires considérées, réparties symétriquement autour de la hauteur centrale voulue, et des coefficients de pondération qui leur sont affectés dans le calcul du NMj. Dans cette étude, le filtre de Demerliac est le seul à avoir été utilisé comme c'est l'usage au SHOM depuis 1973 (Demerliac, 1973). Les résultats obtenus grâce à ce filtre sont quasiment identiques aux moyennes déterminés à l'aide d'autres filtres comme celui de Doodson par exemple. Le filtre de Demerliac moyenne les 35 hauteurs horaires m de part et d'autre de la hauteur souhaitée, soit 71 valeurs, qui sont pondérées par les coefficients donnés dans le Tableau 1. Le NMj est calculé à midi temps universel dès lors que la série de mesure ne comporte pas de lacune sur 3 jours consécutifs (la veille, le jour même et le lendemain, soit 72 heures). Le PSMSL recommande, lorsque la série comporte de petites lacunes, d'interpoler les valeurs manquantes avant le calcul du niveau moyen journalier.

Tableau 1 : Coefficients a_m utilisés pour le filtre de Demerliac. (Simon, 2007)

Filtre symétrique, donc $a_m = a_{-m}$; Somme des coefficients $(a_0 + 2.a_{1,35}) = 24576$.

m	0	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	32	33	34	35
24576a_m	768	766	762	752	738	726	704	678	658	624	586	558	512	465	435	392	351	325	288	253	231	200	171	153	128	105	91	72	55	45	32	21	15	8	3	1

Le **Niveau Moyen mensuel de la mer (NMm)** correspond à la moyenne arithmétique des moyennes journalières calculée sur un mois calendaire, dès lors qu'il contient plus de 15 NMj (critères du PSMSL). Ce nouveau filtrage permet d'atténuer les résidus des composantes de marée basses fréquences (durée supérieure à la journée) et de lisser l'influence des forçages météorologiques.

Le **Niveau Moyen annuel (NMa)** est calculé en effectuant une moyenne arithmétique des NMm, ceux-ci étant pondérés par le nombre de jours pour lesquels des NMj ont été calculés. Conformément aux critères du PSMSL, le NMa n'est calculé que pour les années caractérisées par au minimum 11 NMm sur les 12 possibles.

II.2.2. Les variations du niveau marin moyen à long terme

Les variations à long terme du niveau marin sont principalement d'origine climatique. Dans le but d'évaluer des tendances fiables, il est primordial d'analyser des séries marégraphiques les plus longues possibles afin de pouvoir filtrer les oscillations inter-décennales souvent liées aux régimes climatiques à large échelle (e.g. El Niño, la NAO,...). Selon Douglas (1991), un minimum de 60 ans de données est nécessaire pour effectuer ce type de calcul.

L'estimation des variations à l'échelle séculaire du niveau de la mer est issue d'un ajustement linéaire sur les niveaux moyens de la mer par la méthode des moindres carrés. Classiquement, pour être conforme aux critères définis par GLOSS, la tendance est calculée sur les niveaux moyens annuels dès lors qu'au moins 70% des NMa sont disponibles sur une période donnée. Néanmoins, les ajustements peuvent également être faits en se basant sur les NMm dès lors que le nombre de mois par an est suffisant pour représenter le cycle annuel (PSMSL). Les tendances calculées doivent être associées à leur erreur-type. Dans cette étude, l'erreur moyenne quadratique (RMSE : Root Mean Square Error) sera calculée pour chaque tendance estimée.

II.3. Prédiction de la marée

La marée astronomique peut être considérée comme la somme d'ondes élémentaires strictement périodiques (composantes harmoniques, définies par leur amplitude et leur phase) qui dépendent 1) de la trajectoire et l'inclinaison respectives de la Terre, de la Lune et du Soleil, et 2) de la bathymétrie de la région considérée. Il est alors possible de la prédire à n'importe quel moment dès lors que les principales composantes harmoniques de ce lieu sont précisément définies. Une observation préalable des hauteurs d'eau est donc une condition nécessaire pour une prédiction précise.

Le SHOM a développé et utilise le logiciel MAS pour traiter les données marégraphiques. Ce logiciel, non libre, permet le calcul des prédictions de marée à l'aide de la méthode harmonique. A partir d'observations de hauteurs d'eau, avec ou sans lacunes, le logiciel MAS calcule jusqu'à 143 des principales constantes harmoniques pour le site étudié. En se basant sur ces constantes les prédictions de marée peuvent être calculées. Une analyse harmonique peut s'effectuer à partir de 15 jours de données, mais il est admis qu'un an de mesures est un minimum pour déterminer les constantes de façon fiable, l'idéal étant de disposer d'au moins 19 ans de mesures pour avoir un cycle nodal lunaire complet. Depuis 1992, les annuaires de marée édités par le SHOM sont basés sur cette méthode harmonique. Les constantes harmoniques officielles du SHOM sont régulièrement mises à jour dans le but d'inclure dans l'analyse harmonique les observations marégraphiques nouvellement acquises.

Toutes les analyses harmoniques et les prédictions de marée ont été calculées grâce au logiciel MAS dans le cadre de cette étude. Bien que d'autres logiciels présentant des fonctionnalités similaires existent, Pouvreau (2008) et Gouriou (2012) ont démontré la robustesse et la qualité du logiciel MAS pour ce type d'étude.

II.4. Reconstruction de série historique de hauteurs d'eau : évolution des systèmes de mesures de temps et de hauteurs

La reconstruction d'une série marégraphique se décompose en 4 étapes principales : (1) recherche des données et d'archives documentaires, (2) numérisation et contrôle des données, (3)

exploitation et analyse des résultats et (4) valorisation des résultats. Le travail à réaliser au cours de ces différentes étapes sera présenté en détail dans la suite de cette étude.

Dans le cadre de cette reconstruction, il est important de garder à l'esprit que si des mesures systématiques de hauteurs d'eau sont réalisées dès le 19^{ème} siècle, les systèmes de mesures du temps et des hauteurs ont évolué au cours des temps historiques et il faudra donc prendre en considération ces évolutions.

Ainsi, le système temporel utilisé a évolué du Temps Solaire Vrai (TSV) au Temps Solaire Moyen du lieu (TSM), au GMT, TU, UTC. Le TSV est une mesure du temps basée sur le déplacement apparent du soleil au cours de la journée pour un endroit donné (angle horaire du Soleil), ce qui correspond donc aux heures que donnerait un cadran solaire. Ainsi, le jour solaire vrai est déterminé par le temps écoulé entre deux passages successifs du soleil au méridien d'un lieu déterminé. Le TSM est une mesure du temps basée sur un soleil moyen fictif qui se déplacerait sur l'équateur à vitesse constante (1 jour = 24h) tout au long de l'année. Le détail des corrections à appliquer pour convertir les données en TU sera donné par la suite (cf. §V.4.1)

Pour les mesures de hauteurs d'eau les plus anciennes, l'unité de mesure ne correspond pas au système métrique mais au système Pieds-Pouces (du Roi). Il faut donc convertir ces mesures selon le système métrique d'après la relation :

$$\mathbf{1\ Pied = 12\ pouces = 0.324839\ m.}$$

III. Recherche documentaire : documents nécessaires à la reconstruction

Dans ce type d'étude, la première étape primordiale consiste à rechercher et à inventorier les documents existant relatifs à l'observation du niveau marin. La difficulté réside dans le fait que ces documents historiques ont été disséminés au cours du temps et ne sont donc pas concentrés en un lieu unique. De plus, les inventaires des documents, lorsqu'ils existent, sont rarement consultables en ligne, et sont plus ou moins précis selon les centres d'archives. Par conséquent, il a été nécessaire de se rendre dans plusieurs centres d'archivage afin d'effectuer des recherches en consultant les documents potentiellement intéressants pour l'étude afin d'en connaître la teneur exacte.

Les principaux centres d'archives identifiés comme disposant de documents en lien avec la mesure marégraphique à Saint-Nazaire ont été consultés : les archives du SHOM à Brest, les archives du GPM-NSN à Nantes, les archives des SHD de Rochefort et de Vincennes, les archives départementales de Loire-Atlantique à Nantes et les archives municipales incluant les archives de l'écomusée de Saint-Nazaire (Figure 5).

Plusieurs types de documents complémentaires ont été trouvés et consultés dans ces centres d'archives : certains correspondent à des mesures marégraphiques, alors que d'autres apportent plutôt des informations relatives à ces dites mesures (métadonnées).



Figure 5: Localisation des archives relatives à l'Observatoire de marée de Saint-Nazaire.

III.1. Documents comportant des mesures historiques à Saint-Nazaire

III.1.1. Mesures du niveau marin à Saint-Nazaire

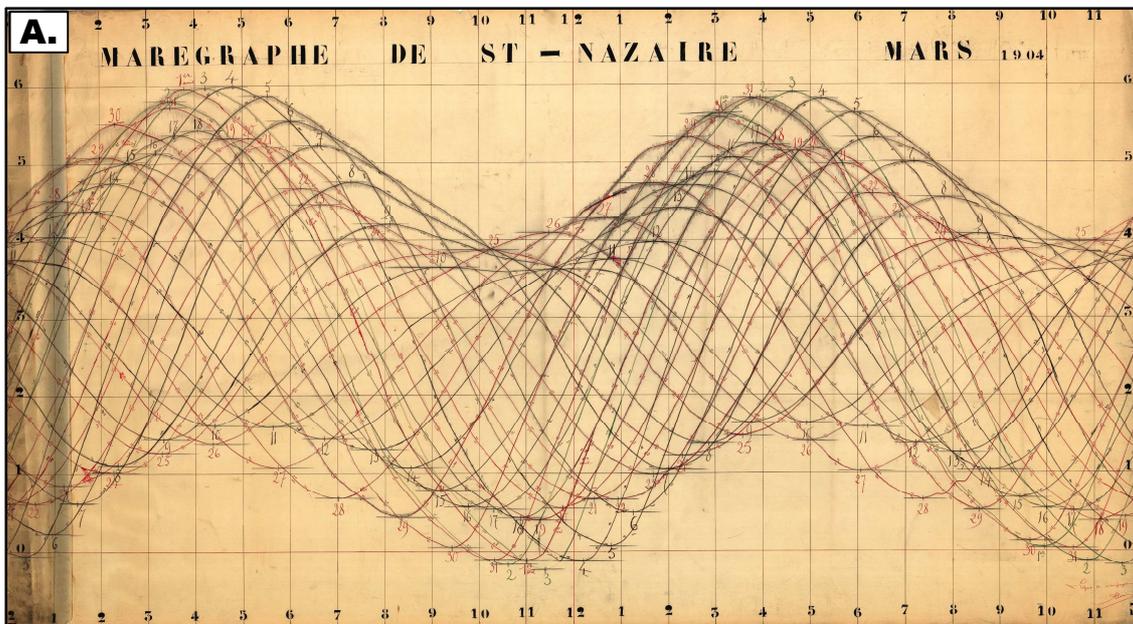
Ces documents comportant des mesures de hauteurs d'eau à Saint-Nazaire sont conservés pour la majeure partie aux archives du SHOM et aux archives du GPM-NSN, à l'exception des mesures les plus anciennes, datant de 1821 et qui ont été retrouvées au SHD de Rochefort.

Ces documents relatifs aux mesures de hauteurs se présentent sous différentes formes (exemples en Figure 6) :

- des marégrammes couvrant des périodes comprises généralement entre 2 semaines et 1 mois, dès lors qu'un marégraphe effectuait des mesures automatiques continues (depuis 1863 à Saint Nazaire) ;

- des registres de marée qui correspondent, soit à des observations de hauteurs d'eau relevées par l'opérateur sur une échelle de marée à un pas de temps régulier (10 à 15 minutes), soit à la retranscription manuscrite des hauteurs d'eau extraites des marégrammes à un pas de temps variant entre 15 minutes et 1 heure.

Ces documents étant pour certains vieux de plus d'un siècle et demi et n'ayant été que peu voire pas consultés au cours du temps, aucun inventaire exhaustif n'existait et leur stockage était plus ou moins organisé et structuré. A titre d'exemple, une semaine a été nécessaire pour rechercher et recenser les marégrammes relatifs à Saint-Nazaire aux archives du GPM-NSN : plus de 1200 marégrammes y ont été alors inventoriés, la plupart contenant des données inédites.



B. ANNÉE 1883.

MAREGRAPHE DE Saint-Nazaire Mois de Mai.

HAUTEURS DE LA MER A CHAQUE QUART D'HEURE (TEMPS VRAI), PRISES SUR LES COURBES DU MAREGRAPHE.

DATE.	MINUIT.				1 HEURE.				2 HEURES.				3 HEURES.				4 HEURES.				5 HEURES.			
	0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45
	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.
1 ^{re}	379	367	352	337	321	302	284	263	240	222	207	193	177	164	153	146	143	142	146	152	160	169	181	200
2.....	429	424	416	411	403	398	385	365	345	313	285	260	237	215	192	174	156	139	124	113	102	98	100	107
3.....	463	464	464	464	458	450	442	429	415	398	380	358	334	308	282	255	229	206	185	165	147	123	120	109
4.....	466	477	486	492	495	498	497	496	492	484	472	458	439	419	395	370	347	316	286	251	222	198	175	152
5.....	416	420	426	432	439	447	459	472	481	485	482	470	452	429	406	381	354	326	302	271	242	228	225	238
SOMMES.....	2153	2172	2178	2180	2168	2155	2127	2050	2023	1969	1854	1794	1708	1612	1513	1418	1326	1229	1143	1052	974	886	851	806
6.....	320	370	403	426	448	471	491	510	524	535	545	550	550	548	543	533	523	510	493	470	447	418	392	359
7.....	229	260	288	310	325	341	342	349	357	358	351	348	348	342	337	324	312	298	282	254	229	210	188	166
8.....	105	129	156	182	212	232	235	237	231	202	172	143	115	88	63	45	30	17	1	-13	-28	-58	-85	-93
9.....	24	41	73	104	139	177	217	256	295	336	374	406	435	460	483	501	519	535	547	555	558	557	554	550
10.....	53	86	125	169	216	264	312	354	389	421	461	500	533	576	607	633	654	674	690	705	718	728	733	734
SOMMES.....	751	856	1009	1131	1281	1445	1609	1760	1897	2022	2174	2289	2391	2470	2550	2629	2634	2655	2657	2641	2616	2571	2515	2442
11.....	90	79	62	57	49	46	54	71	93	116	143	170	205	235	272	305	335	362	387	407	424	441	454	464
12.....	189	172	154	140	128	115	106	101	100	102	113	129	151	172	198	226	253	281	311	338	362	383	401	414
13.....	268	248	221	203	183	167	152	139	127	119	114	112	113	118	129	144	162	185	206	232	257	282	308	328
14.....	348	333	316	300	280	262	239	220	206	188	174	165	157	150	145	144	146	152	164	173	187	203	220	239
15.....	374	371	364	356	344	333	321	307	293	275	255	235	219	205	191	179	168	162	158	151	146	148	160	172

Figure 6 : Exemples de documents anciens comportant des mesures marégraphiques à Saint-Nazaire.

A. Marégramme correspondant à l'enregistrement graphique du niveau de la mer en fonction du temps à Saint-Nazaire en Mars 1904 (Source SHOM) ; B. Extrait de registre de marée relatif au marégraphe de Saint-Nazaire où les hauteurs d'eau ont été extraites et retranscrites toutes les 15 minutes par l'observateur de marée en Mai 1883 (Source : SHOM).

Des ouvrages de synthèse ont également été identifiés dans les archives du SHOM : les journaux des marées. Ces documents correspondent à une compilation, sur une période de 2 ans, des journaux bi-mensuels de marées rédigés selon les instructions de l'ingénieur hydrographe Chazallon (cf. retranscription des instructions dans le § 5.3.4.3 de la thèse de N.Pouvreau, 2008) par les opérateurs du marégraphe de l'époque. Dans ces documents, les heures et hauteurs d'eau des PM et

BM sont renseignées, ainsi que la « vie de l'observatoire » (besoins divers de l'observateur pour mener à bien sa mission, cause des lacunes de mesures, dérèglement de l'horloge, ...). Des extraits de journal bi-mensuel des marées sont présentés en Figure 7.

— 4 —

ANNÉE 1897. MOIS DE *Janvier*

HEURES ET HAUTEURS DE LA PLEINE MER.

DATES.	MATIN.										SOIR.									
	AU MARÉGRAPHE.					A L'ÉCHELLE.			VENT.		AU MARÉGRAPHE.					A L'ÉCHELLE.			VENT.	
	HEURE.	HAU- TEUR.	CORREC- TION de la pression baromé- trique.	HAU- TEUR	HEURE.	HAU- TEUR.	AGI- TATION.	DIREC- TION.	FORCE.	HEURE.	HAU- TEUR.	CORREC- TION de la pression baromé- trique.	HAU- TEUR	HEURE.	HAU- TEUR.	AGI- TATION.	DIREC- TION.	FORCE.		
	T. M.	B. M.		T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. M.	B. M.		T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. V.		
h. m.	centim.	centim.	centim.	h. m.	centim.	centim.			h. m.	centim.	centim.	centim.	h. m.	centim.	centim.					
1 ^{re}	1.15	465	116	581				OSO	SB	2.22	456	118	574					SO	SB	
2 ^e	2.27	418	119	606				9L.	SB	3.25	475	117	592					SSB	SB	

— 6 —

ANNÉE 1897. MOIS DE *Janvier*

HEURES ET HAUTEURS DE LA BASSE MER.

DATES.	MATIN.										SOIR.									
	AU MARÉGRAPHE.					A L'ÉCHELLE.			VENT.		AU MARÉGRAPHE.					A L'ÉCHELLE.			VENT.	
	HEURE.	HAU- TEUR.	CORREC- TION de la pression baromé- trique.	HAU- TEUR	HEURE.	HAU- TEUR.	AGI- TATION.	DIREC- TION.	FORCE.	HEURE.	HAU- TEUR.	CORREC- TION de la pression baromé- trique.	HAU- TEUR	HEURE.	HAU- TEUR.	AGI- TATION.	DIREC- TION.	FORCE.		
	T. M.	B. M.		T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. M.	B. M.		T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. V.	T. V.		
h. m.	centim.	centim.	centim.	h. m.	centim.	centim.			h. m.	centim.	centim.	centim.	h. m.	centim.	centim.					
1 ^{re}	2.06	49	117	166				OSO	SB	3.37	45	118	163					0.	SB	
2 ^e	3.07	27	118	145				hno	SB	4.33	26	117	143					SB	SB	

Figure 7 : Extraits du journal des marées de 1897 - 1898 pour l'Observatoire de Saint-Nazaire (Archives SHOM)

III.1.2. Mesures météorologiques à Saint-Nazaire

Parallèlement aux mesures marégraphiques, des observations météorologiques sont également consignées dans les registres des marées. Ces dernières contiennent divers éléments tels que la pression atmosphérique, la température associée au baromètre, ainsi que la direction et l'intensité du vent de façon qualitative (selon échelle Beaufort). Les mesures de pression atmosphérique ont été réalisées quotidiennement par l'observateur des marées (mesures tri-horaires diurnes) qui lisait la pression sur le baromètre au mercure de type fortin (Figure 8). Ce baromètre, rendu transportable par Ernst, permet une précision dans les mesures de l'ordre du 10^{ème} de millimètre de mercure.

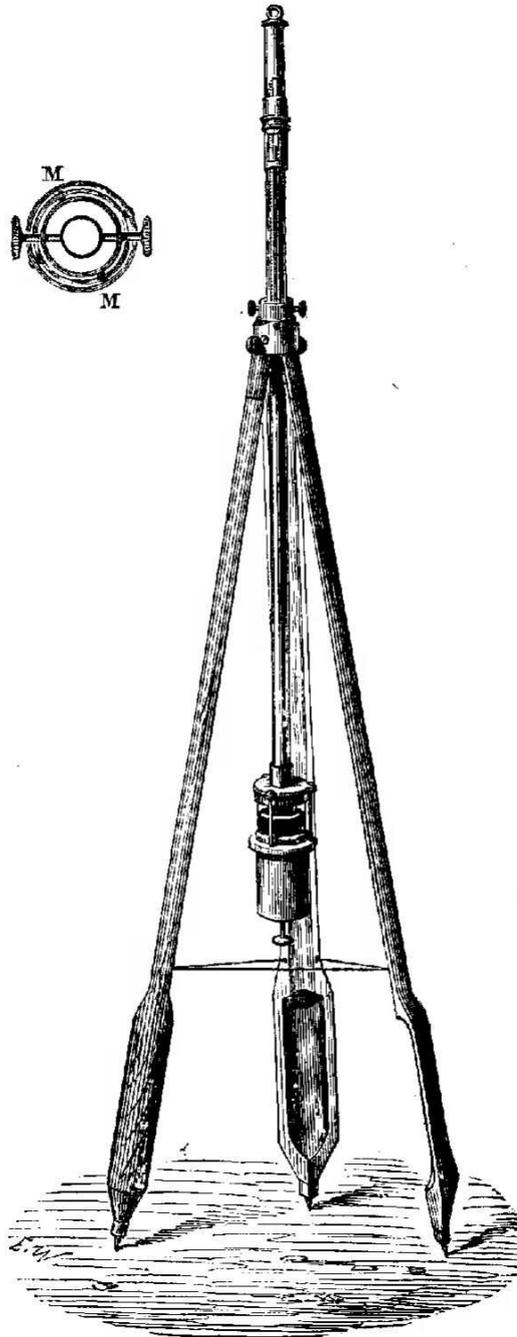


Figure 8 : Baromètre à mercure de type Fortin (Privat-Deschanel & Focillon, 1877)

III.2. Métadonnées

III.2.1. Informations relatives aux mesures marégraphiques

Ces documents sont essentiels pour comprendre et valider les mesures de hauteurs d'eau réalisées à Saint-Nazaire. Ils ont différentes formes et origines. Ces métadonnées peuvent être associées aux mesures (feuilles de contrôle, exemples en Figure 9), correspondre à des notes ou commentaires rédigés par les observateurs de l'époque, *etc.*

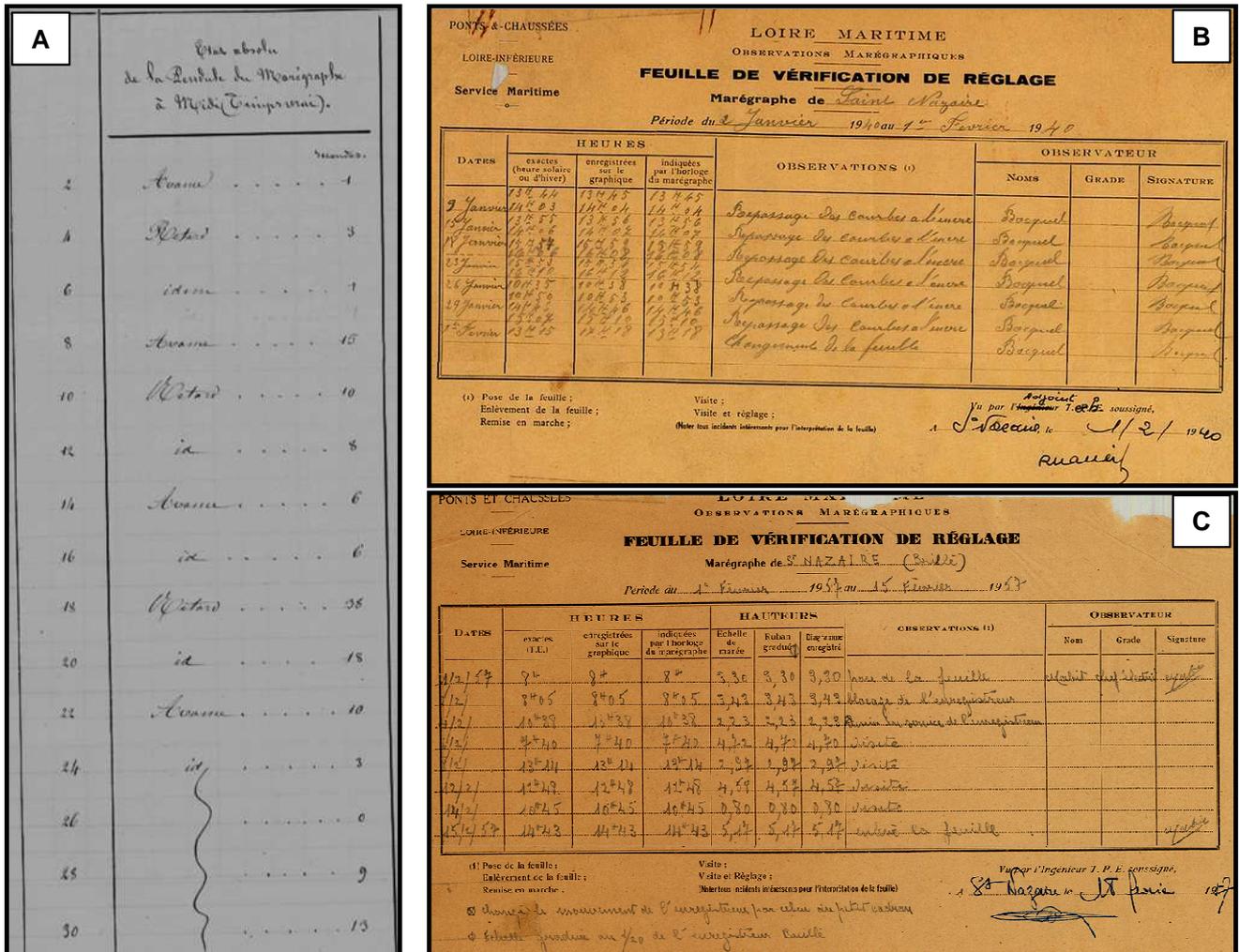


Figure 9 : Exemples de métadonnées associées aux mesures marégraphiques de Saint-Nazaire.
 A. Ecart absolu, en secondes, de la Pendule du marégraphe à midi TSV en juin 1875 (Journal des marées, Archives SHOM) ; B et C. Feuilles de vérifications de réglage du marégraphe de Saint-Nazaire, respectivement de janvier 1940 et de la 1^{ère} quinzaine de février 1957 (Archives du GPM-NSN).

Ces documents apportent de nombreux renseignements sur les mesures marégraphiques, tels que :

- le type d'appareil utilisé ;
- les niveaux de référence adoptés à l'époque (exemple tiré du journal bi-mensuel des marées de février 1865 : « Le zéro du marégraphe correspond toujours exactement à 8m35 au dessous de la surface supérieure de la tablette près de l'escalier au bout du môle. Le zéro des échelles des Ponts-et-Chaussées est à 8m62 au-dessous de cette même surface, par conséquent, il est 27 centim. plus bas que celui du marégraphe ou de l'annuaire des marées, encore Mr Leferme prétend qu'il est encore trop élevé, car il a vu des bafses mers descendre de quelques centimètres au-dessous. [...] Signé : Le professeur d'hydrographie Jourde ») ;
- le système horaire d'alors (exemple tiré du journal bi-mensuel des marées de janvier 1894 : « Suivant ordres reçus, la pendule du marégraphe de St-Nazaire a été mise à l'heure Temps Moyen du Lieu, le 1er janvier 1894 à midi. ») ;
- la qualité des mesures grâce à des comparaisons entre les hauteurs d'eau mesurées par le marégraphe et celles obtenues simultanément sur les échelles de marée (cf. Figure 9-C) ;

- les conditions de mesures (exemple tiré du journal bi-mensuel des marées de novembre 1894 : « *Remarque la courbe de la marée du 12 novembre soir atteignant 6m56 à son apogée. A cette date, de midi à 5h du soir, une violente tempête, ouragan même, s'est déchainé sur nos côtes de Bretagne. Le marégraphe de St-Nazaire, situé à l'extrémité du vieux Môle (dit la jetée), a été particulièrement éprouvé. L'intérieur du poste a été inondé, l'appareil submergé en partie, et les dégâts matériels assez considérables pour faire l'objet d'un rapport spécial remis par le soussigné à Monsieur le Commissaire de l'Inscription maritime de St-Nazaire. Les réparations seront faites en courant décembre et nécessiteront un arrêt complet de l'appareil pendant une dizaine de jours. L'agent du marégraphe, A.Evain. »* ») ;
- *etc.*

III.2.2. Documents relatifs à l'histoire de l'Observatoire marégraphique de Saint-Nazaire.

Une importante correspondance relative à l'observatoire des marées de Saint-Nazaire a pu être consultée dans les différents centres d'archives visités, en particulier dans les Archives départementales 44 et dans celle du SHD de Vincennes. Ces lettres, rapports, dépêches, ... permettent de resituer les mesures marégraphiques faites à Saint-Nazaire dans un cadre historique et géographique plus global. De plus, la découverte de cartes, de plans historiques, de croquis, *etc.* de l'observatoire permettent de visualiser, et vérifier parfois, les informations lues par ailleurs.

IV. Synthèse de l'analyse documentaire historique de l'observatoire de marée de Saint-Nazaire

La compilation et l'analyse de tous ces documents permettent de rendre la série marégraphique reconstruite cohérente au cours du temps en termes de références verticale et temporelle et d'estimer la précision des observations en fonction de la période d'acquisition (dépendant des appareils utilisés, des observateurs, ...). Ce travail s'est révélé ardu pour les périodes anciennes car les informations à considérer sont parfois incohérentes et il est donc primordial de revenir aux sources primaires et de multiplier les informations lorsque cela est possible.

Ce chapitre a pour but de réaliser une synthèse détaillée des recherches documentaires historiques réalisées dans les centres d'archives. La liste de l'ensemble des documents consultés en lien avec cette présente étude est fournie en Annexe.

IV.1. Histoire de la Loire Aval depuis le 19^{ème} siècle : aménagements et études.

IV.1.1. Bref historique du développement de la ville de Saint-Nazaire

Au début du 19^{ème} siècle, Saint-Nazaire n'est encore qu'un petit village localisé sur un promontoire rocheux situé à l'embouchure de la Loire et le port n'est encore qu'un havre. Au cours des temps historique, la ville de Saint-Nazaire ne va cesser de s'agrandir et de gagner du terrain sur la mer (Figure 10). Ces transformations sont dues à des aménagements poursuivis presque sans interruption entre 1827 et le début du 20^{ème} siècle (Vacher, 1908).

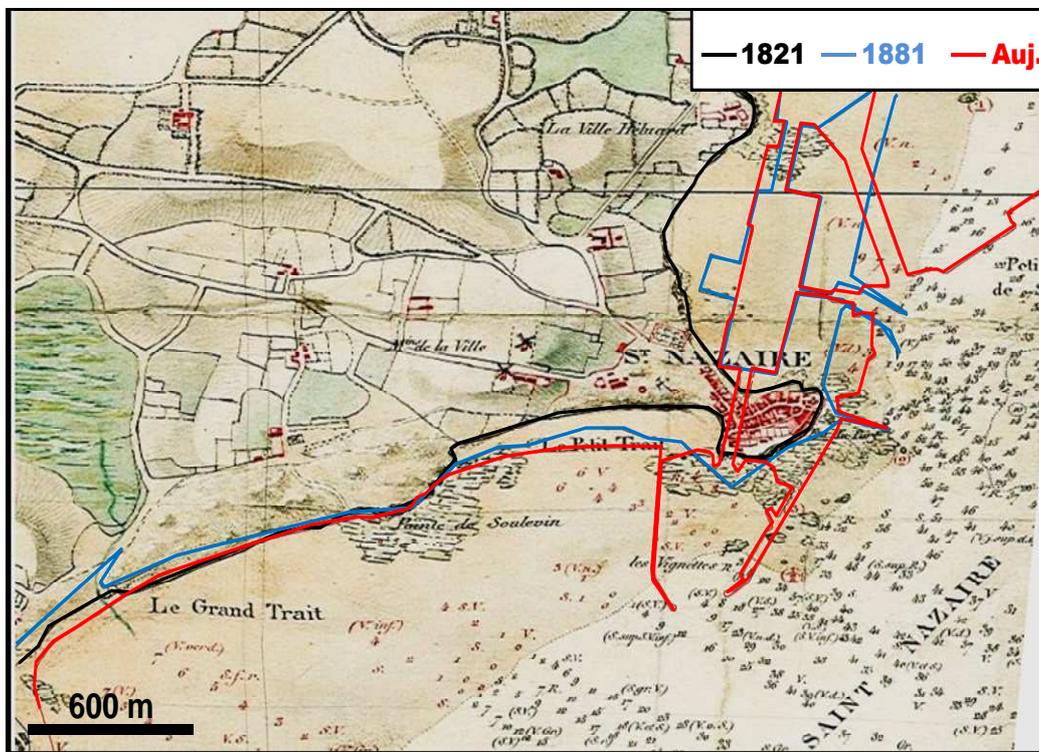


Figure 10 : Evolution du trait de côte à Saint-Nazaire depuis le 19^{ème} siècle.

Fond de carte : Extrait de la minute de la Loire réalisée par Beautemps-Beaupré en 1821 (Minute 12_2_15bis9, archives SHOM).

Dès le début du 19^{ème} siècle, une réflexion est menée quant à la construction d'un môle abri à Saint-Nazaire. Dans son rapport, daté du 26 novembre 1826⁹, relatif au projet de construction de cette jetée, l'ingénieur ordinaire des P&C note : « *Un mole à St Nazaire ! Un mole à St Nazaire ! tel est le cri qui se fait entendre depuis un temps immémorial vers l'embouchure de la Loire* ».

Les travaux de la jetée du Môle (Figure 11) ont commencé en 1827 et sont achevés en 1835.

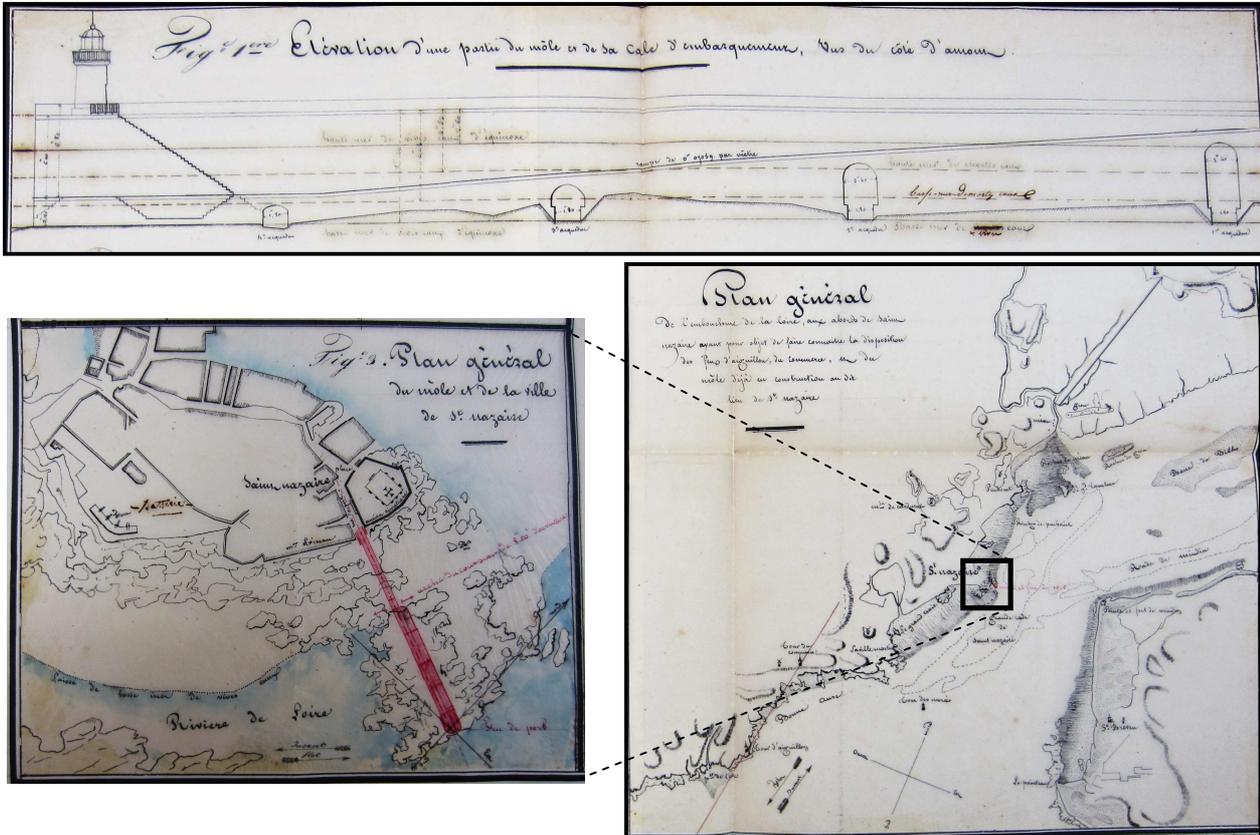


Figure 11 : Plans de situation et d'élévation de la jetée du Môle de Saint-Nazaire (Cote 4S321, liasse 3 ; AD44. 12 Septembre 1833).

Dans le but de pouvoir accueillir des navires de plus en plus gros, dès 1845 une loi décide de la création d'un bassin à flot à Saint-Nazaire. Les travaux débutent en 1848, et durent huit ans : le bassin à flot de Saint-Nazaire et le port d'échouage associé sont inaugurés en 1856 (localisation en Figure 12).

Assez rapidement après la création de ce premier bassin à flot, l'augmentation du trafic estuarien rend nécessaire la construction d'un second bassin : le bassin de Penhouët (Figure 12). Ce dernier, dont les travaux débutent au cours des années 1860, voit sa construction interrompue pendant quatre ans par la guerre de 1870 et n'est inauguré par le ministre des travaux publics et le ministre des Postes que le 8 mai 1881.

Les derniers grands travaux ayant pour effet de changer la physionomie du port de Saint-Nazaire ont lieu entre 1896 à 1907 afin de construire une nouvelle entrée du port dans l'axe du bassin, au sud de la ville (Figure 12). L'accès au bassin se faisait alors par une écluse.

⁹ Source : cote 4S 321, Liasse 1, Rapport du 12 novembre 1826 ; AD44.



Figure 12: Projet de création d'une nouvelle entrée dans l'axe du bassin de Saint-Nazaire (tracé rouge), 25 août 1893 (DD2-1848, SHD Vincennes).

Fond de carte : Plan de Saint-Nazaire dressé par l'architecte de la Ville, A. Pinguet, en 1888.

Au cours du 20^{ème} siècle, la poldérisation des rives nord de la Loire s'est poursuivie de manière importante du fait de l'augmentation des activités portuaires. Néanmoins, ces aménagements sont principalement localisés à l'amont de Saint-Nazaire (villes de Montoir, Donges, ...).

Parallèlement à cette extension des terres sur le fleuve, le lit de la Loire a également subi de nombreux aménagements dans le but de faciliter la navigation jusqu'à Nantes (Figure 13).

Ce n'est qu'à partir de 1750 que la Loire Maritime perd son caractère naturel avec les premiers travaux de digues et d'épis de l'Ingénieur de la Marine Magin. Jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, les aménagements ont surtout pour but de rétrécir le lit en aval direct de Nantes pour permettre aux courants de s'accélérer et d'approfondir le chenal : la partie du fleuve entre Nantes et la Martinière est alors nommée « Section endiguée » du fait des nombreux endiguements réalisés sur ces 15 km (Maquet, 1974. Localisation en Figure 13-A).

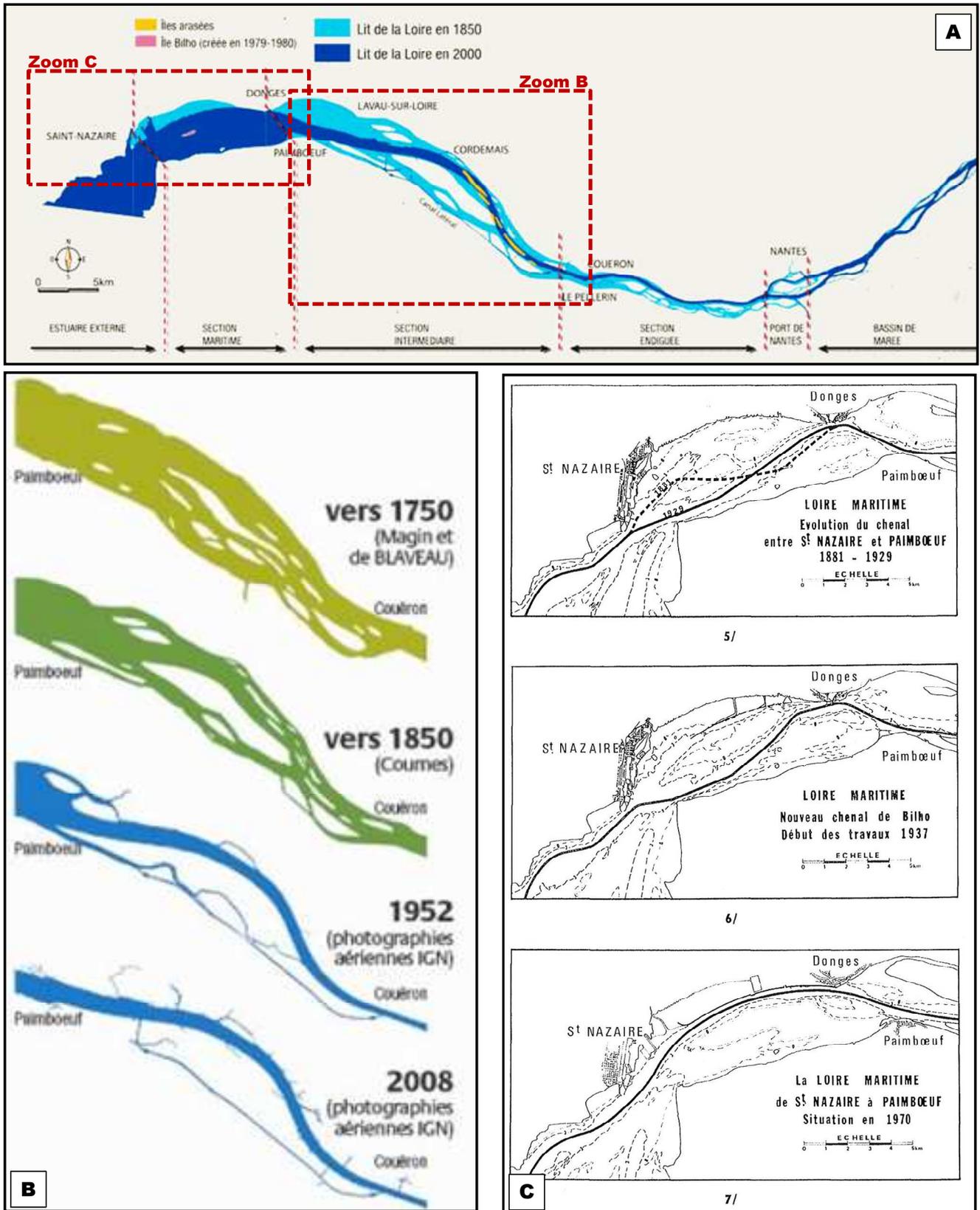


Figure 13 : Evolution historique de la Loire: impact des aménagements.

A : Situation générale en 1850 et en 2000 (GIP Loire Estuaire) ; B : Evolution de la géométrie de la Loire intermédiaire depuis 1750 (GIP Loire Estuaire¹⁰) ; C : Evolution du chenal de navigation entre 1881 et 1970 aux abords de Saint-Nazaire (Maquet, 1974).

¹⁰ http://www.loire-estuaire.org/accueil/un_territoire/histoire, consultation en juillet 2016.

Dans le but d'accueillir des navires devenant de plus en plus imposants, la géométrie de l'estuaire n'a cessé d'évoluer depuis la seconde moitié du 19^{ème} siècle, surtout en ce qui concerne la Loire intermédiaire (Figure 13-B).

Ainsi, la construction d'un canal latéral, ou « canal de la Martinière », est entreprise grâce à une intense activité de dragage : ces travaux débutent en 1882 et ce nouveau canal est inauguré en 1892. Dès 1900, les tirants d'eau caractérisant ce canal se révèlent être insuffisants et la fréquentation du canal cesse complètement vers 1910 (Maquet, 1974).

En 1903, les travaux d'amélioration du fleuve sont déclarés d'utilité publique, ce qui a pour conséquence la transformation complète de la section intermédiaire. Ce vaste projet d'aménagement a conduit à la mise en place d'un chenal au tracé rationnel, grâce à des travaux d'endiguements continus, des dragages des îles et du lit du fleuve (Figure 13-B). Cette doctrine (approfondissement et régularisation du chenal principal) induit l'ouverture de l'amont du fleuve aux influences de la marée.

En 1933, la Loire maritime est à son tour aménagée afin de stabiliser le chenal dans le nord de l'estuaire. Les travaux aboutissent à la création du chenal de Bilho en 1940 le long de la digue de rive nord (Figure 13-C). Ce dernier s'est depuis maintenu sans difficulté particulière pour l'entretien grâce l'action de la marée.

Au cours de la fin du 20^{ème} siècle, peu de travaux d'aménagement d'envergure sont entrepris en Loire : l'essentiel des travaux consistait à entretenir le chenal de navigation grâce à des dragages réguliers.

IV.1.2. Réseau marégraphique historique en Loire.

Si le Service Hydrographique de la Marine a décidé de mesurer en continu le niveau marin à Saint-Nazaire dès 1863, le service maritime des P&C a également installé des stations marégraphiques le long de la Loire depuis la fin du 19^{ème} siècle (Figure 14). La mise en place de ce réseau, qui n'a cessé de se densifier au fil du temps, avait pour but d'améliorer les connaissances de la « marée fluviale » et d'améliorer la navigation de la Loire.

Ainsi, les projets de construction des marégraphes du Pellerin et de Chantenay sont en discussion dès 1861 (cote 3S-899, Liasse 6 ;AD44). Ces derniers semblent avoir été installés dans les années 1860.

En 1887, le marégraphe de Paimboeuf est construit sur la rive sud de l'estuaire de la Loire. Dans une lettre datée du 12 juillet 1887, l'ingénieur de P&C confirme que « [...] les travaux de construction du marégraphe de Paimboeuf sont complètement terminés depuis le 15 janvier 1887. » (cote 4S-253 ;AD 44).

Une décision ministérielle datant du 29 Juillet 1908 approuve le « *Projet de création de trois nouvelles stations marégraphiques de la Basse-Loire* », à savoir les stations de l'île Maréchale, de la Basse-Indre et de l'île Sardine (Localisation en Figure 14). Les deux premières sont censées accueillir des marégraphes avec système à écoulement continu d'air comprimé alors que celle de l'île Sardine devrait abriter un marégraphe à flotteur (cote 3S-899, liasse 2 ; AD 44). La réception définitive de ces 3 stations marégraphiques est datée du 28 décembre 1910.

Dans les documents retrouvés relatifs à ces stations, lorsque les auteurs parlent de marégraphe, ils parlent régulièrement du local abritant l'appareil, et non de l'appareil enregistreur en lui-même. Ainsi, il est délicat de définir avec précision le début effectif des mesures en ces différents lieux.

Hormis la mise en place de ces appareils de mesures en continu, un Ingénieur des P&C rappelle, dans une note datée du 3 juillet 1908, que de nombreuses mesures de hauteurs d'eau ont été effectuées le

long de la Loire et qu'« Il existe 43 échelles de marées entre Nantes et la mer, mais à 7 seulement [...] des lectures des cotes de haute et basse mer sont faites quotidiennement» (cote 3S-899, liasse 2 ; AD 44).

Cette étude se focalisant sur les mesures marégraphiques réalisées à Saint-Nazaire, celles relatives aux autres stations en amont n'ont pas été recherchées.

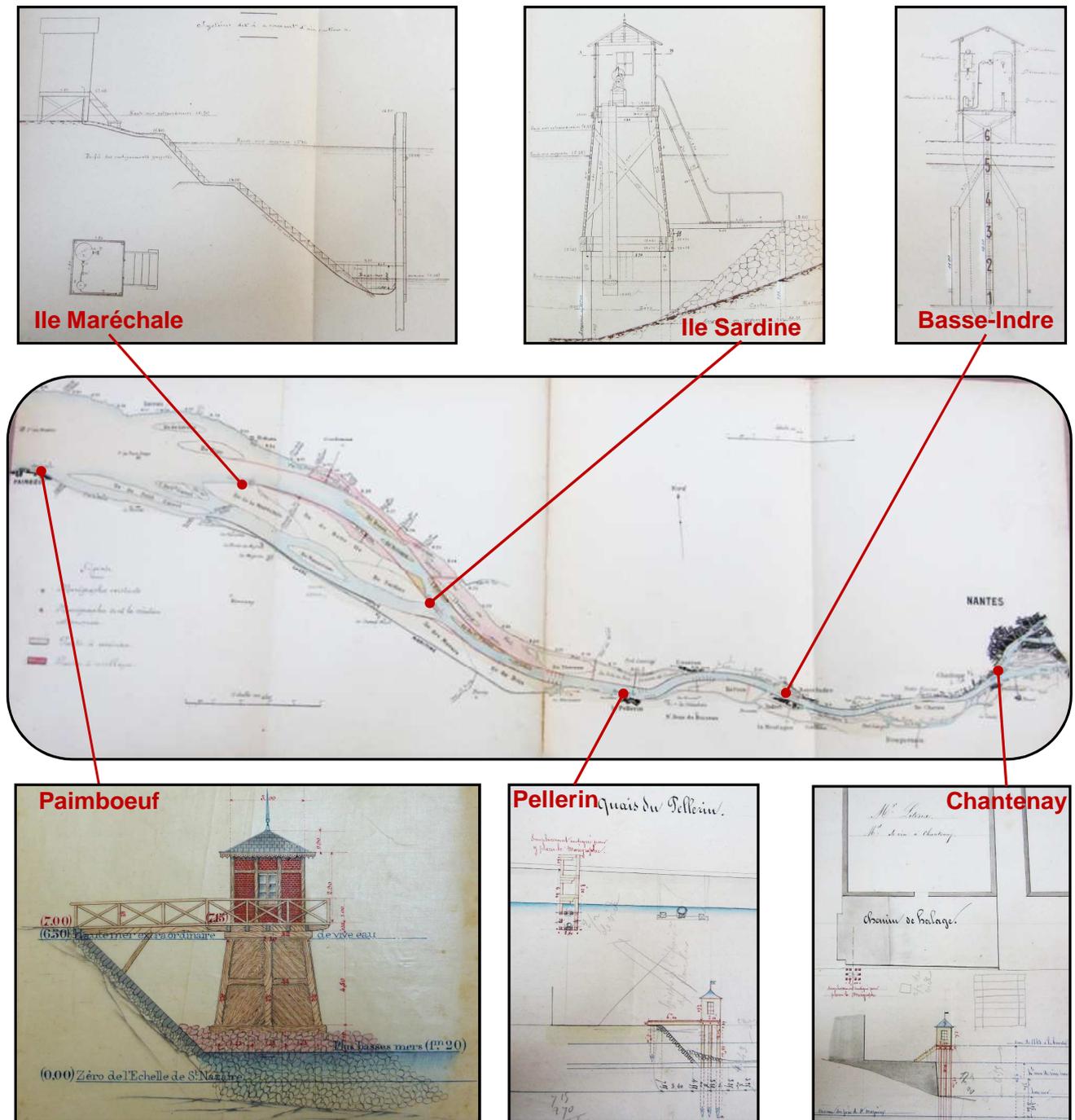


Figure 14 : Réseau marégraphique historique en Loire.

Documents provenant du centre des AD44. Source du plan de la Loire indiquant la position des marégraphes et dessins des marégraphes de l'Ile Maréchale, de Basse-Indre et de l'Ile Sardine : 3S-899, Liasse 2. (1908). Source des dessins des marégraphes du Pellerin et de Chantenay : 3S-899, Liasse 6. (1862). Source du dessin du marégraphe de Paimboeuf : 4S-253 (1886).

IV.2. Historique de l'observatoire de marée de Saint-Nazaire

IV.2.1. Etablissement du marégraphe (1860 – 1863)

L'installation d'un marégraphe dans le port de Saint-Nazaire est discutée dès 1860. Une correspondance assez riche concernant l'établissement du marégraphe est conservée aux AD44 (cote 4S 333, Liasse 1 ; AD44) :

Dans une dépêche ministérielle datée du **22 février 1860**, on apprend que le Ministre de la Marine, l'Amiral Hamelin, réfléchit au déplacement de « *quelques-uns des marégraphes appartenant à son département, notamment au Havre, à Toulon et Alger, et sur la convenance de les rapporter à la Rochelle, Nantes et Saint-Nazaire où l'observation exacte des marées pourraient présenter plus d'intérêt* » et a demandé son avis sur la question au Ministre de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux Publics en « *[le] priant de faire examiner par MM. les Ingénieurs les points où les instruments devraient être placés ainsi que la dépense qu'entraînerait leur installation.* ».

Dans sa réponse datée du **1^{er} mars 1860**, l'ingénieur en chef des P&C du Port de Saint-Nazaire précise qu'un marégraphe serait très utile au service des P&C et que, selon lui, une partie des dépenses liées à son installation pourrait être payée par le Ministère des travaux Publics. Il indique dans cette lettre que « *le marégraphe [...] pourrait être installé sans difficulté à l'extrémité du vieux môle [à Saint-Nazaire]. Le conduit serait fixé le long du parement et le bureau de l'employé contenant l'instrument serait construit entre le phare et le parapet.* ». Il estime les dépenses liées à une telle installation à 2500 francs.

Dans une lettre datée de ce même jour de l'ingénieur en chef, l'emplacement potentiel du marégraphe est encore plus détaillé : « *Les rochers au près du môle laissent entre eux un sillon où viendra déboucher l'aqueduc du conduisant au marégraphe. La tête seule de cet aqueduc présente des difficultés à cause de la profondeur où on doit la placer. On pourrait la construire conformément aux croquis ci-joints qui ne sont qu'une indication du travail à faire. [...] La tête ne devra être faite que 0,40 à 0,50 à partir du parement. Une « feuillure » de 0.05m sur 0.05m servirait pendant la construction pour fermer l'ouverture avec un panneau. On scellerait des pitons ou des crochets dans lesquels on passerait des barres qui serreraient le panneau. [...] Il résulte des instructions qui précèdent que la première chose à faire est de relever sur place la coupe suivante AB et d'examiner comment on pourrait installer le batardeau qui servirait pour la construction de l'aqueduc, la tête d'aqueduc.* »

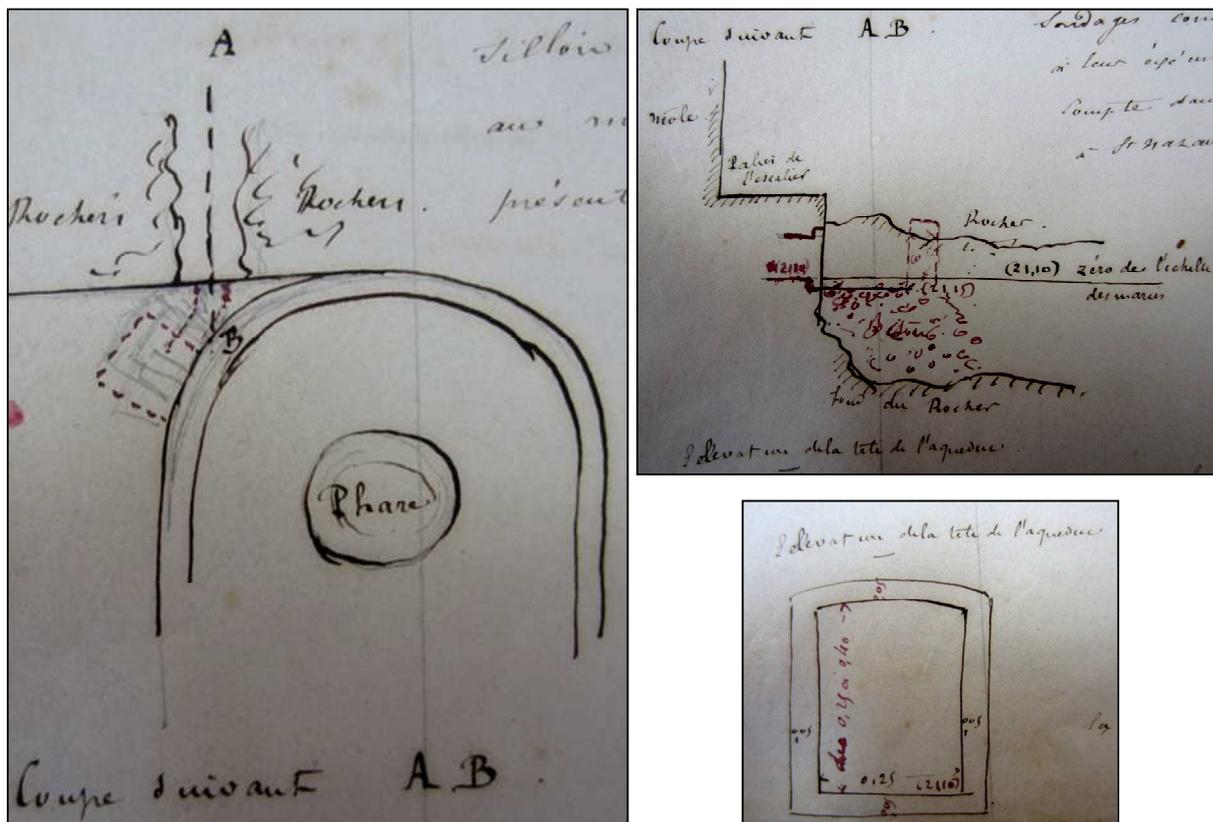


Figure 15 : Croquis de la proposition d'emplacement du marégraphe faite par l'ingénieur en chef de P&C de Saint-Nazaire. (Cote 4S 333, Liasse 1 ; AD44. 1^{er} mars 1860)

Grâce à une dépêche ministérielle du **5 mars 1861** adressée à l'ingénieur en chef des P&C, on apprend que le Ministre de la Marine a finalement décidé d'installer un marégraphe à Saint-Nazaire et qu'un Ingénieur hydrographe se rendra sur place afin d'en discuter sa localisation avec les ingénieurs de P&C. De plus, il est indiqué que les dépenses liées à l'établissement de ce marégraphe seront partagées entre les départements de la Marine, qui se charge de prendre à sa charge l'opération et l'entretien du marégraphe, et celui de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux Publics, qui prend à sa charge les travaux de construction de l'Observatoire des marées : *« il a été convenu entre M. le Ministre de la Marine et moi [Ministre de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux Publics] qu'afin des simplifier les écritures de comptabilité, le département des travaux publics prendra à sa charge tous les travaux de maçonnerie à exécuter pour l'installation des appareils, ainsi que l'entretien de ces travaux, et que la Marine poursuivra à la délivrance et à l'entretien du marégraphe et des instruments nécessaires aux observations, ainsi qu'au paiement de leurs solde : elle se chargera en outre, de donner aux Ingénieurs toutes les observations recueillies. »*

Dans plusieurs notes et lettres, il est fait mention d'une dépêche ministérielle datée du **21 mars 1861** qui semble officialiser l'établissement du marégraphe à Saint-Nazaire et définir les modalités de son installation. Cette dépêche n'a pas été retrouvée dans les archives, mais il est demandé, selon toute vraisemblance, de supprimer le marégraphe qui fonctionnait à Toulon pour être installé à St-Nazaire

Conformément à ce qui avait été décidé, l'ingénieur hydrographe Gaussin, responsable du service des marées, s'est rendu à Saint-Nazaire le 4 Mai 1861 pour discuter de l'installation du marégraphe. Il constate alors que le puits du marégraphe est déjà construit et qu'il ne reste qu'à installer le marégraphe. Dans sa note destinée aux services de la Marine, il donne une description précise des travaux réalisés (Figure 16) :

« Le puits du marégraphe est établi à l'extrémité du musoir de la jetée en pierre de St-Nazaire. Il est formé de pièces de bois de sapin, verticales appliquées contre un des côtés du musoir et fortement reliées par des bandes de fer à peu près dans le système de celui du Havre mais beaucoup mieux confectionné. Dans ce massif de sapin est le puits circulaire de 60 centimètres de diamètre descendant verticalement jusqu'aux assises inférieures de la jetée en bas de la cale, à 1 m environ au dessus de la basse mer, puis dans les assises de la cale et dans le rocher inférieur où il est maçonné en briques et ciment avec le même diamètre, il descend ainsi m'a-t-on assuré jusque 30 ou 40 centimètres au dessous du zéro de l'échelle de l'extrémité de la jetée, échelle placée depuis longtemps, qui m'a servi en 1850 et dont j'ai établi le zéro dans mon rapport à la fin de la campagne [document non identifié]. A 10 centimètres environ au dessus du fond du puits est une conduite horizontale de 30 centimètres de large sur 60 de hauteur établie dans la maçonnerie inférieure de la cale, du côté du large cette conduite est fermée par une pierre taillée parée d'un trou de cinq centimètres seulement de diamètre. Ce trou seroit situé au dessous du zéro des plus basses mers, et plus élevé mais en avant il existerait encore des roches. Pour les fissures desquelles la mer arriverait encore à l'extrémité du conduit, on se propose aux premières grandes marées d'établir dans ces roches une rigole directe au fond du conduit, et de détruire les restes du batardeau fait pour creuser le puits dans la roche.

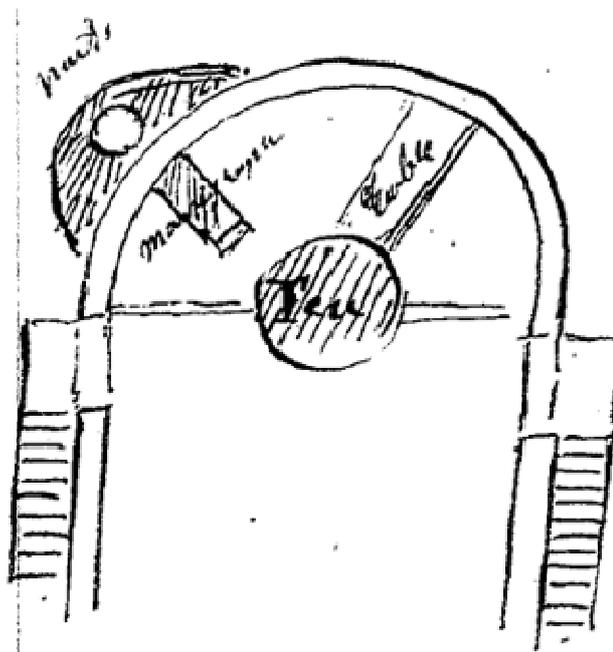


Figure 16: Croquis de l'emplacement du puits du marégraphe à l'extrémité du Vieux môle de St-Nazaire et proposition d'organisation de l'observatoire des marées. (Gaussin, 1861).

Ce puits de bois formé de toutes pièces bien ajustées s'élève ainsi jusqu'au niveau du parapet de l'extrémité de la jetée à environ 80 centimètres au dessus de la plate-forme du musoir.

Entre le parapet et la tour concentrique du feu il y a une distance d'environ 2m60. C'est dans une portion de cette partie semi-circulaire du musoir qu'il faudrait établir l'abri du marégraphe et le bureau de l'observateur, en élevant un petit mur en briques sur le pourtour du parapet et adossant le sommet de la toiture à la tour à feu.

Dans les conditions où il est établi, le marégraphe ne pourrait être établi directement au dessus du puits, il faudrait comme au Havre une poulie de renvoi du fil du flotteur à la grande roue de l'instrument. Il faudrait sans doute entailler le parapet pour y placer la grande poulie de retour du fil du flotteur et le faire arriver au dessous de l'instrument. Ces détails d'installation dépendront surtout de l'instrument une fois qu'il sera disposé pour servir des marées de près de 6 mètres. Aussi est il convenu avec le conducteur des ponts et chaussées que j'enverrai dès que je le pourrai un croquis coté de l'appareil, et que lui de son côté me fera parvenir un plan également coté du musoir du môle. » (Extrait de la Note de l'ingénieur hydrographe Gaussin du 4 mai 1861, Archives du SHOM).

Des plans d'élévation réalisés en 1861 et 1862 (cote 4S 333, Liasse 1 ; AD44) viennent confirmer cette organisation (Figure 17).

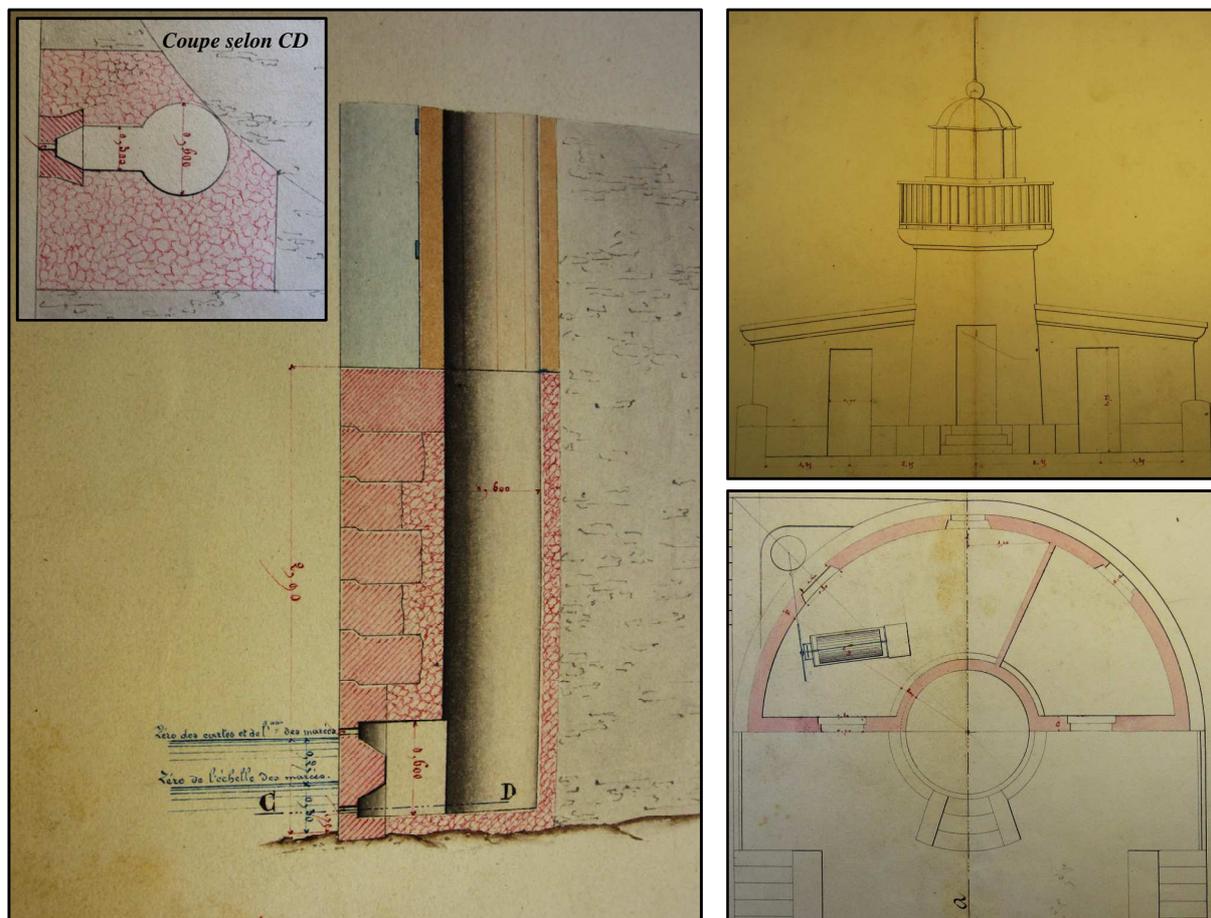


Figure 17 : Extraits de plans d'élévation et coupe du puits de tranquillisation (à gauche, Mars 1861) et du bureau de l'observatoire des marées (à droite, le 8 Octobre 1862) de Saint-Nazaire.

Dans une note du Comité du nivellement général de la France sur les marégraphes français du 3 décembre 1882 (cote 4S 333, Liasse 2 ; AD44), il est rappelé qu'à Saint-Nazaire, « *le puits est alimenté par deux petites ouvertures de 0,04 m de diamètre, placées à sa base, la première, un peu au-dessus du niveau du zéro des cartes, la seconde à 0,15 m au-dessous. Ces ouvertures vont en s'élargissant, en forme d'embrasures, de l'extérieur à l'intérieur du puits.* ».

Aujourd'hui encore il est possible d'observer, à l'extrémité de la jetée du vieux-môle, les restes du puits de tranquillisation construit à l'époque (Figure 18).



Figure 18 : Restes du puits de tranquillisation à l'extrémité de la jetée du vieux-môle de Saint-Nazaire (Avril 2014).

Bien que l'observatoire des marées soit établi depuis 1861, il semble que l'installation du marégraphe se soit fait attendre. Par exemple, dans une lettre datée du 27 juin 1861 (cote 4S 333, Liasse 1 ; AD44), l'ingénieur ordinaire chargé du service à St-Nazaire informe le Commissaire de l'inscription maritime à Saint-Nazaire que M. de la Roche Poncié, ingénieur hydrographe chargé de l'installation du marégraphe lui avait indiqué *« qu'il ne l'avait reçu à Paris qu'il y a environ 3 semaines [...] et que l'artiste chargé de la réparation et du remaniement de l'instrument demandait deux mois. »* Il en conclut donc qu'*« A ce compte et en égard aux petits travaux à faire sur place après la réception de l'appareil à St-Nazaire, on ne peut guère admettre qu'il soit en fonction avant la fin d'août. »*

Finalement, la livraison a dû prendre plus de temps que prévu car les premières mesures identifiées à ce jour datent de Janvier 1863 (premières mesures rapportées dans le journal bi-mensuel de marée de Janvier – Février 1863 datant du 18 janvier 1863, archives SHOM).

IV.2.2. Marégraphe opéré par le Service hydrographique (1863 – 1920)

IV.2.2.1 *Les observateurs des marées de Saint-Nazaire*

Le Service hydrographique de la marine a entretenu le marégraphe de Saint-Nazaire et a veillé au bon fonctionnement de l'appareil de mesure de 1863 à 1920. Des agents ont donc été particulièrement assignés à cette mission. Ces agents, appelés observateurs des marées par l'ingénieur hydrographe Chazallon dans ses instructions écrites, devaient contrôler et régler régulièrement l'horloge associée au marégraphe, réparer les petits problèmes. Plusieurs observateurs des marées se sont succédés à Saint-Nazaire pendant ces 58 années :

- M. Chazal, du 18 janvier 1863 jusqu'au 29 février 1880. Il se trouve que cet observateur a occupé la même fonction au marégraphe de Cherbourg depuis son établissement en 1850, mais pour des raisons de santé avait demandé à être employé dans un des nouveaux marégraphes à établir plus au Sud. Selon l'ingénieur hydrographe Gaussin, il est une personne de qualité dont les « travaux ont toujours été remarqués au Dépôt de la marine pour leur netteté et par exactitude » et il indique également qu'« il est parfaitement noté par le Directeur de l'observatoire [de Cherbourg] ». ¹¹
- M. Morvan, de janvier 1881 au 30 juin 1883.
- M. A. Evain, de juillet 1883 (dans le registre bi-mensuel du mois, il note : « *Le 1er Juillet 1883, je suis nommé agent du marégraphe à St-Nazaire en remplacement de M. Morvan, démissionnaire. Signé : A.Evain* ») à janvier 1908 (« *Le titulaire du poste étant décédé le 10 février, l'intérimaire n'a pas pris les observations météorologiques. F. Pape.* »).
- M. F. Pape, de mars 1908 à décembre 1920.

A la fin de chaque mois de mesures, les hauteurs d'eau enregistrées sur les marégrammes étaient retranscrites par ces agents sous forme de tableaux (registres des marées) qui devaient être validés par les professeurs d'hydrographie locaux avant d'être envoyés au dépôt de la Marine.

L'appareil marégraphe permettant de réaliser les mesures dès 1863 à Saint-Nazaire est un marégraphe mécanique de type Chazallon (Figure 19).

Les dimensions du tambour horizontal sont très importantes (circonférence de 1,49 m, longueur de 80 cm), ce qui permet d'obtenir un rapport de réduction verticale de 1/10. La rotation est réglée grâce à une horloge pour effectuer une révolution en un jour, soit environ 55-60 mm/h. Le marégramme est laissé par l'observateur des marées sur le tambour pendant 1 mois. L'utilisation de crayons de différentes couleurs permet alors de suivre plus aisément les courbes de marée.

Il semblerait que ce soit le même marégraphe Chazallon qui ait été mis en œuvre à Saint-Nazaire, sur l'ensemble de la période pendant laquelle le marégraphe est opéré par le Service hydrographique, soit jusqu'en 1920 au moins.

¹¹ Inspection des marégraphes 1861. Rapport manuscrit de Gaussin sur l'état du réseau marégraphe : Cherbourg, le 22 avril 1861. (Archives SHOM – HDC - SERVICE DES MAREES S-H Archives IV- 3 2/4 – 3)

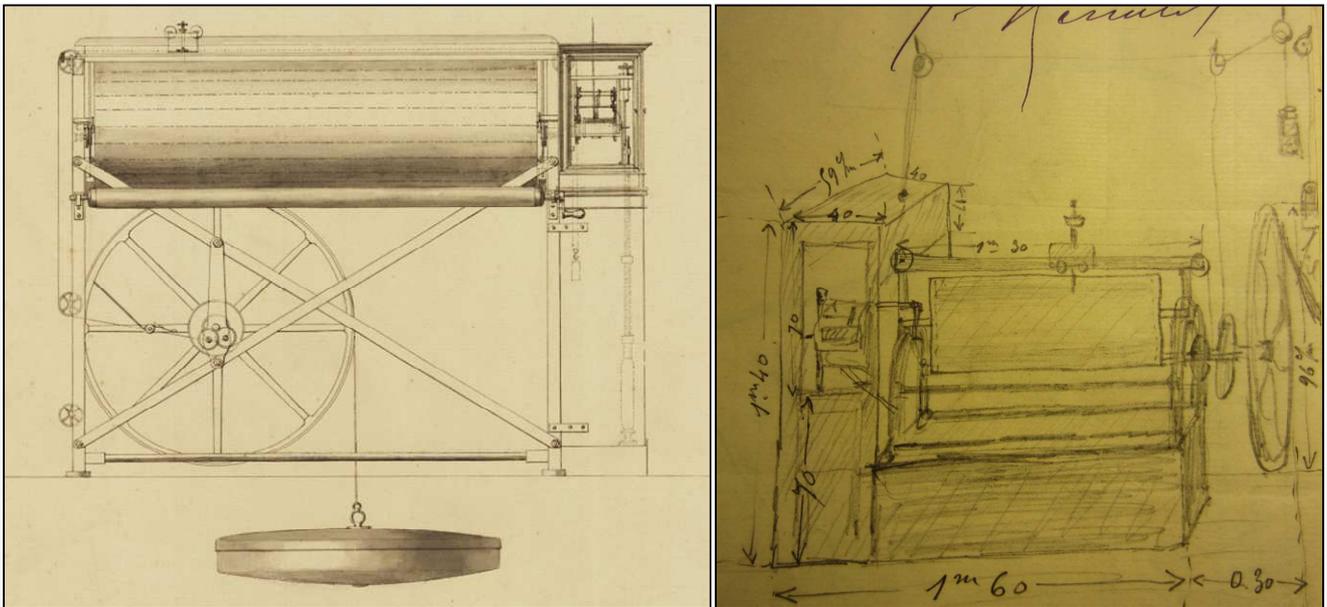


Figure 19 : Marégraphe mécanique de type Chazallon installé à Saint-Nazaire depuis 1863.

A gauche : Schéma du marégraphe Chazallon (Archives SHOM, cote 12-7-47-1) ; A droite : Croquis du marégraphe Chazallon fait par l'observateur de marée de Saint-Nazaire en 1906 (cote DD 2 – 1807, SHD Vincennes)

Le 3 décembre 1882, dans une note du comité du nivellement général de la France sur les marégraphes français (emplacements, caractéristiques des observatoires et des appareils marégraphiques, détails des zéros adoptés, ...), l'idée de ne plus maintenir le marégraphe de Saint-Nazaire est avancée. Selon les membres de ce comité, « [aux stations] du Havre, de St-Nazaire et de la Pointe de Grave, [...] les observations peuvent être plus ou moins faussées par l'influence des fleuves à l'embouchure desquels elles sont situées » (cote 4S 333, Liasse 2 ; AD44). Bien heureusement, cette proposition ne fut pas appliquée, et les mesures marégraphiques se sont poursuivies de façon relativement continue jusqu'en 1920.

IV.2.2.2 Lacunes dans les mesures

Au cours de la période pour lesquelles le SH était en charge du marégraphe, les mesures marégraphiques sont relativement continues. Néanmoins, il n'est pas rare d'observer des lacunes dans ces dernières, et leur durée varie en fonction de l'origine de l'interruption des mesures. L'objectif de ce chapitre est de donner les principales raisons expliquant les lacunes observées.

Les mesures marégraphiques peuvent être perturbées et/ou interrompues pendant des périodes souvent longues de quelques minutes à plusieurs heures du fait :

- des incidents techniques impactant la bonne marche du marégraphe. La durée de la lacune associée dépend du temps mis par l'observateur pour résoudre le problème (exemples tirés des registres bi-mensuels des marées : « Le 30 [mars 1873], la corde du contre-poids du flotteur a cafsé à 3h05 du matin ; je l'ai remplacé et remis le crayon en mouvement à 7h56m. », « Le 16 avril [1881] à 2h du matin, le fil du flotteur casse, remis le crayon à 8h15 matin. », ...).
- des mauvaises conditions météorologiques (ex : « Les 28 et 29 [mars 1888], matin et soir, la marée poussée par une tempête de SO à SSO, atteint une très grande hauteur et cause nombre de dégâts sur les côtes. Les 28 et 29, matin et soir, la marée étant descendue en dessous du 0 de l'échelle, le flotteur est venu à sec par suite de l'envasement du puits, la mer basse de ces jours n'a donc pu être relevée. », « Pendant la tempête du 4[décembre 1897] à 2h05 du soir, le fil du flotteur s'est rompu ; vu

le mauvais temps, je n'ai pu le remplacer et remettre ensuite l'appareil en marche que le lendemain 5 à 2h48 du soir. », ...) ;

- des opérations d'entretien du marégraphe nécessaires pour assurer sa bonne marche (ex : « *Le 31[mars 1885] au matin, pas de BM, l'appareil étant démonté pour faciliter le désenvasement du puits, remis en marche à 1h07 du soir. », « Arrêt de la pendule du marégraphe à minuit 57 le 5 [octobre 1890] au matin. Nettoyage succinct de l'appareil et mise en marche à 1h30 le 6 au soir. »,...*) ;
- de motifs plus extravagants (ex : « *Le 12 [juin 1873], le mouvement de la mer s'est trouvé interrompu dans le puits de 3h59m à 5h15m du soir : l'orifice aura été bouché par quelque poifson* »).

Les interruptions de mesures peuvent également intervenir pendant des périodes allant de quelques semaines à quelques mois, ce qui est beaucoup plus handicapant lorsque des calculs de niveaux moyens doivent être entrepris :

- les tableaux d'extraction de hauteurs d'eau relatifs aux mois de mai, juin et juillet 1866 sont manquants. Il n'est fait aucune mention de ce manque dans les journaux bi-mensuels correspondants. Aucune explication permettant de comprendre cette absence n'a été trouvée dans les archives ;
- les registres couvrant la période allant de mars à décembre 1880 sont manquants (à la fois les tableaux d'extraction de hauteurs d'eau et les journaux bi-mensuels). Aucune explication permettant de comprendre cette absence n'a été trouvée dans les archives, néanmoins, nous pouvons supposer que cette lacune est due au changement d'observateur des marées ;
- les registres relatifs au mois d'octobre 1893 sont manquants. Dans le journal bi-mensuel des marées correspondant, il est indiqué que « *Le relevé du mois d'Octobre n'a pu être fait à St-Nazaire par le soussigné, la feuille de ce mois ayant été envoyée à Paris dès le 1er Novembre sur la demande de Monsieur l'Ingénieur hydrographe Hanusse* » ;
- les registres relatifs au mois de janvier 1898 sont manquants. Aucune explication permettant de comprendre cette absence n'a été trouvée dans les archives ;
- pendant le mois de juillet 1899, l'appareil du marégraphe n'a pas fonctionné. L'observateur des marées A. Evain indique que « *de grandes réparations au local en ont nécessité son démontage, aussi a-t-on profité de cet arrêt pour faire un démontage et un nettoyage complet de la pendule et de ses accessoires* » ;
- à partir de décembre 1904, aucune mesure marégraphe n'a pu être effectuée du fait d'importants travaux en cours à l'extrémité du vieux môle. A. Evain note alors que « *Le 1er décembre à midi, la feuille de novembre a été retirée et n'a pas été remplacée. L'appareil en entier a été démonté et le logement du marégraphe entièrement déménagé, afin de permettre la démolition et reconstruction du poste dans lequel il se trouve. Ces travaux entrepris par les Pts & Chaussées sont la conséquence de la démolition de l'ancien phare du vieux môle, et la reconstruction sur le même emplacement d'un phare bien plus élevé. Ces travaux dureront environ un mois et demi. Pendant ce temps l'appareil sera visité, réparé et l'horloge nettoyée.* ». Ces travaux ont duré plus longtemps que prévu : en février 1905, l'agent du marégraphe indique que le local est toujours en reconstruction, et que l'appareil est en réparation. Ce n'est qu'en mars 1905 que les mesures reprennent.

IV.2.3. Marégraphe opéré par les Ponts et Chaussées / GPM-NSN(1920-2007)

IV.2.3.1 Cession du marégraphe de la Marine au Service des Ponts et Chaussées (1920-1922)

Le 16 Juin 1920, le Ministre de la Marine informe par lettre le Ministre des Travaux Publics qu'il a été décidé de supprimer, à partir du 1er Janvier 1921, les marégraphes du Havre, de Saint-Nazaire et du Socoa (Cote 4S 333, Liasse 3 ; AD44). Il propose alors de mettre à disposition de son administration les appareils et le matériel associés des stations du Havre et de Saint-Nazaire.

Ce même jour, M. Rollet de l'Isle, par ordre du Ministre de la Marine, demande au Vice-Amiral de Lorient de faire notifier à l'observateur des marées de l'époque, M. F.Pape, cette décision de suppression de marégraphe. Il demande par la même occasion « *de faire examiner par le Service Maritime de St-Nazaire, si ce service verrait intérêt à utiliser le marégraphe qui est installé dans ce port. Dans ce cas, le matériel serait cédé à l'Administration des Ponts et Chaussées.* » (Cote 4S 333, Liasse 3 ; AD44).

Suite à cette demande, l'ingénieur en chef des P&C à Saint-Nazaire a informé l'observateur des marées de cette éventuelle cession du marégraphe et en a profité pour lui proposer de continuer le service des Observations pour le compte des P&C, ce que M. Pape a accepté, malgré une diminution du salaire mensuel (Lettres du 30 juin et 2 juillet 1920. Cote 4S 333, Liasse 3 ; AD44). Ainsi, dans son rapport du 9 juillet 1920, l'ingénieur en chef estime qu'il est nécessaire d'accepter la cession proposée car « *le marégraphe de la Marine au port de St-Nazaire est installé [...] dans de très bonnes conditions, et nous rend des services constants pour nos travaux.* » et indique que « *l'observateur actuel, M. Pape, payé par la Marine 140 fr. par mois, accepterait de [nous] continuer ses services moyennant une rémunération réduite à 100 fr. par mois. L'entretien du matériel, actuellement en bon état, peut être estimé à 200 f. par an. La dépense annuelle d'entretien et de fonctionnement du marégraphe ne dépasserait donc pas 1400 fr. Elle serait prélevée sur les crédits d'entretien du Port de St-Nazaire.* ».

Au regard des différents arguments mis en avant, le sous-secrétaire d'Etat des ports, de la Marine Marchande et des Pêches informe le Ministre de la Marine le 20 juillet 1920 qu'il autorise « *la remise [du marégraphe de Saint-Nazaire] à [m]on Département à la date précitée du 1er janvier 1921, et de [me] faire parvenir l'état de cession de ce matériel dont la valeur doit être remboursée à [votre] Administration.* ». Cette décision est alors officialisée par M. Rollet de l'Isle, pour le Ministère de la Marine, le 13 Août 1920.

Le 1^{er} janvier 1921, le marégraphe de Saint-Nazaire est placé sous la responsabilité des Ponts & Chaussées.

IV.2.3.2 Fonctionnement de l'Observatoire des marées entre 1920 et 1950

Bien que le marégraphe soit vraisemblablement toujours resté en place, il est probable que les mesures de hauteurs d'eau n'aient été réalisées que ponctuellement. En effet, dès lors que le Service Hydrographique n'a plus été en charge de l'appareil, il semble que, contrairement à ce qui semblait avoir été décidé, les mesures n'aient pas été faites tout de suite de façon continue.

Seuls très peu de registre de marées ou marégrammes acquis entre 1921 et 1934 ont été retrouvés. *A priori*, la stratégie d'acquisition des données de hauteurs d'eau devait être conforme à ce que le conducteur des travaux des P&C de Saint-Nazaire avait proposé le 6 juin 1920 lors de l'enquête sur l'utilité de conserver le marégraphe, à savoir : « *Le marégraphe est [...] utile pour les sondages. Sans doute y aurait-il intérêt à ce qu'il soit cédé au service maritime qui l'utilisent suivant ses besoins en demandant occasionnellement le concours du préposé actuel au marégraphe.* » (Cote 4S 333, Liasse 3 ; AD44).

Ainsi, les mesures ne semblaient être faites, ou tout du moins conservées/transmises, que sur demandes. Par exemple, les registres de marées retrouvés concernant la période allant de juin à mi-octobre 1925 ont vraisemblablement été rédigés dans le cadre de la campagne hydrographique en embouchure de Loire de 1925, afin de réduire la marée. Sur ces registres (DD7- 2896, 1925 ; SHD Rochefort), il est indiqué que les mesures ont été réalisées au marégraphe de Saint-Nazaire, ce qui laisse penser qu'il était bien toujours en place.

Dans une note datée de 1944 portant sur les données numériques concernant les marées des côtes de France¹², l'ingénieur hydrographe Courtier fait un état des lieux des périodes de fonctionnement des marégraphes des côtes françaises qui semble confirmer cette période de lacune de mesures marégraphiques à Saint-Nazaire. En effet, il note qu'entre 1920 et 1931 le marégraphe dépend du service des P&C de Saint-Nazaire, mais que les enregistrements ne se trouvent pas dans les archives de ce dernier.

Les plus anciens marégrammes retrouvés et appartenant à cette période pauvre en mesures datent de 1932. Les dimensions peu banales de ces documents laissent à penser que les mesures étaient alors toujours réalisées par le marégraphe Chazallon. En se basant sur la taille des marégrammes identifiés, il semblerait que cet appareil ait été utilisé jusque fin 1937.

D'après une fiche synthétisant l'historique de l'observatoire des marées, nommée par la suite « Fiche station GPM-NSN » (Archives GPM-NSN), un nouveau marégraphe est installé à Saint-Nazaire en **Novembre 1938** : il s'agit d'un **OTT.R.20** (type V katot) disposant d'un tambour vertical dont la circonférence et la longueur sont respectivement de 84 et 80 cm. Les rapports de **réduction en hauteur et en temps** sont respectivement de **1/10 et 35 mm/heure**. La résolution instrumentale de l'appareil est donnée comme étant égale à 1 cm.

Aucun marégramme enregistré en 1938-1939 n'a été retrouvé dans les différents centres d'archives visités. Néanmoins, les dimensions des marégrammes à partir de 1940 semblent confirmer l'utilisation de cet appareil.

Cette même fiche station du GPM-NSN indique que le marégraphe de l'observatoire des marées a été cambriolé le 21 août 1945. *A priori*, il a fallu attendre le 7 Octobre 1949 pour qu'un marégraphe, identique à celui de 1938, soit de nouveau installé à Saint-Nazaire.

Les métadonnées associées aux mesures de hauteurs d'eau réalisées pendant cette période sont assez rares. Les premières feuilles de contrôles associées aux marégrammes retrouvés datent de 1940. Sur ces dernières, l'agent des P&C préposé au contrôle ne notait que les contrôles d'horloge et vérifiait la coïncidence entre les heures indiquées par l'horloge, enregistrées sur le graphique et exactes du lieu. A cette époque, les observateurs des marées devaient réaliser des contrôles des hauteurs d'eau enregistrées grâce à une lecture comparative à l'échelle de marée, mais ces derniers semblaient n'être indiqués que sous forme de commentaires lorsqu'un problème était identifié (*e.g.* « *A partir du 9 juin [1941] à 10h30 (H.S.) les cotes sont trop fortes de 0.4m* », « *Jusqu'au 20 Mai [1943] 7h45, cotes trop hautes de 0.197m. Touchet.* »).

¹² n°14-1016, extrait du 23^{ème} Cahier des Recherches sur le régime des côtes, 1944 ; Archives SHOM

Entre les années 1940 et 1945, plusieurs personnes se sont succédées à la vérification de la bonne marche du marégraphe de Saint-Nazaire, dont les principales sont : M. Bocquel (1940-1942) et M. Bonnet (1943-1944) qui paraissent être des agents ordinaires des TPE, *a priori* supervisés par l'ingénieur TPE Touchet (1940-1944).

IV.2.3.3 Reprise des mesures et nouvel emplacement du marégraphe (1950)

Dans la fiche station du GPM-NSN, dont ni l'auteur, ni la date de rédaction ne sont mentionnés, il est noté que la base du puits de tranquillisation situé sur la digue du Vieux Môle avait une cote insuffisamment basse induisant des envasements fréquents du fond du puits. Nous verrons lors de la validation des mesures et l'analyse des données que ce constat se révèle être assez vrai. De plus, ce positionnement à l'extrémité du môle semblait être problématique du fait des remous observés à cet endroit.

Dans le but vraisemblable de solutionner ces problèmes, **le site de la jetée du vieux môle est abandonné à partir de décembre 1950 au profit du parement extérieur de la jetée Est de l'avant-port (Entrée Sud), emplacement toujours d'actualité aujourd'hui** (localisation en Figure 20).

Cette installation, construite par M. Goinard (entrepreneur à Saint-Nazaire), comprend un puits de 1.5 m de diamètre intérieur en béton armé à l'intérieur duquel une échelle de marée en lave émaillée de Volvic est installée. La côte du fond du puits est -0.90 m ZH. La Figure 21 présente le détail de ce puits.

Après avoir visité plusieurs marégraphes installés le long des côtes françaises, l'ingénieur en chef de l'IGN, Charles de Van de Castele précise dans son compte-rendu du 18 août 1960 (Archives GPM-NSN, cote 50-20-4) qu'à Saint-Nazaire « *la communication du puits et de la mer se fait par un orifice d'environ 12 cm², qui peut être fermé par une vanne commandée par un volant très accessible. Ce dispositif permet avec les grandes marées de produire un effet de chasse pour nettoyer l'orifice.* ». Selon lui, cette ouverture de 12 cm² est idéale pour amortir la houle extérieure sans induire de déphasage entre les niveaux intérieur et extérieur.

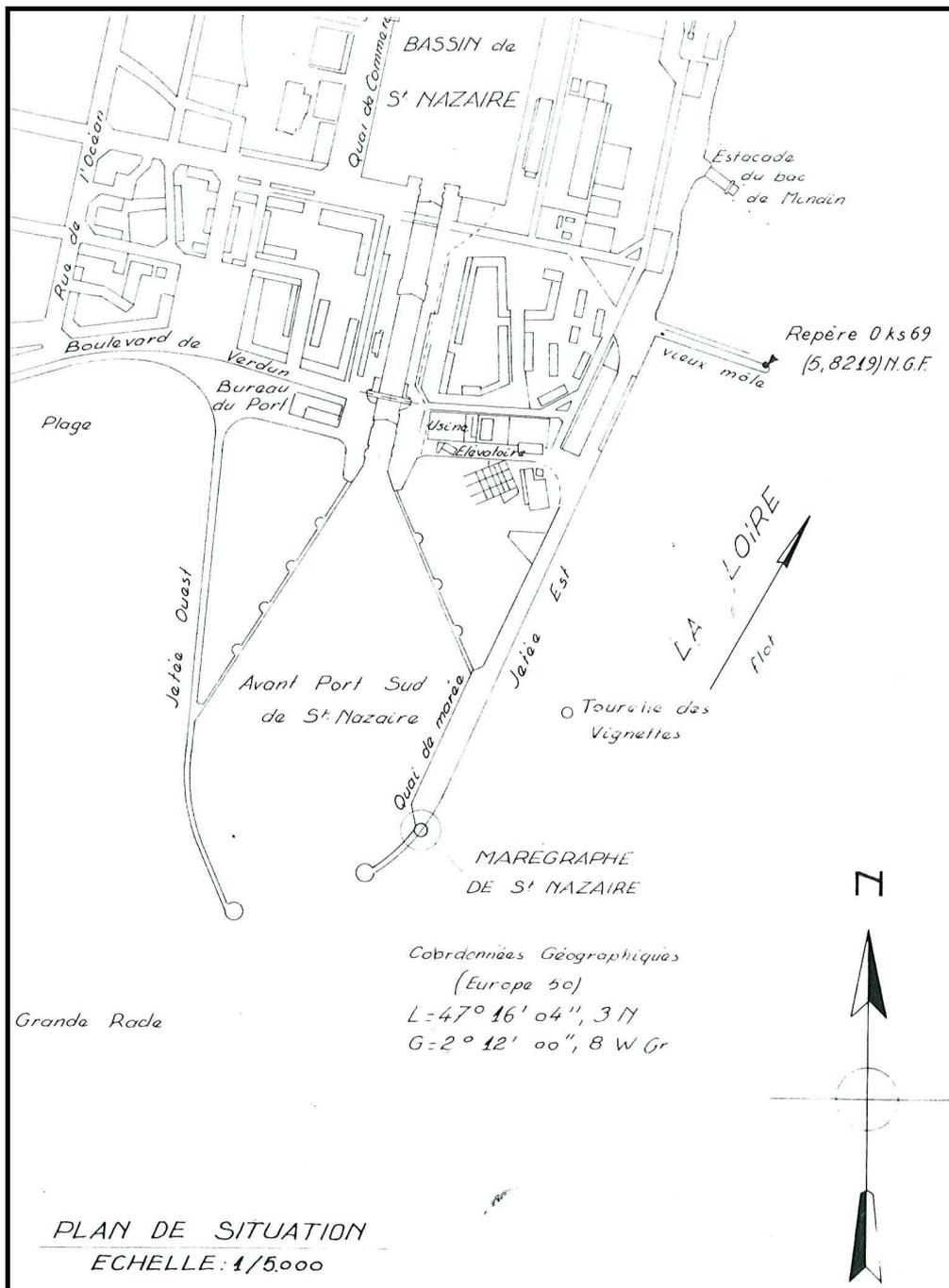


Figure 20 : Localisation du marégraphe de Saint-Nazaire (Plan de situation dressé par l'ingénieur des T.P.E., le 12 Avril 1963).

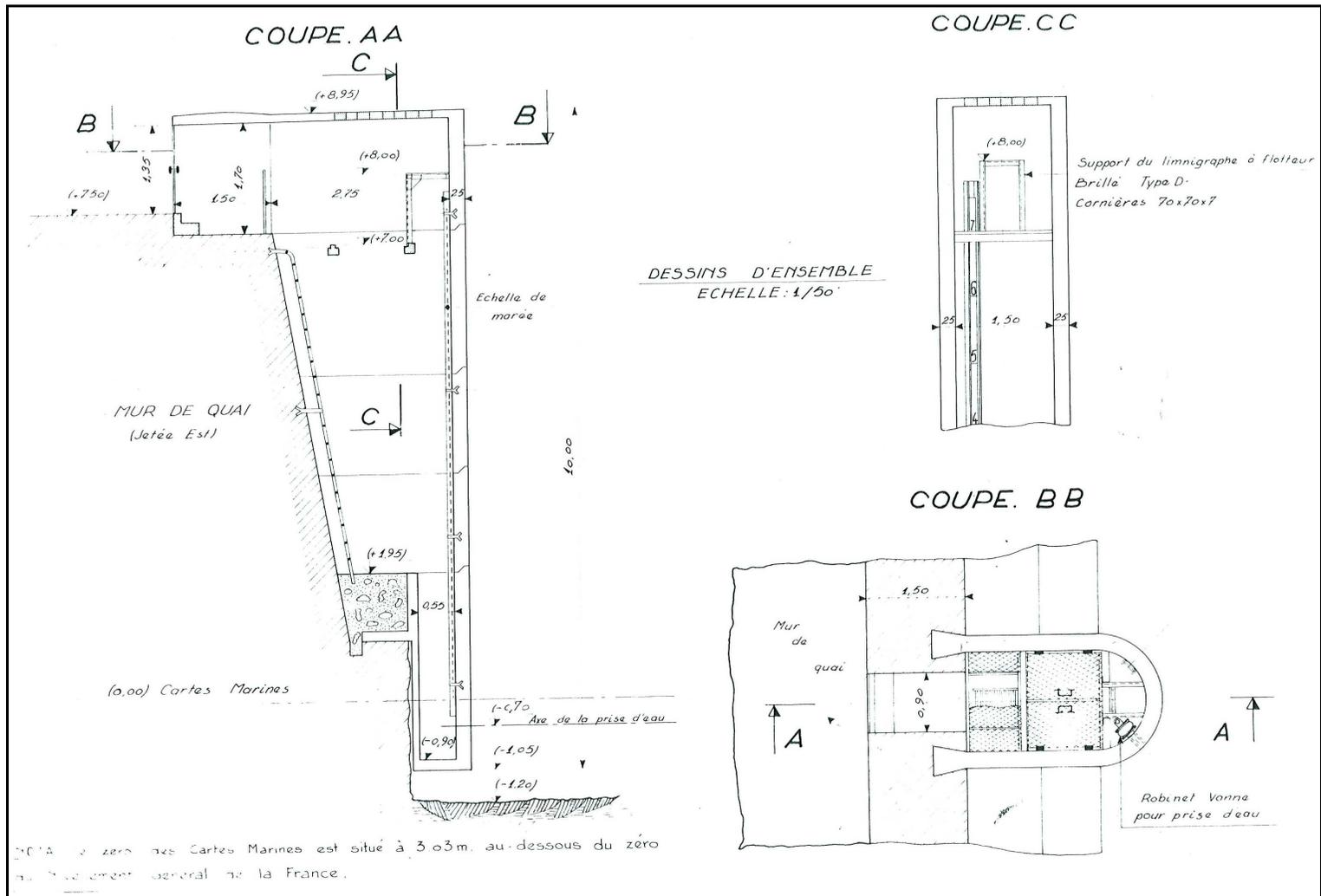


Figure 21: Dessins d'ensemble du marégraphe de Saint-Nazaire à l'extérieur de la jetée Est de l'avant-port (dressé par l'ingénieur des T.P.E., le 12 Avril 1963).

Le marégraphe OTT a donc été démonté le 18 décembre 1950 (Note de l'hydrographe Picard, le 18/12/1950 à 8h05 sur feuille de contrôle : « *démonté l'appareil du Vieux Môle pour l'installer à la jetée Est* ») pour être remonté dans la même journée au nouvel emplacement en veillant à conserver le même plan de référence comme zéro du marégraphe (-3.03m NGF Lallemand, cf. §IV.3.1.2).

Parallèlement au déplacement du marégraphe, dès 1951 un autre appareil est installé dans le nouvel observatoire des marées : **un marégraphe à flotteur Brillé [Brillié] de type D**, à transmission électrique, ce qui permet un enregistrement du niveau à distance (enregistreur placé dans les bâtiments de l'Usine Elévatoire, localisée en Figure 20). Le tambour vertical de l'appareil a une circonférence et une longueur de respectivement 72 et 60 cm, induisant des rapports de **réduction en hauteur et en temps de 1/20 et 30 mm/heure** respectivement. Les marégrammes étaient changés tous les 15 jours.

La possibilité nouvelle du télé-enregistrement à distance a permis de suivre l'évolution des hauteurs d'eau en temps réel depuis l'Usine Elévatoire de Saint-Nazaire. Cette usine, mise en service en 1911, servait à maintenir à flot le bassin de Saint-Nazaire en pompant l'eau de l'avant-port pour la renvoyer dans le bassin, et son régime de fonctionnement dépendait donc de la marée. Ainsi, un indicateur de niveau à cadran a été installé dès 1951 dans l'enceinte de l'usine, ainsi qu'un indicateur de niveau de 3 m de diamètre sur la cheminée de l'usine, visible depuis le quai des marées et depuis la Loire (Figure 22).

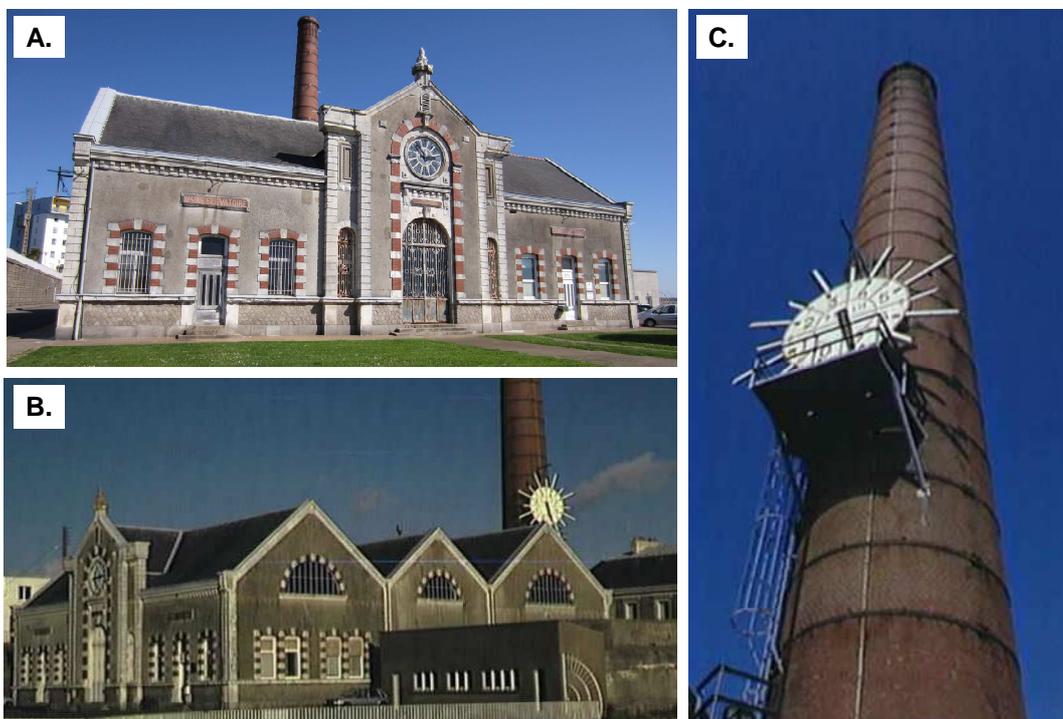


Figure 22 : Usine élévatoire à Saint-Nazaire.

A. Etat actuel de l'Usine élévatoire (Photo SHOM, Avril 2014) ; B et C : Aperçu du cadran de 3 m de diamètre positionné sur la cheminée de l'Usine élévatoire depuis 1951 (Source : Ecomusée de Saint-Nazaire ; références respectives : P 525-3052 et P 525-3049 ; 1986)

IV.2.3.4 *Fonctionnement de l'observatoire des marées entre 1950 et 2007*

Lors de cette période, bien qu'assez récente, les documents relatifs à l'observatoire des marées et aux mesures n'ont été trouvés que de façon éparse. Ainsi, les informations contenues dans cette partie ne sont probablement pas exhaustives.

Depuis la reprise des mesures marégraphiques, le service maritime des P&C de Saint-Nazaire a dépêché plusieurs personnes pour effectuer la vérification de la bonne marche du marégraphe de Saint-Nazaire. La connaissance de ces personnes n'est que superficielle car se base pour l'essentiel à ce qui est écrit sur les feuilles de contrôles associées aux marégrammes.

Pendant les années 1950 et 1951, les contrôles ne semblent avoir été réalisés que par des ingénieurs hydrographes des TPE (pour l'essentiel, par M. Picard, mais également par MM. Gendron et Le Ménach). A partir de 1952, la personne en charge du contrôle du marégraphe est M. Mabit, chef électricien aux P&C. Il est vraisemblable que le fait que ce ne soit plus des hydrographes qui vérifient et règlent le marégraphe soit dû au mode de fonctionnement de l'appareil Brillié en place depuis 1951. En effet, l'enregistrement étant transmis électriquement à l'enregistreur, il n'est pas rare d'observer des problèmes d'ordre électrique (ex. « le 8 [novembre 1955] montage de piles et branché relais après essai, le 9 débranché relais qui ne fonctionnent pas bien manque de tension »), qu'un électricien est donc plus à même de résoudre. M. Mabit a effectué ces contrôles de façon quasi-continue jusqu'en mars 1968. Par la suite, il a été remplacé au moins jusqu'en 1976 par M. Crénéguy dont la fonction n'est pas renseignée sur les feuilles de contrôle.

D'après la fiche station du GPM-NSN, l'observatoire des marées de Saint-Nazaire est muni dès le 19 juin 1951 d'un ruban gradué dans le puits de tranquillisation, facilitant alors le contrôle des mesures marégraphiques. L'ingénieur hydrographe Picard en donne une description à l'issue d'une visite effectuée en 1960 (cf. schéma en Figure 23) : « Il s'agit d'un ruban métallique gradué au cm et fixé sur un bâti à l'aplomb du flotteur. Ce ruban est muni d'un poids à son extrémité et la lecture d'appoint se fait sur un vernier mm placé à hauteur du zéro du répétiteur ou du marégraphe »

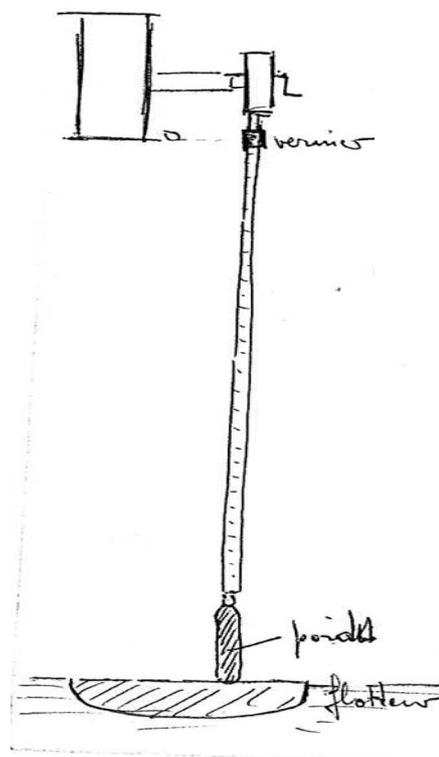


Figure 23 : Principe de fonctionnement du ruban gradué en place à Saint-Nazaire (1960; Archives IGN)

Dans la fiche station du GPM-NSN, le puits de tranquillisation semble avoir été modifié le 6 février 1978 par la mise en place d'un tube PVC de 300 mm de diamètre associée à l'ouverture totale de la vanne.

Une note du PANSN datée du 28 décembre 1979 et rédigée par l'ingénieur divisionnaire des TPE Dupont rend compte de la destruction de l'abri du marégraphe de Saint-Nazaire intervenue dans la nuit du 27 au 28 décembre 1979. Il signale alors que « *la dalle supérieure et une partie des murs ont disparus et doivent se trouver par des fonds de -1 à -2 m aux abords immédiats. Il reste seulement la dalle inférieure [...] et quelques morceaux de murs, couchés sur la dalle. Le marégraphe OTT.R.20 et le marégraphe Brillé ont également disparu [...] Il ne me semble pas possible d'attribuer cette destruction au vent ou à la houle, [...] plutôt à un choc violent causé par un navire. La reconstruction de l'abri et l'achat de nouveaux appareils entraîneront une dépense de l'ordre de 60 000 à 70 000 F et un délai de remise en marche de trois mois.* ».

La reconstruction du local du marégraphe a été confiée aux « Ateliers de la Loire » demeurant à Donges. Les travaux ont, *a priori*, duré 4 semaines et coûtés 37044 francs. Le bâtiment abritant le marégraphe a été reconstruit au même emplacement que le précédent, mais le PANSN a profité de cette reconstruction pour agrandir la plate-forme de ce dernier. Cette transformation a induit le déplacement de quelques mètres du puits de tranquillisation qui est dès lors adossé à l'ancienne structure (Figure 24).

poids et du ruban d'acier. [...] Nous avons constaté que l'incident fait suite à un choc (un bateau est venu heurter le tuyau du marégraphe) ». Suite à cet incident, les mesures n'ont repris que le 12 février 2003.

D'autres lacunes, souvent plus courtes, sont également observées au cours de cette période. Souvent, les causes de ces interruptions de mesures n'ont pas été identifiées.

IV.2.4. Intégration du Marégraphe au réseau RONIM (2007-Aujourd'hui)

A partir du 22 janvier 2007, le marégraphe de Saint-Nazaire est intégré dans le réseau RONIM opéré par le SHOM.

Pour correspondre aux standards du réseau RONIM, un marégraphe côtier numérique (MCN) est installé (Figure 25) dans l'abri situé sur le parement extérieur de la jetée Est de l'avant-port (entrée Sud), en remplacement du marégraphe à flotteur Brillié type D qui était « permanent » depuis 1951.

Le MCN est composé d'une centrale d'acquisition ELTA et d'un télémètre radar Optiflex KROHNE effectuant des mesures de hauteur d'eau à 1 Hz. Lors de son installation en 2007, la mesure est réalisée dans un tube de tranquillisation en PVC. Le 1^{er} Octobre 2010, ce dernier s'est détaché due à la corrosion des systèmes d'attaches : un nouveau tube de tranquillisation en inox est installé le 8 octobre 2010¹³, ce qui a pour effet d'améliorer le filtrage mécanique.

L'enregistrement des mesures se fait selon une fréquence d'échantillonnage d'1 minute sur une durée d'intégration de 15 secondes pour ce qui est de la données temps réel, accessible sur internet sur le site de l'UNESCO (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>). Ces mesures sont également stockées au SHOM selon une fréquence d'échantillonnage de 10 minutes sur une durée d'intégration de 2 minutes, accessible sur internet à partir de l'onglet « Données marégraphiques (REFMAR) » du site de diffusion des données SHOM data.shom.fr (<http://data.shom.fr/>).

¹³ journal de bord de la station visible sur la page internet de la station : <http://refmar.shom.fr/SAINT-NAZAIRE>



Figure 25 : MCN radar et centrale d'acquisition en place actuellement à Saint-Nazaire (Photo SHOM, 2014)

Les lacunes de mesures lors de la période RONIM sont souvent dues à des problèmes techniques liées à la centrale d'acquisition et/ou à la transmission des données qui n'a pu être réalisée correctement.

IV.2.5. Synthèse sur les marégraphes utilisés au cours du temps

Depuis la mise en place du premier marégraphe à Saint-Nazaire en 1863, de nombreux appareils de mesure de la hauteur d'eau ont été utilisés. Ces différents marégraphes, soit se sont substitués aux appareils en place dans le but d'améliorer la qualité parfois décroissante des mesures antérieures du fait d'un matériel vieillissant, soit ont été utilisé de manière simultanée dans le but de vérifier les mesures/appareils (Tableau 2).

Tableau 2 : Synthèse des différents types de marégraphes utilisés dans l'observatoire des marées de Saint-Nazaire depuis 1863.

Date / Période	Lieu	Type d'appareil	Description / Remarques
1863 – 1920 ... – 1938	Vieux Môle	Marégraphe à flotteur	Marégraphe de type Chazallon - Taux de réduction vertical : 1/10 - Echelle de temps : 55-60 mm/h
1938 - 1945	Vieux Môle	Marégraphe à flotteur	O.T.T. R.20 (type V katot) - Taux de réduction vertical : 1/10 - Echelle de temps : 35 mm/h
1950	Vieux Môle	Marégraphe à flotteur	O.T.T. R.20 (type V katot) Appareil identique à celui de 1938
18/12/1950 – 1953 1969 – (1978)	Jetée Est, Avant-Port	Marégraphe à flotteur	O.T.T. R.20 (type V katot) Appareil du vieux môle déplacé au nouvel emplacement
1951 – (2007)	Jetée Est, Avant-Port	Marégraphe à flotteur	Brillé, type D - Taux de réduction vertical : 1/20 - Echelle de temps : 30 mm/h - Transmission électrique avec enregistrement du niveau à distance installé dans le couloir de l'usine élévatoire.
1955, 1957	Jetée Est, Avant-Port	Marégraphe à flotteur	Marégraphe « Château » ? Dimension du tambour (45 cm x 72 cm)
2007 –auj.	Jetée Est, Avant-Port	Marégraphe radar	MCN RONIM - Télémètre radar Optiflex KROHNE - Centrale d'acquisition ELTA - Fréquence d'acquisition : 1 Hz

Il a parfois été délicat d'identifier avec précision les périodes pendant lesquelles ces appareils ont été utilisés (surtout en ce qui concerne les périodes non inédites), ou de connaître avec précision les caractéristiques des marégraphes (ex : marégraphe « Château »).

IV.3. Suivi historique du zéro hydrographique / zéro du marégraphe

Il est essentiel de connaître avec précision le plan horizontal de référence utilisé lors de l'acquisition des mesures historiques de hauteurs d'eau afin de pouvoir *in fine* rapporter toutes les mesures au même zéro et ainsi construire une série marégraphique cohérente dans le temps. Ce travail est réalisé à partir de nombreux documents d'archives (notes des observateurs des marées, rapports d'ingénieurs, hydrographes ou des P&C, ...) et s'est révélé être assez complexe car il implique la considération de beaucoup d'informations parfois incohérentes. Par exemple, le fait que le zéro hydrographique historique¹⁴ et le zéro du marégraphe à Saint-Nazaire n'aient pas été définis initialement selon le même plan de référence a rendu délicat le suivi du zéro du marégraphe au cours du temps : lorsqu'un document faisait référence à un zéro, sans préciser lequel, cela pouvait induire des confusions. Il a donc fallu autant que possible multiplier les sources pour tenter de dresser l'historique

¹⁴ Le zéro hydrographique est défini comme étant voisin du niveau des plus basses mers astronomiques

complet et le plus exact possible de l'évolution du zéro hydrographique et de celui utilisé lors des mesures de hauteurs d'eau à Saint-Nazaire.

IV.3.1. Chronologie des références verticales

IV.3.1.1 Continuité du zéro hydrographique de Saint-Nazaire

Au cours du 19^{ème} siècle, plusieurs missions hydrographiques ont été effectuées par la marine dans l'embouchure de la Loire afin de caractériser cette zone. Ci-après sont détaillées les relations entre les différentes références verticales utilisées lors des observations issues de ces campagnes, concernant principalement le zéro hydrographique et sa définition à Saint-Nazaire.

Au cours de l'année **1821**, l'ingénieur hydrographe Beautemps-Beaupré réalise des levés bathymétriques de cette zone et réalise une carte marine (extrait visible en Figure 10). Les sondes bathymétriques devant être réduites de la marée, des « *observations du mouvement des eaux à Saint-Nazaire* » sont faites en parallèle. Ces dernières permettent de ramener la mesure de profondeur à un niveau de référence fixé, ou zéro de réduction, correspondant généralement au zéro hydrographique du lieu. Dans ce but, une échelle de marée a été placée temporairement à Saint-Nazaire, ce qui a permis de relever tous les quarts d'heure les hauteurs d'eau diurnes du 25 mai au 17 octobre 1821 (7JJ 299, 1821 ; SHD Rochefort). Aucune information relative au zéro de réduction adopté alors n'a pu être trouvée dans ces registres de marée, à l'exception d'un commentaire noté en rouge et possiblement noté à posteriori disant qu'« *il faut retrancher 1 pied de toutes les observations de l'échelle de Saint-Nazaire, le 0 de l'échelle étant 1 pied 0 pouce au-dessus de 0* ». Cette annotation, qui semble être le résultat de l'analyse de l'ensemble des mesures de hauteurs d'eau réalisées permettant de définir le zéro hydrographique de la zone, a vraisemblablement été suivie lors de la construction de la carte marine. **Ainsi, le zéro de l'échelle de marée mise en place en 1821 était situé 32,48 cm (1 pied) en-dessous du zéro hydrographique nouvellement défini.**

En 1853 et 1864, l'ingénieur hydrographe Bouquet de la Grye effectue deux autres missions hydrographiques à l'embouchure de la Loire pour lesquelles il dut faire des recherches sur les différents zéros utilisés au cours du temps (Figure 26). Dans une synthèse, datée du 4 février 1865 (document de travail, source 7JJ 1213, 1864¹⁵ ; SHD Rochefort), il est question des travaux effectués en 1821 par M. Beautemps Beaupré. Il indique que ce dernier avait tracé, sur une roche près de l'église de Saint Nazaire, un repère identifié comme étant 13pieds et 6pouces au-dessus du zéro adopté en 1821. Toujours dans cette synthèse, il note que :

- cette roche « *a été enlevé lors de la construction de la jetée actuelle. Mais les plans de cette jetée dressée par les Ponts et Chaussées porte pour la tablette supérieure de l'escalier du bout du môle 8.20m et il est probable que le zéro de ce projet a été celui de M. Beautemps-Beaupré alors très apparent.* » ;

¹⁵ « 1864, Marées de la Loire rapportées au zéro du marégraphe de St Nazaire, n°2 – cahier 71 »

- « en 1850, M. [l'Ingénieur Hydrographe] de la Roche Poncié a mesuré directement l'intervalle compris entre le haut de l'échelle du bout extérieur de la jetée et la tablette du haut de l'escalier et trouvé que le zéro de l'échelle est à 8.62 m en contrebas de cette tablette. Les ingénieurs des ponts et chaussées ont repéré le zéro de l'échelle des écluses avec celui du bout de la jetée. »

Ces cotes sont cohérentes avec ce qu'indique M. Chazal, l'observateur des marées en février 1865, à savoir que « Le zéro des échelles des Ponts-et-Chaussées est à 8m62 au-deffsous de cette même surface [la surface supérieure de la tablette près de l'escalier au bout du môle] » (Journal Bimensuel des marées ; Archives SHOM).

Ainsi, Bouquet de la Grye en déduit que **le ZH-1821 correspond à la division « 0,42 m de l'échelle actuelle [1865] du bout le jetée de Saint-Nazaire », ce qui place par conséquent le zéro de l'échelle de marée temporaire de 1821 à la division 0.09 m de cette même échelle.**

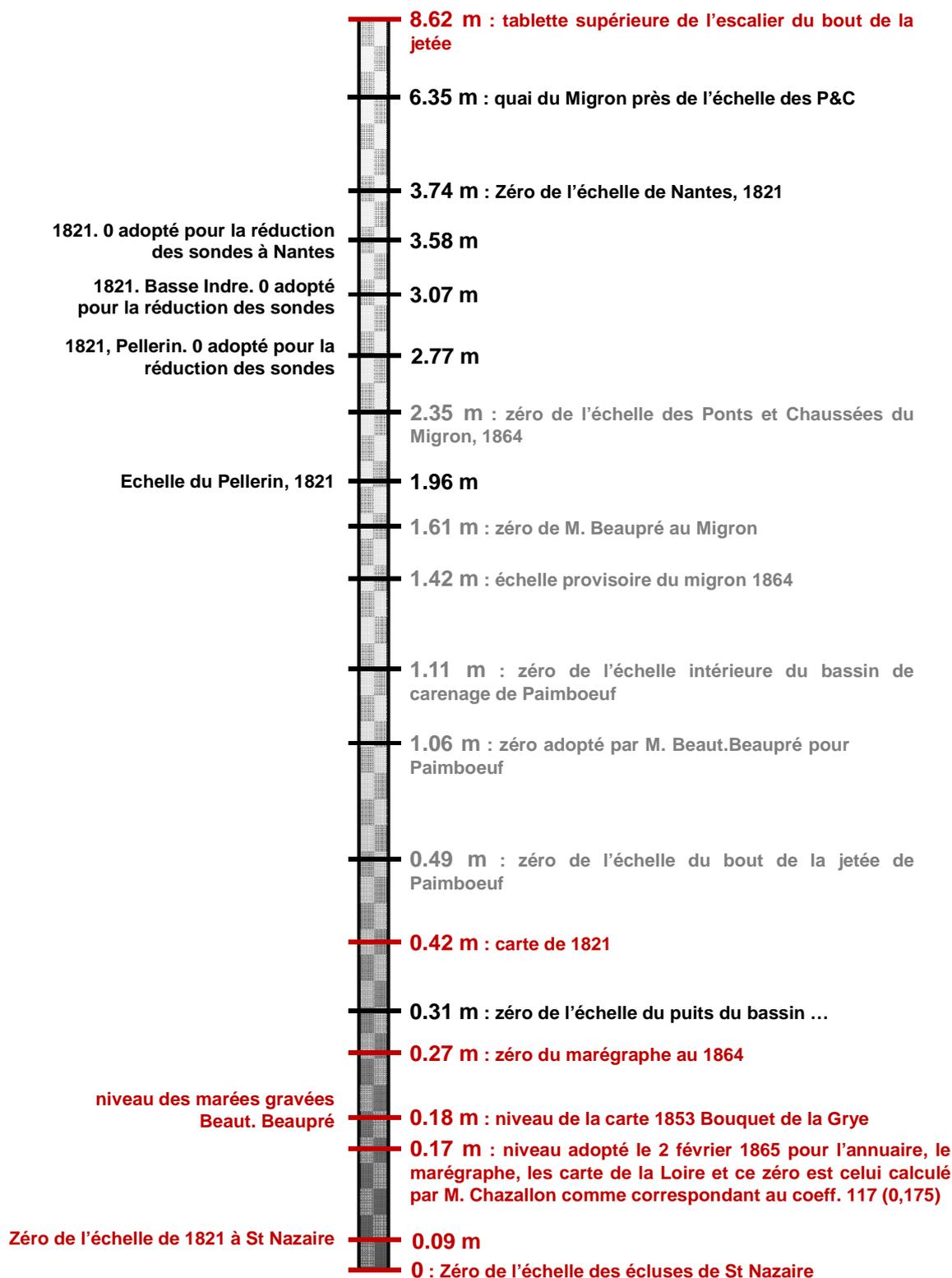


Figure 26 : Reprise du schéma synthétisant différentes hauteurs caractéristiques en Loire par rapport à « l'Echelle du bout de la jetée de Saint Nazaire » par Bouquet de la Grye. (7JJ, Livre 1213, 1864 ; SHD Rochefort).

Les gradations n'ont pas de réalité physique. Les informations notées en rouge sont relatives à Saint-Nazaire.

Pour la campagne hydrographique menée par Bouquet de la Grye en **1853**, il indique toujours dans cette même note de synthèse, du 4 février 1865, que le zéro adopté lors de la construction de la carte marine correspondait à la division 0.18 m de l'échelle de marée du bout de la jetée de Saint-Nazaire, soit « à 8,44 m au-dessous de la tablette de l'escalier ».

Lors de la mission hydrographique de **1864**, Bouquet de la Grye indique que « *le zéro de publication [...] sera ainsi à 17cm au-dessus du zéro des Ponts et Chaussées et à 8m45 au-dessous de la tablette de l'escalier du bout du môle à St Nazaire* »¹⁶.

Le Zéro Hydrographique adopté en 1864 à Saint-Nazaire va rester le même jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle. Suite à une demande de renseignements sur la cote du zéro du marégraphe de Saint-Nazaire faite par l'ingénieur des Ponts et Chaussées du Service Maritime de Saint-Nazaire, l'ingénieur hydrographe en chef Villain, dans sa lettre datée du 26 Mai 1937 (n°281 S.H. 6, Archives SHOM) indique que « *les missions qui ont été faites en Loire depuis 1864, en 1881, 1893, 1901, 1910 et 1925 ont pris le même niveau de réduction que Bouquet de la Grye qui est le zéro des cartes marines et de l'annuaire des marées adopté par le Service Central Hydrographique* ». Dans cette même lettre, il est noté que « *le niveau de réduction des sondes de Saint Nazaire a été fixé définitivement en 1864 [...] à 2m08 au-dessous du zéro du nivellement Bourdalouë. Cette cote figure dans l'annuaire des marées de 1899 qui donne également + 6m37 pour la hauteur au-dessus du zéro du Nivellement Bourdalouë de la surface supérieure de la tablette près de l'escalier au bout du môle et indique que ce repère est 8m45 au-dessus du zéro de m'annuaire et des cartes* ». Il est également rappelé que le 4 Juin 1903, le directeur du Nivellement Général faisait connaître au SH que « *la correction à retrancher des cotes Bourdalouë pour obtenir les altitudes rapportées au zéro normal du Nivellement Général de France [Lallemand] était de 0m95 à Saint-Nazaire* ». En se basant sur ces informations, **la cote du zéro hydrographique -2,08 m Bourdalouë est remplacée par la cote -3,03 m Lallemand** depuis 1932, dans les annuaires des marées.

Si le ZH est resté inchangé depuis 1864, il n'en demeure pas moins que sa définition s'est révélée être imparfaite. En effet, dès 1865 l'observateur des marées Chazal rapporte dans le journal des marées¹⁷ que « *Le zéro des échelles des Ponts-et-Chaussées [...] est encore trop élevé, car il a vu des basses mers descendre de quelques centimètres au-dessous.* », alors même que ce zéro est 17 centimètres plus bas que le ZH adopté par le Service hydrographique pour la Loire (cf. Figure 26). Le plan du port de Saint-Nazaire tiré de l'atlas des ports de France, publié en 1883 font également état de ces niveaux remarquables : « *Nota : Le niveau de plus basses mers est à [...] 0.07 m au-dessous du zéro des cartes marines et à la cote -2.153 m du nivellement général de la France* ».

Le zéro hydrographique historique de Saint-Nazaire étant coté au-dessus des plus basses mers astronomiques, cela pouvait porter atteinte à la sécurité des navigateurs. A

¹⁶ 7 JJ –Cahier 1213 : « 1864, Marées de la Loire rapportées au zéro du marégraphe de St Nazaire, n°2 – cahier 71 » ; SHD Rochefort.

¹⁷ Journal bimensuel des marées, Février 1865 ; Archives SHOM.

compter **du 1^{er} janvier 1996**, le SHOM a décidé exceptionnellement de modifier les ZH de tous les ports appartenant à la zone de marée « Abords de Saint-Nazaire » dans le but de les rendre conformes à leur définition théorique. Ainsi, une correction de -40 cm a été appliquée au ZH du port de Saint-Nazaire, portant alors sa cote à **-3,43 m NGF** Figure 27. Par la suite, ce référentiel vertical sera appelé **ZH96**.

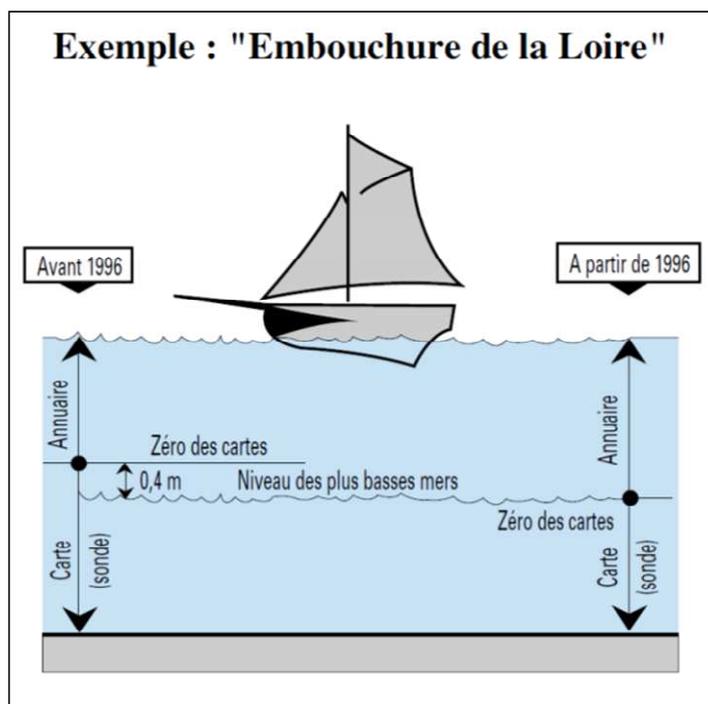


Figure 27 : Redéfinition du Zéro Hydrographique aux abords de Saint-Nazaire en 1996.

Dans les derniers annuaires de marée, il est donc indiqué : « A Saint-Nazaire, le zéro hydrographique est situé à 9,252 m au-dessous du repère N.G.F. n° O.KS-69 scellé à la base du phare du Vieux Môle, et coté + 6.092 m I.G.N. 1969 (année de détermination de la cote du repère 2010). Ce zéro est donc à 3.160 m au-dessous du zéro du système I.G.N. 1969 ».

IV.3.1.2 Suivi du zéro du marégraphe depuis 1863

Lors de l'installation du marégraphe à Saint-Nazaire **en 1863**, le zéro de l'appareil a été réglé pour être conforme au plan de référence donné dans l'annuaire de marée de cette même année, à savoir à « 8.35m à peu près au-dessous de la surface supérieure de la tablette près de l'escalier au bout du môle ». Dans un brouillon d'étude portant sur les niveaux de référence adoptés successivement à Saint-Nazaire, rédigée en 1944 par l'ingénieur hydrographe Roumégoux (archives du SHOM), ce dernier justifie l'emploi des mots "à peu près" par le fait que « la surface [de la tablette] est sans doute assez inégale ».

Dans les annuaires de marée anciens de 1852 à 1897, les prédictions de hauteurs d'eau à Saint-Nazaire sont effectuées par rapport à ce plan de référence. Dans les journaux bimensuels de marée, l'observateur des marées Chazal, en activité entre 1863 et 1880, mentionne parfois ce zéro dans ses commentaires et confirme donc sa coïncidence avec le zéro des annuaires de marée :

- Février 1865 : « *Le zéro du marégraphe correspond toujours exactement à 8m35 au dessous de la surface supérieure de la tablette près de l'escalier au bout du môle. Le zéro des échelles des Ponts-et-Chaussées est à 8m62 au-dessous de cette même surface, par conséquent, il est 27 centim. plus bas que celui du marégraphe ou de l'annuaire des marées, encore Mr Leferme prétend qu'il est encore trop élevé, car il a vu des bafses mers descendre de quelques centimètres au-dessous.* »
- Janvier 1875 : « *L'échelle des marées placée à l'extérieur ne peut plus servir, elle est illisible et en même temps elle a glissé le long du mur. Pour la concordance de l'échelle du marégraphe, je me base seulement sur l'échelle de l'intérieur du puits, dont le zéro est le même que celui de l'annuaire des marées.* »
- Janvier 1877 : « *Le zéro de l'échelle du marégraphe est situé à 8m35 au-dessous de la surface supérieure de la tablette près de l'escalier du bout du môle. Ce zéro est de 0m27 plus élevé que celui de l'échelle des Ecluses.* »

Malheureusement, les successeurs de M. Evain n'ont pas pris la peine de noter sur les registres destinés au Service hydrographique les comparaisons prises sur l'échelle de contrôle aucune de ces comparaisons n'est trouvée jusqu'en 1920, date à partir de laquelle le S.H. ne reçoit plus les observations marégraphiques de St-Nazaire.

Ainsi, le zéro instrumental du marégraphe a été défini à l'origine comme étant 10 centimètres plus haut que le zéro hydrographique coté à Saint-Nazaire en 1864 à – 2,08 m NGF Bourdalouë (cf. §IV.3.1.1). Sur le plan du port de Saint-Nazaire tiré de l'atlas des ports de France publié en 1883, un nota précise que le zéro de l'annuaire des marées (et par conséquent celui du marégraphe) est 0m10 au-dessus du zéro des "dernières" cartes marines.

Dans un besoin de cohérence et pour simplifier les choses, le Service hydrographique a redéfini **en 1898** le zéro de l'annuaire des marées comme étant : « *8.45m au-dessous de la surface supérieure de la tablette près de l'escalier au bout du môle* », le mettant donc en accord avec le ZH. Dans ce même annuaire de marées, il est clairement indiqué que le zéro du marégraphe est identique au zéro de l'annuaire, soit coté à – 2,08 m NGF Bourdalouë. Depuis cette époque, le SH n'a cessé d'admettre que le zéro du marégraphe avait gardé cette définition, dont la cote -2,08m Bourdalouë est remplacée par la cote -3,03m Lallemand depuis l'Annuaire de 1933.

Par conséquent, depuis 1898 le zéro instrumental du marégraphe aurait dû être abaissé de 10 centimètres pour être en conformité avec les instructions officielles. Dans les faits, de nombreux documents semblent indiquer que cela n'a pas été le cas.

Dans une lettre datée du **6 Avril 1944** (Archives SHOM) sur le réglage instrumental en hauteur du marégraphe de Saint-Nazaire, si l'ingénieur des Travaux Publics de l'Etat confirme bien que **le zéro du marégraphe de St-Nazaire est réglé pour correspondre à l'altitude -3.03 m NGF**, il note que cela semble n'être le cas que **depuis le 20 Janvier 1938**. Il explique que ce réglage est obtenu en mesurant la distance verticale entre le plan d'eau dans le puits et un repère d'altitude connu, à savoir le dessus d'une traverse horizontale en bronze située en travers de l'orifice supérieur du puits et supportant le galet de retour d'équerre du fil du flotteur, dont l'altitude a été déterminée le 12 juillet 1939 comme étant égale à 9.331m CM₆₄ (cote marine, soit au-dessus du ZH défini en 1864), soit 6.301m NGF.

Il émet néanmoins des réserves quant à la réalité de ce réglage avant cette date, en se basant notamment sur des mesures de cette cote supérieure de la traverse en bois servant au réglage du marégraphe. Il explique que cette traverse en bronze a remplacé, en Novembre 1938, celle en bois initialement présente en prenant soin de la placer à la même altitude et il rappelle que :

- Une note du **23 Juillet 1914** de M. l'ingénieur ordinaire Prevot, adjoint du Directeur du NGF dit que la différence de niveau entre le repère 0.ks.69 (alt. = 5.813 NGF) et **la partie supérieure d'une traverse en bois établie sur le puits du marégraphe servant au contrôle du zéro de ce dernier** est 0.494m, soit **une altitude 6.307m NGF** pour ce qui est de la traverse, **soit 9.337m CM₆₄**.

- Avant de procéder à ce changement, **un nivellement du dessus de cette traverse en bois avait été réalisé le 18 Janvier 1938** à partir du repère 69 et avait donné **6.302m N.G.F, soit 9.332m CM₆₄**.

Les faibles différences d'altitudes mesurées à ces différentes époques (chronologiquement : 9.337, 9.331 et 9.332 C.M.) permet à l'auteur de la note de conclure que **« l'altitude de la traverse établie à l'orifice du puits et servant de base pour le réglage du marégraphe est demeurée invariable au moins depuis 1914. »**. Ensuite, il rapporte différentes constatations semblant indiquer réglage constant du marégraphe entre 1914, au moins, et 1938 :

- « La note du 23 Juillet 1914 de M. l'Ingénieur Ordinaire Prevot [...] dit que le zéro du marégraphe est à 9m20 au-dessous de la traverse »
- « En janvier 1938 nous avons trouvé dans le poste du marégraphe une instruction affichée au mur, non datée, ni signée, disant textuellement "Hauteur du bord supérieur de la traverse du puits par rapport au zéro des marées = 9m20" ». Il est également rappelé dans cette note que cette côte a été rectifiée par M. l'Ingénieur en Chef Marti le 1^{er} Juillet 1934 et ramené à la cote 9^m25.

Or, il est fort vraisemblable que cette traverse en bois corresponde à celle utilisée depuis 1863 par les observateurs des marées pour le réglage du marégraphe et dont la cote est conforme, à 2 cm près à ce qu'a décrit Chazal lors du lancement des mesures : « Ce point c'est le bord supérieur de la traverse en bois qui supporte la poutre du fil du flotteur ; il est à 9 mètres 22

centim. au-dessus du zéro des marées ; par conséquent, il est élevé de 87 centimètres au-dessus du Plan indiqué dans l'Annuaire ».

Cette différence entre les zéros de 1863 et de 1914, et celui de 1938, ne varie que de 11 à 13 centimètres en fonction de la source considérée, ce qui relativement constant semble correspondre aux 10 cm environ de différence donnée dans les annuaires de marée (8,45m et 8,35m « à peu près »). Ainsi, il est fort probable que le zéro instrumental utilisé en 1914 était toujours celui de 1863.

Il semble alors presque évident que jusqu'au 1^{er} Juillet 1934 au moins le marégraphe s'est trouvé la plupart du temps réglé sur le plan de référence correspondant au zéro instrumental adopté initialement au lieu de l'être sur le ZH ainsi que le croyait le SH depuis 1898. D'ailleurs, l'ingénieur des TPE en arrive également à cette conclusion dans sa lettre datée du 6 Avril 1944. Il indique également que selon toutes vraisemblances l'altitude du zéro du marégraphe était de **-2^m95 NGF** ($-3.03 + (9.33 - 9.25)$)¹⁸ **entre le 1^{er} Juillet 1934 et 1^{er} 20 Janvier 1938 ;**

A partir de 1938, le zéro du marégraphe a été réglé pour correspondre au zéro des cartes et de l'annuaire, soit -3,03m NGF. Ceci est par exemple confirmé dans un courrier¹⁹ daté du 7 décembre 1942, de l'ingénieur hydrographe Roumégoux pour l'ingénieur des Ponts et Chaussées de Nantes, M. Desbazeille : « Vous m'avez indiqué la cote du zéro auquel sont rapportées les observations du marégraphe de Saint-Nazaire, savoir 3m03 au-dessous du N.G.F. Lallemand : c'est bien également la cote que donne le Service Hydrographique pour zéro des cartes et de l'annuaire ». Cette cote restera constante jusqu'en 1996, et cela malgré la relocalisation du marégraphe en 1950. Au cours des années 1950, lors de l'utilisation du marégraphe « château », cette information est même imprimée directement sur les feuilles à installer sur le rouleau enregistreur (Figure 28).



Figure 28 : Indications présentes sur les marégrammes "Château" utilisés à Saint-Nazaire. (Extrait du marégramme du 16 au 31 août 1954, GPM-NSN)

Des opérations de rattachement au réseau NGF du marégraphe de Saint-Nazaire ont été effectuées du 17 au 19 juillet 1957 par l'IGN. Dans ce but, il a été effectué des comparaisons entre des hauteurs d'eau enregistrées par le marégraphe et celles lues à l'échelle de marée dont le zéro correspondait parfaitement aux ZH. Dans son compte-rendu du 8 juillet 1957, l'ingénieur géographe en chef Descossy indique que le zéro du marégraphe Brillié et de son

¹⁸ 9.33m correspond à l'altitude de la traverse par rapport au zéro de réduction des sondes (C.M.) déterminée en 1914 et 1938. 9.25m correspond à la rectification de la cote par M. l'Ingénieur en Chef Marti en 1934.

¹⁹ Archive SHOM. Document n°59 S.H.6

répétiteur sont respectivement de -3.018 m et -3.028 m NGF. La différence dont la moyenne était de +/- 5 mm est due selon lui à « la sensibilité du déclencheur électrique qui ne transmet les impulsions que les centimètres »

Le réglage du zéro instrumental du marégraphe est modifié lors du changement du ZH de Saint-Nazaire en 1996 dans le but de rester en accord avec ce dernier.

IV.3.1.3 Synthèse

Grâce à l'analyse des documents historiques, il est possible de suivre les relations entre les différentes références verticales utilisées à l'observatoire des marées de Saint-Nazaire depuis le début du 19ème siècle (Figure 29).

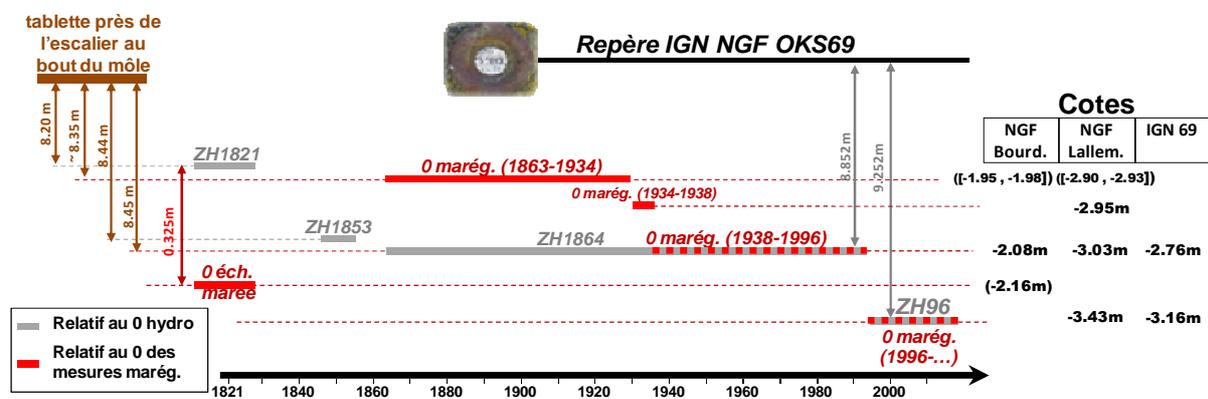


Figure 29 : Schéma synthétisant les relations entre les différentes références verticales utilisées à Saint-Nazaire depuis le début du 19ème siècle.

Les cotes données entre parenthèses ont été déduites.

Malgré la quantité importante de documents analysés, il subsiste encore des doutes ou des imprécisions quant aux corrections à apporter pour rendre cohérente la série marégraphique de Saint-Nazaire. En effet, nous avons vu qu'il était parfois délicat de connaître avec certitude les altitudes des niveaux de références car les métadonnées peuvent fournir des informations incohérentes entre elles.

Ainsi, la correction à apporter pour que les mesures marégraphiques réalisées entre 1863 et 1934 soient rapportées au ZH de l'époque (ZH1864) est comprise entre 10 et 13 cm selon les sources d'informations. Cette dernière est vraisemblablement constante au cours du temps, et les différences de quelques centimètres pourraient être expliquées par des imprécisions liées à la mesure (surface de la traverse irrégulière, ZH défini aux centimètres près en 1863 (« ... 8,35m "à peu près" »), ...). Pour la suite de l'étude, il a été décidé de considérer un décalage moyen conforme à ce qui est indiqué initialement par le premier observateur des marées, M. Chazal loué pour son professionnalisme, à savoir 11 centimètres, mais il est important de garder à l'esprit cette incertitude de 3 cm.

Pour les mesures réalisées entre 1934 et 1938, il n'a été trouvé qu'un document faisant état du zéro instrumental d'alors. Pour la suite de l'étude, il a été décidé de suivre les conclusions de ce dernier, mais il est important de noter qu'il est possible qu'elles soient erronées car elles ne sont que le résultat d'une analyse à posteriori de l'auteur.

A partir de 1938, les doutes sont moindres et l'altitude du zéro du marégraphe est vérifiée régulièrement.

IV.3.2. Stabilité des repères de nivellement

La connaissance de l'évolution dans le temps des plans de références verticales, à savoir le ZH et le zéro du marégraphe, est basée sur leur relation à plusieurs repères terrestres. Il est donc nécessaire de vérifier la stabilité de ces derniers au cours du temps afin de s'assurer qu'une partie des variations sur le long terme du niveau marin ne soit pas due à des mouvements verticaux terrestres.

A Saint-Nazaire, les ouvrages portuaires sont établis sur un socle rocheux qui, à priori, offre une certaine stabilité, à l'exception de potentiels mouvements à grande échelle d'origine orogénique ou liés au rebond postglaciaire. Néanmoins, pour s'assurer de cette invariabilité, l'évolution de plusieurs repères terrestres, localisés en Figure 30-A et -B, a été analysée en se basant sur le suivi des dénivelés entre ces différents repères.

Grâce à la recherche d'archives documentaires, il a été possible d'étudier l'évolution de l'altitude des différents repères terrestres en se basant sur des fiches de nivellement de l'IGN lorsque disponibles, ou des notes provenant souvent du Service Maritime des P&C faisant référence à l'altitude des repères. Pour la période plus récente, le SHOM a également régulièrement effectué des nivellements pour renseigner les Fiches d'Observatoire des Marée (FOM) et s'assurer de la stabilité de ce dernier. Le suivi historique des repères s'est parfois avéré délicat à Saint-Nazaire car de nombreux ont été détruits pendant la 2nde Guerre Mondiale.

L'ensemble des données retrouvées est synthétisés dans le Tableau 3.

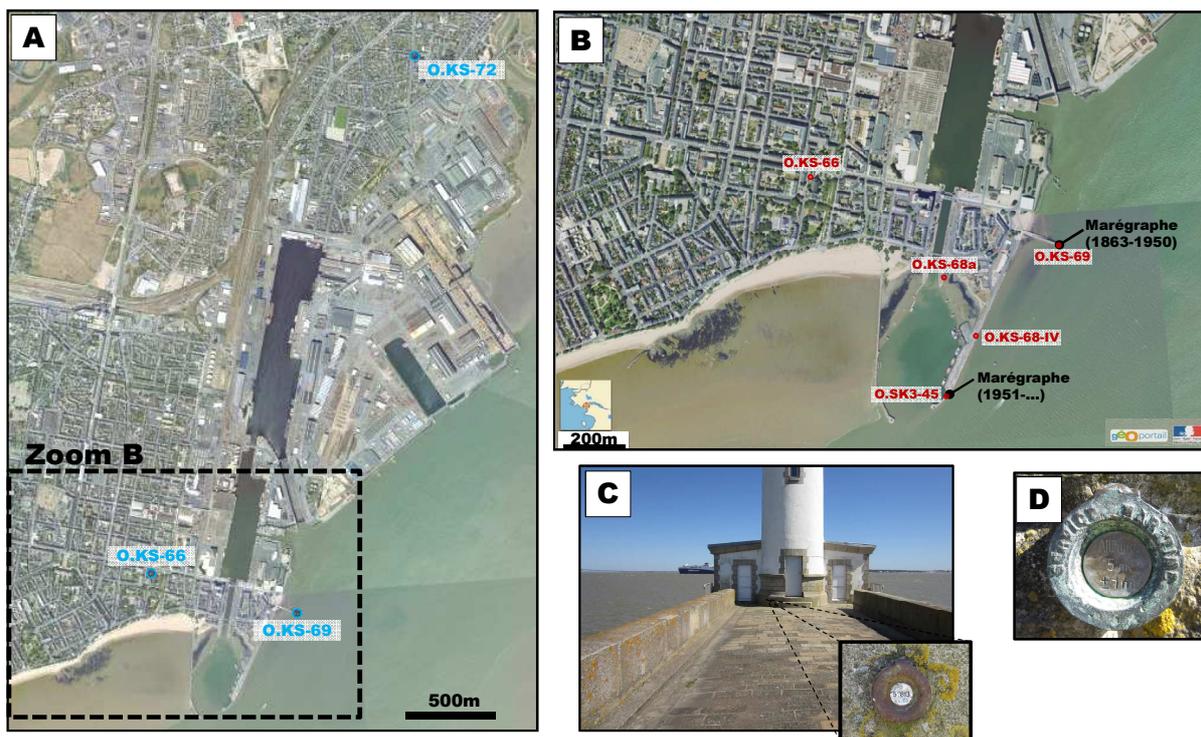


Figure 30 : Localisation des repères terrestres utilisés dans la zone portuaire de Saint-Nazaire.

A. Plan général ; B. Groupe de repères SAINT-NAZAIRE ; C. Repère fondamental O.KS-69 ; D. Douille du repère O.SK3-45.

Tableau 3 : Evolution de l'altitude des repères terrestres à proximité du marégraphe de Saint-Nazaire.

Seules les cotes/altitudes issues des sources citées sont notées selon le réseau en cours à l'époque. Lorsque les sources sont identifiées avec un astérisque (*), les altitudes sont issues de détermination (fiches de nivellement / fiches géodésiques). Les valeurs en rouge correspondent aux dernières déterminations.

Id. SHOM		-			A			B			C			D			F					
Id. IGN		IGN O.KS - 72			IGN O.KS - 66			IGN O.KS - 69			IGN O.KS 68a			-			IGN O.K.S3-45			IGN O.KS-68-IV		
Source		Repère scellé sur l'église à Méan			Repère scellé sur l'église			Repère scellé horizontalement à la base du phare du vieux Mole. Repère fondamental.			repère scellé sur la face Ouest du bâtiment de l'Usine Elévatoire.			Repère du Service Maritime scellé sur le parapet de la jetée Est près du marégraphe			Repère scellé horizontalement dans le mur de digue du marégraphe.			Repère du Port Atlantique Nantes Saint-Nazaire n° SN-DIG-RM21 scellé horizontalement dans le mur de la digue Est, sur la façade Ouest.		
Année	NGF	IGN69	ZH96	NGF	IGN69	ZH96	NGF	IGN69	ZH96	NGF	IGN69	ZH96	NGF	IGN69	ZH96	NGF	IGN69	ZH96	NGF	IGN69	ZH96	
IGN 1912-1914	-	-	-	-	-	-	5.813	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Barbier (IGN) 1937-39	-	-	-	8.849	-	-	5.813	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
P&C 1950	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.266	-	-	4.965	-	8.395	-	-	-	-	-	-	
IGN(*) 1957	6.127	-	-	8.856	-	-	5.822	-	-	5.266	-	-	-	-	-	4.967	-	-	-	-	-	
SHOM 1961	-	-	-	-	-	-	5.822	-	9.252	-	-	-	-	-	-	4.965	-	8.395	-	-	-	
P&C 1968	-	-	-	-	-	-	5.822	-	9.252	5.266	-	8.696	4.965	-	8.395	-	-	-	-	-	-	
IGN(*) 1973-1975	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.539	-	-	-	-	-	-	5.239	-	-	-	
SHOM 1997	-	-	-	-	-	-	5.822	-	9.252	5.266	-	8.696	4.965	-	8.395	-	-	-	-	-	-	
IGN(*) 1998	-	6.397	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SHOM 2007	-	-	-	-	-	-	-	-	9.252	-	-	-	-	-	-	-	-	8.398	-	-	9.005	
SHOM 2008	-	-	-	-	-	-	-	-	9.252	-	-	-	-	-	-	-	-	8.398	-	-	9.007	
IGN(*) 2010	-	-	-	-	9.128	-	-	6.092	-	Repère détruit			-	-	-	-	5.239	-	-	5.847		
SHOM 2014	-	-	-	-	-	-	-	-	9.252	-	-	-	-	-	-	-	-	8.400	-	-	9.008	
IGN(*) 2015	-	-	-	-	9.128	-	-	6.092	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.241	-	-	5.848	

Les écarts ortho-normale ont été calculés à partir de l'ortho la plus récente et de la normale la plus ancienne pour les repères O.KS – 66, O.KS - 68a et O.KS - 69. La constante obtenue

varie selon le repère considéré entre 0.271 et 0.273 m, ce permet de dire que le changement de système (du NFG-Lallemand au IGN69) n'introduit pas de biais (A. Coulomb, *comm. pers.*).

Dans un premier temps, la stabilité à « large » échelle est analysée par la comparaison des repères les plus distants (O.KS. 66, 69 et 72, localisation Figure 30-A). Les plus anciennes cotes concomitantes retrouvées datent d'un nivellement de 1958. Lorsque les dénivelés de ces dernières sont comparés à ceux des dernières déterminations d'altitude, on se rend compte que la zone portuaire de Saint-Nazaire semble, à 2 mm près, très stable sur la période considérée (Tableau 4).

Tableau 4 : Evolution des dénivelés à l'échelle de la zone portuaire de Saint-Nazaire.

	Dénivelé (OKS72 - OKS66)	Dénivelé (OKS72 - OKS69)	Dénivelé (OKS66 - OKS69)
1957	-2.729 m	0.305 m	3.034 m
1998-2015	-2.731 m	0.305 m	3.036 m
Différence	0.002 m	0.000 m	-0.002 m

Le repère fondamental de l'observatoire de Saint-Nazaire, le repère O.KS-69 situé au pied du phare du vieux Môle, semblant être stable au moins sur la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, les dénivelés de tous les repères ont été calculés par rapport à ce dernier (Figure 31). Selon toute vraisemblance, les repères C du SHOM et IGN O.SK3-45 correspondent à un seul et même repère. En effet, ils sont caractérisés par les mêmes cotes, pour une position coïncidente, et il est décrit comme par le SHOM comme correspondant à un repère du service maritime, ce qui trouve être effectivement le cas du repère IGN O.SK3-45 (*cf.* douille en Figure 30-C).

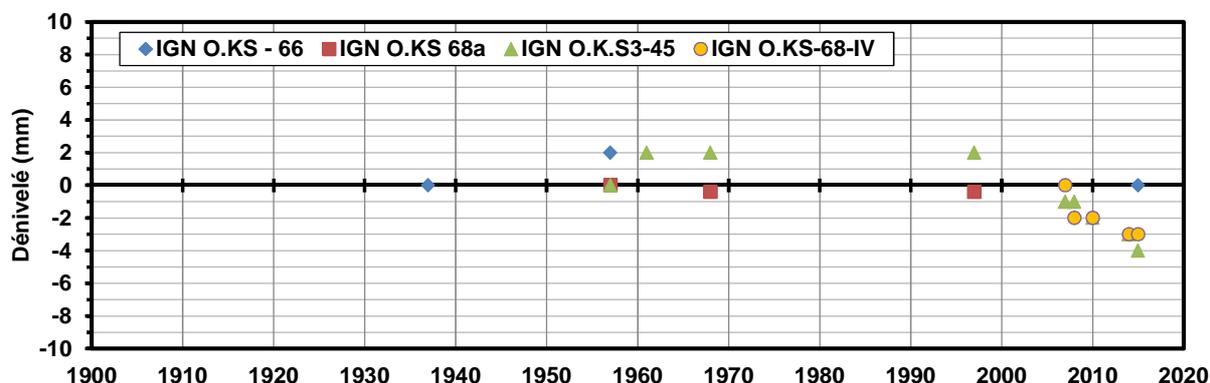


Figure 31 : Evolution des dénivelés entre le repère fondamental (O.KS-69) et les autres repères appartenant au groupe SAINT-NAZAIRE (Localisation en Figure 30-B).

Le 0 des ordonnées correspond, pour chaque repère étudié, au premier dénivelé calculé entre ce dernier et le repère fondamental.

L'analyse de la Figure 31 permet de rendre compte de la stabilité de la zone au cours du 20^{ème} siècle : les différences de dénivelés, lorsqu'il y en a, sont largement inférieures au centimètre et sont caractérisées par des valeurs millimétriques. Néanmoins, sur la période récente (1997 – aujourd'hui), la jetée sud du port de Saint-Nazaire (repères O.KS-68-IV et O.SK3-45) semble être sujette à un léger affaissement (de l'ordre de 0.3 mm/an). Ce constat est à considérer avec modération car coïncide avec l'incertitude des mesures.

Pour ce qui est de la stabilité de la zone au 19^{ème} siècle, moins de données précises ont été retrouvées. Ainsi, il n'a pas été possible d'effectuer des calculs de dénivelés avec des objets fixes plus distants sur les temps historiques. Etant donné que la zone est stable au 20^{ème} siècle, nous supposons dans la suite de l'étude que c'était également le cas auparavant.

IV.4. Suivi des systèmes de temps utilisés

Le système temporel utilisé pour dater ces dernières a évolué au cours du temps historiques : du Temps Solaire Vrai (TSV) au Temps Solaire Moyen du lieu (TSM), au GMT, TU, UTC.

Au début des mesures, en janvier 1863 (et même en 1821), les mesures de temps se basent sur le mouvement apparent du Soleil observé à Saint-Nazaire et le temps est indiqué en Temps Solaire Vrai.

Dans le journal bi-mensuel de marées de Janvier-Fevrier 1894, l'observateur indique que « *Suivant ordres reçus, la pendule du marégraphe de St-Nazaire a été mise à l'heure Temps Moyen du Lieu, le 1er Janvier 1894 à midi* ». Ceci va perdurer au moins jusqu'en 1920 (derniers registres archivés au SHOM) comme le laissent à penser les registres de marées sur lesquels l'heure est toujours indiquée selon le Temps Solaire Moyen. Aucune note n'indique le contraire dans les journaux bi-mensuels de marée.

V. Reconstruction de la série marégraphique historique de Saint-Nazaire

V.1. Inventaires et détails des mesures

Grâce à la recherche documentaire effectuée dans différents centres d'archives, il a été possible d'identifier et de récupérer des registres de marée contenant des mesures de hauteurs d'eau réalisées à Saint-Nazaire dès 1821, soit plus de 40 ans avant la mise en place du marégraphe en 1863.

Au final, la totalité des documents retrouvés permet de couvrir une période longue d'environ 195 ans si sont considérées les mesures les plus anciennes (de 1821 à aujourd'hui), ou d'environ 150 ans si l'ère « marégraphe mécanique » est considérée (de 1863 à aujourd'hui). Une synthèse des documents inventoriés et récupérés dans l'ensemble des centres d'archives visités à ce jour est disponible dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Détail des documents de mesures marégraphiques historiques inventoriés et récupérés dans les différents centres d'archives.

(TSV : Temps Solaire Vrai ; TSM : Temps Solaire Moyen ; UTC : Temps Universel. Les lignes colorées correspondent aux données inédites)

Période	Durée effective	Instrument	Fréquence d'échantillonnage	Unité de mesure	Système de Temps	Type d'archives	Lieu d'archive
1821	4,5 mois	Echelle de marée	diurne-15 min	Pied-Pouce	TSV	Registres	SHD (Rochefort)
1853	- de 1 mois	Echelle de marée	diurne-10 min	métrique	TSV	Registres	
1863-1894	31 années	Marégraphe à flotteur	1 heure	métrique	TSV	Registres	SHOM (Brest)
1894-1900	6 années	Marégraphe à flotteur	1 heure	métrique	TSM	Registres	
1900-1920	21 années	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TSM	Registres / Marégrammes	
1925	4 mois	Marégraphe à flotteur	diurne-15 min	métrique	TU	Registres	SHD (Rochefort)
1932-1933	3 mois	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TU (+1)	Marégrammes	GPM Nantes Saint-Nazaire (Nantes)
1934	7 mois	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TU (+1)	Marégrammes	
1936-1937	23 mois	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TU (+1)	Marégrammes	
1940	1 année	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TU (+1)	Marégrammes	
1941	1 année	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TU (+1)	Marégrammes	
1941-1943	27 mois	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TU (+1)	Marégrammes	SHOM (Brest)
1943-1944	16 mois	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TU (+1)	Marégrammes	GPM Nantes Saint-Nazaire (Nantes)
1950-1964	15 années	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TU	Marégrammes	
1965-1986	22 années	Marégraphe à flotteur	(15 min)	métrique	TU	Données numériques	
1986-2007	21 années	Marégraphe à flotteur	(5 min)	métrique	TU	Données numériques	
2007-...	7 années ...	Marégraphe radar	(5 min)	métrique	TU	Données numériques	SHOM (Brest)

Etant donné le temps très important nécessaire à la réalisation d'une reconstruction marégraphique historique, surtout en ce qui concerne la numérisation des signaux analogiques, le travail détaillé par la suite a surtout porté sur les données de hauteurs d'eau inédites, à savoir de 1821 à 1964 (cf. Tableau 5). En effet, des données marégraphiques historiques de Saint-Nazaire étaient déjà disponibles au pas de temps horaire à partir de 1965 dans la base de données marée TDB du SHOM, et les niveaux moyens correspondant disponibles en ligne (SONEL, PSMSL). Ces mesures ont vraisemblablement été numérisées par le passé grâce à une table à digitaliser afin de pouvoir calculer les constantes harmoniques du port de Saint-Nazaire et ainsi permettre sa prédiction. A partir des années 1980, l'enregistrement des variations du niveau marin était directement réalisé au format numérique.

Les mesures diurnes effectuées en 1853 ne seront pas exploitées par la suite car présentant trop d'incertitudes quant aux dates et au zéro utilisé pour ces mesures.

V.2. Numérisation des documents

Une fois les données inventoriées et récupérées, la deuxième étape du travail consiste à numériser ces données afin de permettre par la suite leur mise à disposition, leur exploitation et leur analyse. La méthodologie employée pour réaliser cette tâche dépend du type de document traité.

V.2.1. Numérisation des registres papiers

L'ensemble des registres inventoriés a été numérisé au cours de la première année de travail. L'état de conservation des registres n'étant pas toujours bon et l'écriture des observateurs des marées étant plus ou moins lisible, la numérisation n'a pas pu être effectuée en utilisant un logiciel de reconnaissance de caractères et cette tâche a dû être réalisée manuellement. Ce sont donc plus de 500.000 valeurs de hauteurs d'eau qui ont été numérisées manuellement, ce qui correspond à environ 59 ans de mesures selon un pas de temps horaire (Figure 32).

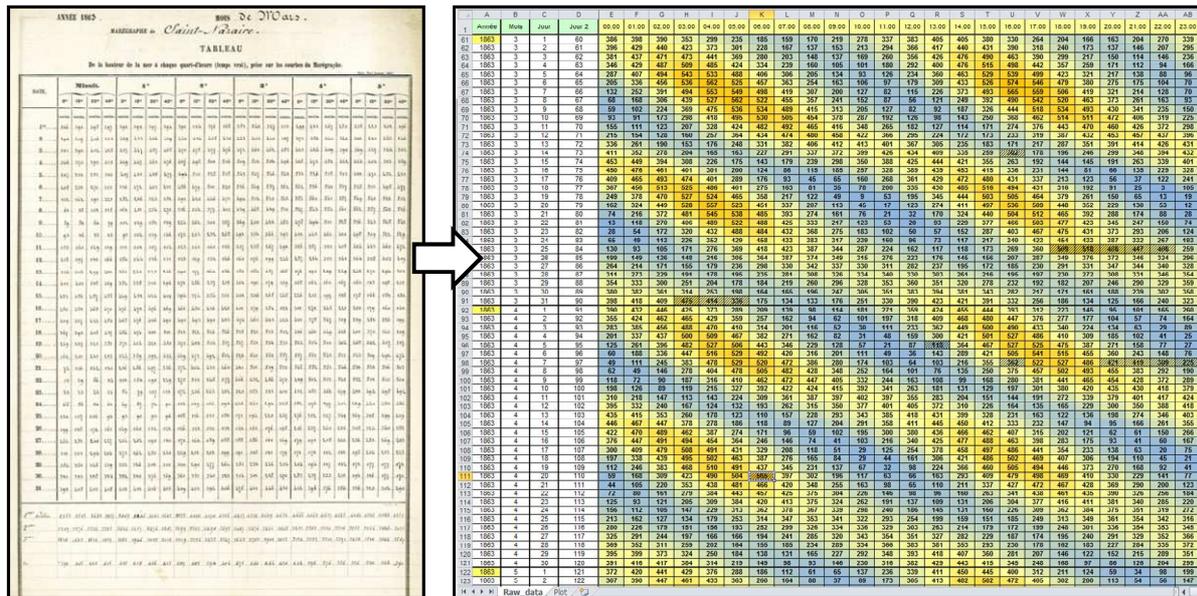


Figure 32: Illustration de la numérisation manuelle des registres de hauteurs d'eau.

Lors de ce travail long et fastidieux, des procédures de vérification ont été développées afin d'identifier les erreurs liées à la saisie et/ou les erreurs de retranscription faites par les observateurs de l'époque qui intervenaient surtout lors de l'extraction des hauteurs d'eau des marégrammes. Ces procédures de contrôle des données saisies consistaient en :

- Mettre en forme les cellules du tableau numérique, en temps réel, en leur assignant une couleur dépendante de la valeur de hauteurs d'eau saisie, ce qui facilite l'identification visuelle de variations de hauteurs semblant « anormales » entre des mesures voisines. Les bornes minimale et maximale de l'échelle de couleurs utilisée sont définies pour correspondre aux valeurs inférieures et supérieures respectivement, induisant donc un réajustement régulier. Ainsi, lorsqu'une valeur était incorrectement saisie et aberrante (ex : 1124 au lieu de 124 cm), la mise à jour automatique de l'échelle de couleur permettait de s'en rendre compte immédiatement et de rectifier.
- Tracer les courbes marégraphiques et les inspecter (par périodes de 1 à 2 jours) dans le but d'identifier graphiquement les potentielles anomalies.

Dès qu'une anomalie était identifiée, une vérification dans le registre papier était réalisée afin d'écarter toute éventuelle erreur liée à une mauvaise saisie, auquel cas l'erreur était immédiatement corrigée.

Grâce à ces procédures, environ 2000 anomalies non liées à la saisie ont pu être mises en évidence, soit 0,4 % du nombre total de données horaires digitalisées (Figure 33 -A. et -B.).

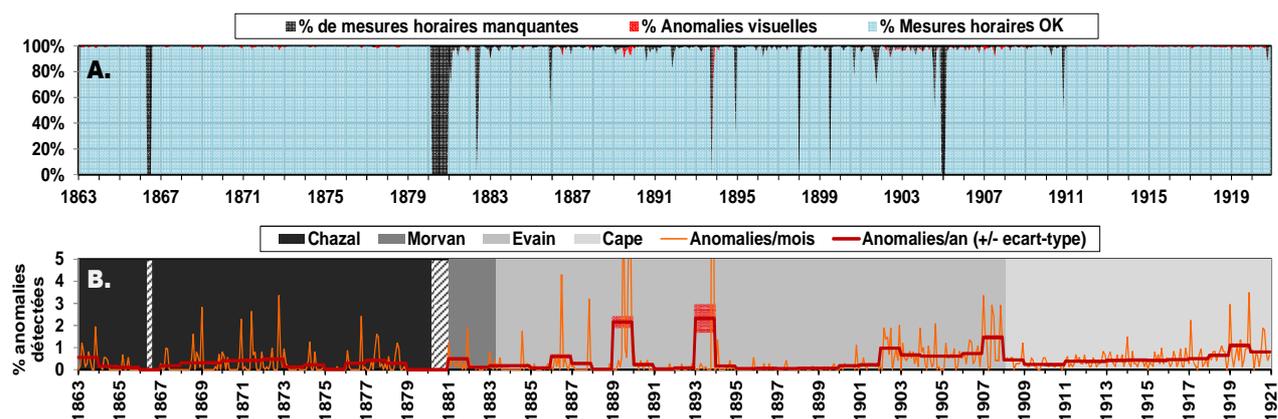


Figure 33 : Synthèse des registres digitalisés selon un pas de temps horaire.

A. Pourcentage des données disponibles/manquantes et des anomalies détectées lors de la saisie ; B. Succession des observateurs de marée et période d'exercice respective, et nombre d'anomalies par mois/an.

Le nombre d'anomalies détectées lors de la numérisation des registres est relativement faible : la majeure partie du temps, cela correspond à moins de 2 % du nombre de valeurs horaires par mois, soit moins d'environ 15 valeurs par mois (Figure 33 -B). Ce constat est un premier indicateur indirect de la qualité du travail des observateurs de l'époque.

Bien que d'une manière générale les données semblent être de bonne qualité, il est néanmoins possible de noter que les observateurs de marées étaient plus ou moins constants dans la rigueur apportée à la retranscription des hauteurs d'eau dans les registres. Par exemple, il est possible de noter que M. Evain semblait moins attentionné lors de cette tâche au cours des années 1889, 1893 et 1902-1908, caractérisées par des nombres d'anomalies supérieurs à la moyenne.

Lors de la correction/validation des données, une attention particulière a été portée aux périodes correspondant aux anomalies détectées lors de la numérisation.

La qualité des observateurs a également été appréhendée par l'étude de la distribution des valeurs des unités en cm reportées sur les registres par observateur (Figure 34). En effet, les registres de marées étant construits à partir de la lecture des marégrammes, l'observateur pouvait être plus ou moins consciencieux et un certain systématisme pouvait se mettre en place lorsqu'une même personne effectuait ce travail. Ce n'est pas le cas pour les observateurs Chazal, Morvan et Pape : la distribution est homogène et aucune valeur ne semble être privilégiée, ce qui implique une précision centimétrique dans l'extraction des hauteurs d'eau. A l'inverse, l'observateur A. Evain semble être là encore légèrement moins rigoureux : les valeurs 0 et 5 tendent à être plus utilisées que les autres, ce qui signifie que M. Evain avait plus facilement tendance à arrondir et implique une précision moindre dans l'extraction des hauteurs d'eau (environ 2 – 2,5 cm).

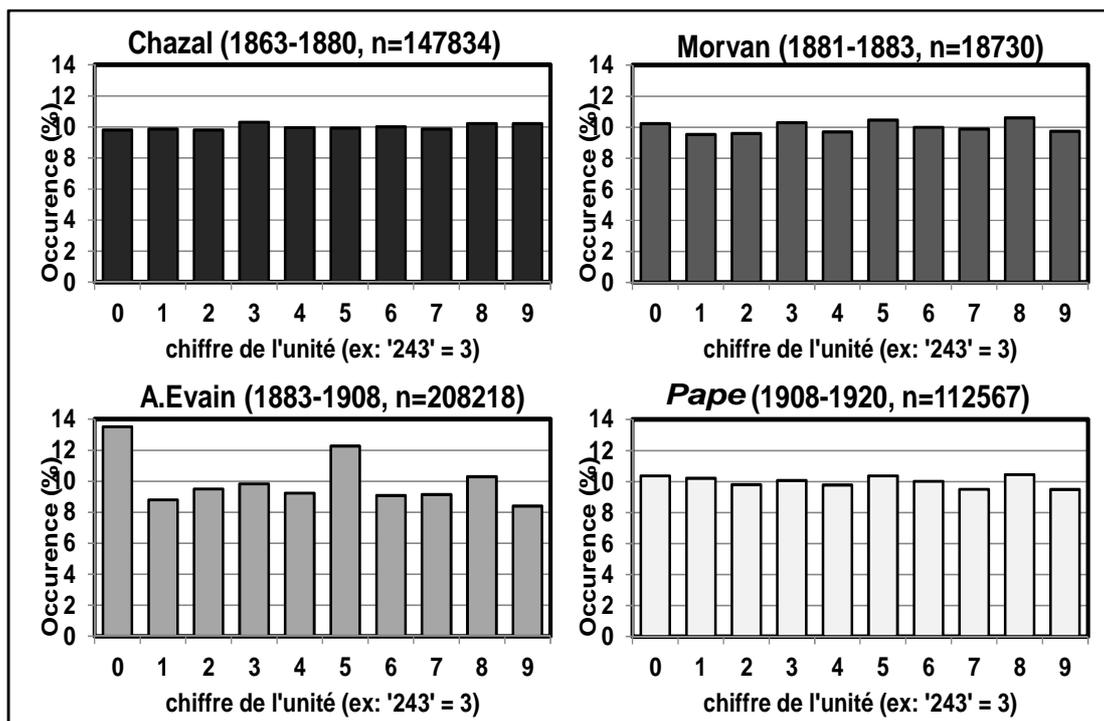


Figure 34 : Distribution des valeurs des unités en cm reportées sur les registres en fonction des observateurs des marées

Cette étude des distributions a également été faite à partir des mesures obtenues en 1821 grâce à la lecture des hauteurs d'eau, en pieds et pouces, à l'échelle de marée. La distribution en pouces de ces mesures montre une légère tendance à la surutilisation des valeurs 0, 3, 6 et 9 (Figure 35). Pour cette période, la précision des hauteurs est donc de +/- 1.5 pouces, soit environ 4 cm (*cf.* § II.4.).

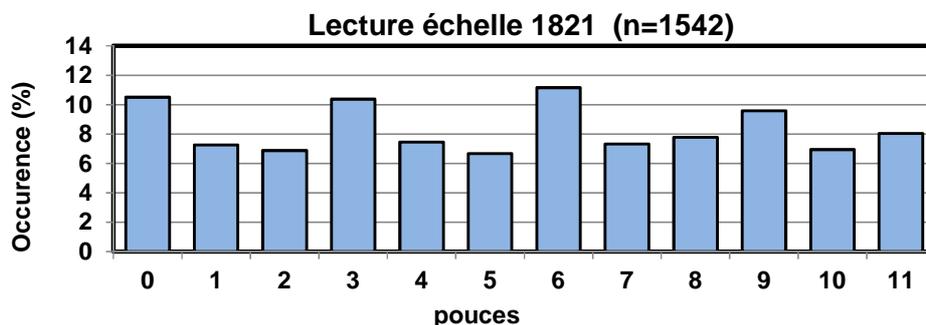


Figure 35 : Distribution des valeurs en pouces pour les hauteurs d'eau lues à l'échelle de marée en 1821

V.2.2. *Numérisation des marégrammes*

A la différence des registres pour lesquels il était possible d'extraire les données directement du document papier, les marégrammes nécessitent d'être scannés avant l'extraction du signal. La « difficulté » de cette tâche résidait surtout dans l'état de conservation parfois mauvais des marégrammes et dans leurs dimensions.

Une attention particulière a été apportée aux marégrammes en très mauvais état : ils ont parfois dû être restaurés avant scannage, et une procédure a été mise en place afin de les dématérialiser sans les dégrader davantage. Pour cela, un scanner à défilement grand format (financé par le SOERE SONEL²⁰) a été utilisé. En moyenne, un jour est nécessaire pour scanner les marégrammes couvrant une année. Cette durée est fonction de l'état de conservation et de la taille du document, et de la présence ou non de documents annexes à désagrafer avant toute manipulation.

Le fichier numérique issu de ce processus de scannage doit être en format « .tif » car plus facilement traitable par NUNIEAU par la suite. La définition des images scannées varie en fonction des dimensions du marégrammes, l'objectif étant de trouver un compromis entre la résolution à adopter et la taille numérique du fichier final. Dans l'idéal, cette dernière doit être de l'ordre de 50-100 Mo pour que le traitement sous NUNIEAU ne soit pas trop lourd. La taille des marégrammes étant régulièrement importante, les résolutions choisies étaient souvent comprises entre 100 et 200 ppp.

Lors du projet, l'ensemble des marégrammes papiers que nous avons à notre disposition, exception faite des rouleaux de plusieurs mètres de longs dont les données sont déjà au format numérique, a été scanné, ce qui correspond à plus de 1 km de documents.

Après avoir été scannés, les marégrammes doivent être numérisés afin d'extraire les données de hauteurs d'eau en fonction du temps. Pour cela, le logiciel NUNIEAU²¹ (NUMérisation des Niveaux d'EAU), développé par le CETE Méditerranée (CEREMA, depuis 2014), a été utilisé. Ce logiciel se trouve être la seule solution identifiée pour récupérer de façon semi-automatique des données anciennes de niveaux d'eau et de les rendre disponible/analysable au format numérique. Il se base sur un algorithme de reconnaissance des couleurs, ce qui permet de dissocier le signal de marée à extraire du fond de plan dès lors que les couleurs diffèrent. La finalité du traitement étant d'obtenir une série temporelle de hauteur d'eau la plus propre possible, il possède également des outils de calage altimétrique et temporel, et des outils de nettoyage. Afin d'utiliser au mieux les capacités du logiciel, une formation de 3 jours sur l'utilisation de celui-ci a été dispensée au SHOM par Frédéric Pons, développeur du logiciel.

²⁰ <http://www.allenvi.fr/groupe-transversaux/infrastructures-de-recherche/sonel>. Sonel est une des activités phare du PNAC 2010 (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Contenu-du-plan-national-d>)

²¹ <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Nunieau>, consultée en juin 2016.

Ce logiciel a initialement été développé pour effectuer un travail quasi-automatique. Néanmoins l'expérience a montré que l'automatisation de cette action est impossible dès lors que le marégramme à digitaliser comporte plusieurs signaux superposés, ce qui est le cas de quasiment tous les marégrammes relatifs à Saint-Nazaire (exemple en Figure 6-A). En effet, dans ce cas, il est délicat, voire impossible de définir automatiquement des « masques d'analyse » pour discriminer chaque courbe, et ce malgré des options prévues à cet effet mais qui se sont avérées souvent inefficaces. Pour pallier à ce souci, des « masques d'extraction » doivent être définis manuellement, ce qui a pour conséquence d'augmenter fortement le temps de traitement. Ainsi, environ deux semaines étaient nécessaires pour numériser une année de hauteurs d'eau (soit généralement 25 marégrammes de 15 courbes chacun).

Malgré cette déconvenue par rapport au calendrier prévisionnel, il a été décidé de poursuivre la numérisation grâce au logiciel NUNIEAU car ce dernier présente l'avantage de pouvoir extraire tout le signal une fois le masque défini, et par conséquent permet d'extraire les hauteurs d'eau selon un pas d'échantillonnage inférieur à une heure et modifiable *a posteriori*. De plus, si une erreur est identifiée, il est également possible de revenir facilement sur une digitalisation grâce au fichier de calage et ainsi gagner un temps précieux.

L'utilisation du logiciel se révèle être assez simple, et l'extraction du signal marégraphique nécessite plusieurs étapes (Figure 36) :

1- Le renseignement des métadonnées à associer aux mesures de hauteurs d'eau, telles que la date de début des mesures, les caractéristiques de la grille (nombre et valeur des carreaux unitaires selon x et y), commentaires optionnels, ... ;

2- Le calage du marégramme, à la fois en temps et en hauteur, grâce à la définition de points de calages dont les hauteurs et heures sont connues. Le logiciel met à disposition plusieurs outils permettant de vérifier la qualité de ce calage ;

3- La définition de la couleur à extraire d'après ses composantes de rouge, vert et bleu (valeurs RVB). La bonne définition de ces paramètres est primordiale pour ne pas trop extraire, ou au contraire ne pas assez extraire de pixels ;

4- Le nettoyage de l'image au cours duquel sont dessinées les zones à garder/exclure lors du traitement. Dans le cas d'un marégramme à courbes multiples, c'est au cours de cette étape qu'est défini le masque d'extraction.

Ce n'est qu'après avoir suivi cette procédure que l'image peut être traitée et le signal marégraphique extrait.

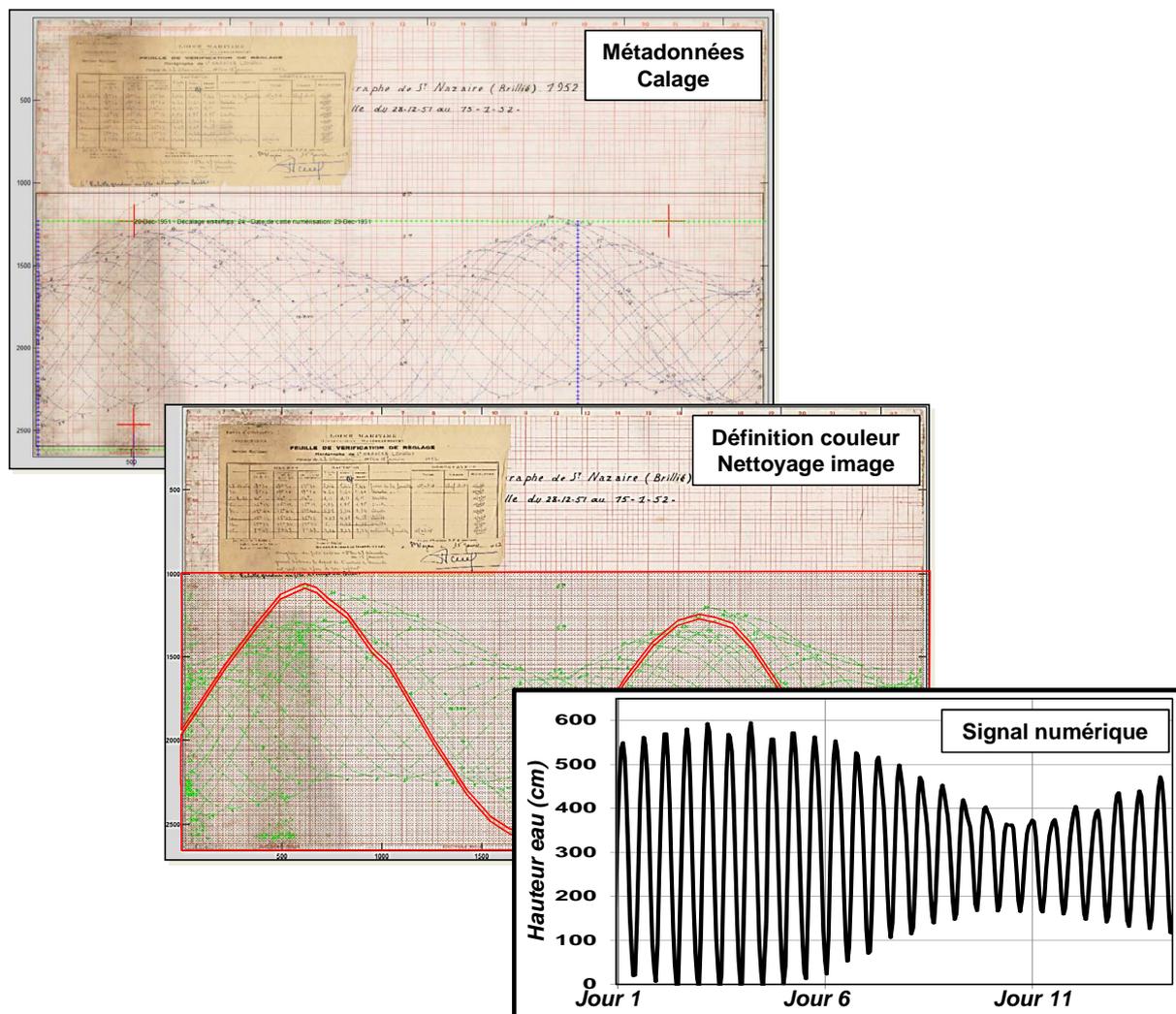


Figure 36 : Illustration des étapes à suivre pour digitaliser un marégramme avec le logiciel NUNIEAU.

Lors de cette présente étude, l'ensemble des marégrammes définis comme prioritaires car inédits a été digitalisé grâce à NUNIEAU. **Lors de ce travail, les marégrammes couvrant la période 1932-1965 ont été traités (environ 500 documents), ce qui a permis l'extraction de plus de 8000 courbes journalières de marée.**

Parallèlement à la numérisation des mesures de hauteurs d'eau, les feuilles de contrôles associées aux marégrammes ont toutes été retranscrites afin de pouvoir accéder par la suite aux potentiels réglages effectués par les observateurs de marée de l'époque. Ces feuilles de contrôle permettent également de valider les données car ils constituent un bon moyen pour identifier les périodes pour lesquelles les mesures sont *a priori* de bonne qualité (concordance des hauteurs d'eau mesurées par le marégraphe et celles obtenues simultanément sur l'échelle de marée ou le ruban gradué à l'intérieur du puits. Cf. Figure 9-C).

V.3. *Nettoyage/Correction des données numérisées*

Une fois les hauteurs d'eau brutes numérisées, et avant de rendre la série cohérente en temps et la rapporter selon la même référence verticale, les anomalies flagrantes identifiées lors de la numérisation ont été vérifiées, corrigées lorsque cela était possible, ou supprimées (Figure 37).

Pour les mesures issues des registres de marées, plusieurs centaines d'anomalies détectées grâce aux procédures mises en place lors de la numérisation (§ V.2.1) ont été analysées. Ces erreurs prenaient régulièrement l'apparence de sauts verticaux, affectant une ou quelques mesures successives, et correspondaient dans la majeure partie des cas à des erreurs de retranscription (exemple en Figure 37-B, erreurs de -100 cm). En effet, lors de la lecture des hauteurs d'eau sur le marégramme les observateurs pouvaient se tromper de centaines/dizaines (ex : 248 au lieu de 148 cm), la lecture des axes n'étant pas aisée du fait des grandes dimensions du document (jusqu'à 90 x 150 cm). Les observateurs pouvaient aussi se tromper de date, les courbes étant parfois difficile à suivre lorsque le marégramme couvrait plusieurs semaines de mesures. Lorsque l'origine de l'erreur est identifiée et que la correction à effectuer est sans ambiguïté (ex : erreur de lecture de l'observateur des marées de l'époque de 100cm lors de la retranscription, ...), les données brutes sont alors corrigées. Lorsque qu'il est délicat d'attribuer une cause à l'anomalie observée, ou de définir avec certitude la correction à apporter, les données suspectes sont supprimées.

En comparant plusieurs cycles de marée successifs, il est possible parfois d'observer des « sauts verticaux » semblant se mettre en place progressivement sur plusieurs heures, puis par la suite s'annuler de façon tout aussi progressive. A ce stade de l'analyse, aucune action n'a été réalisée sur ces données car l'origine de ces variations peut être naturelle. En effet, cela peut être lié aux variations des conditions atmosphériques à Saint-Nazaire : une baisse/hausse de la pression atmosphérique peut induire des surcotes/sous-cotes pouvant aller jusqu'à quelques dizaines de centimètres. Ce phénomène, ou effet du baromètre inverse, sera analysé plus en détail par la suite pour valider les données.

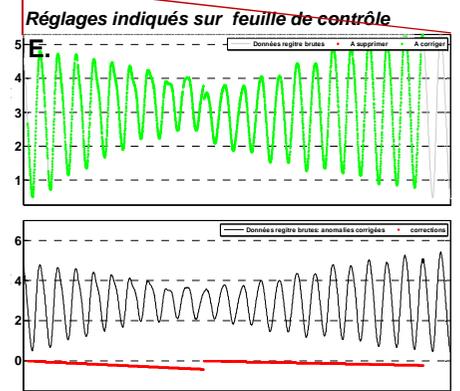
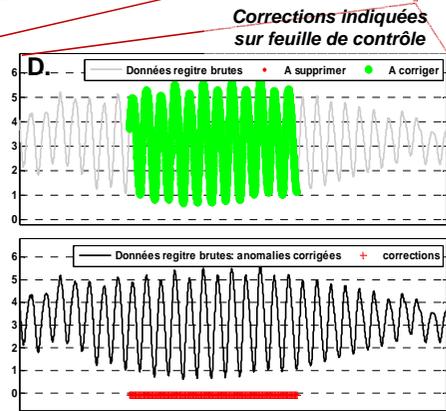
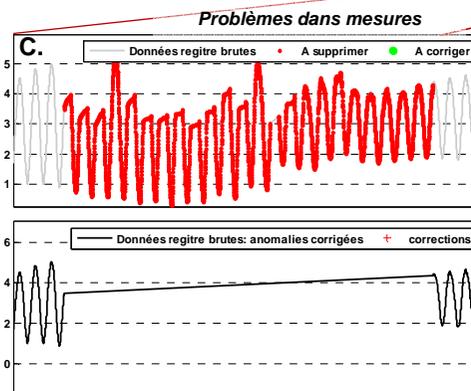
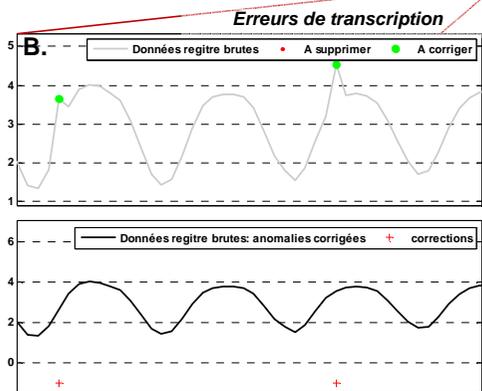
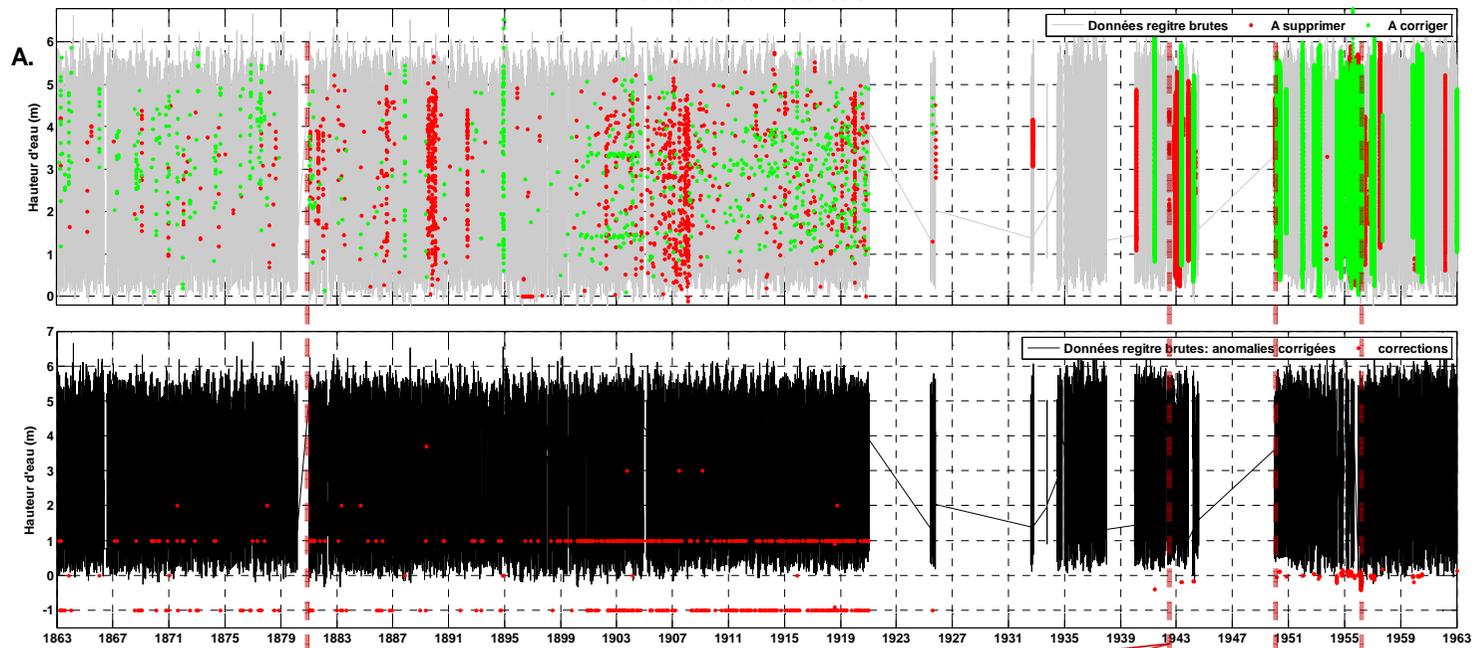


Figure 37 : Aperçu de l'ensemble des anomalies identifiées (A) et exemple de traitements associés (B-E).

Pour les mesures de hauteurs d'eau issues de la numérisation des marégrammes, les anomalies les plus importantes ont principalement été identifiées grâce à l'inspection visuelle des données lors du processus de numérisation, et grâce à l'analyse des feuilles de contrôles associées aux mesures.

Les anomalies rencontrées pouvaient être dues à un mauvais fonctionnement du marégraphe, dont l'origine n'a pu être déterminée avec certitude. Par exemple, à la fin de l'année 1942, les mesures étaient caractérisées par d'importantes anomalies lors de la marée montante (Figure 37-C). Bien que sur le marégramme de novembre 1942, l'ingénieur Touchet note que « *depuis les récents bombardements [...] la marche du marégraphe [...] présente des anomalies dont nous allons chercher la cause* », l'origine de cette anomalie ne sera pas réellement identifiée, l'occupation allemande ne facilitant pas les travaux d'investigation. Ainsi, les pleines mers ne sont pas correctement enregistrées jusqu'à mi-janvier 1943 : « *les courbes présentent à nouveau l'anomalie déjà constatée. Nous pensons qu'il s'agit d'une obturation à certains moments de l'orifice de communication du puits avec la mer. Malheureusement, les travaux exécutés aux Vieux Môle par les autorités allemandes et l'occupation du local du marégraphe sans préavis, avec certains aménagements interdisant l'accès du puits par la partie supérieure, ne nous permettait d'apporter aucun remède à la situation, signalée aux Autorités allemandes. Touchet* ». Il a été décidé de supprimer les périodes caractérisées par des erreurs flagrantes de mesures dont les causes sont restées inconnues, rendant de ce fait de potentielles corrections impossibles.

Nous verrons par la suite que les hauteurs d'eau enregistrées par le marégraphe pendant la période de l'occupation allemande sont assez souvent suspectes.

Depuis les années 1940, des feuilles de contrôle sont pratiquement toujours associées aux marégrammes. Les premières années, seul le bon fonctionnement de l'horloge était régulièrement contrôlé : les observateurs de l'époque comparaient l'heure exacte donnée par une montre de référence à celle enregistrée sur le graphique et indiquée par l'horloge du marégraphe. Jusqu'en 1951, les contrôles sur les hauteurs d'eau enregistrées ne sont pas systématiquement reportés. Il semble que les observateurs ne signifiaient que les périodes pour lesquelles des réglages étaient faits pour rendre cohérents la mesure et la réalité.

Lorsque les réglages sont connus et ne sont pas trop importants, il a été décidé de corriger les mesures du décalage donné. L'exemple du 21 février 1950 est donné en Figure 37-D : l'hydrographe Gendron note sur la feuille de contrôle « *Visite et réglage. Descendu le crayon de 6 cm sur le graphique pour être en concordance avec échelle de marée* ».

A partir de 1951, les contrôles des hauteurs d'eau enregistrées sont effectués à chaque visite de l'observateur des marées, ce qui consistait en une comparaison entre les hauteurs lues à l'échelle de marée et/ou lues sur le ruban/Règle gradué(e), et celle enregistrée sur le marégramme. Ce contrôle ($_{FC}$), qu'il soit concordant ou non, était systématiquement noté. Ces derniers ont été retranscrits pour les marégrammes numérisés afin de les utiliser pour détecter d'éventuelles anomalies ou corrections à faire sur les données de hauteurs d'eau nouvellement numérisées. L'exemple de l'année 1951 est présenté en Figure 38.

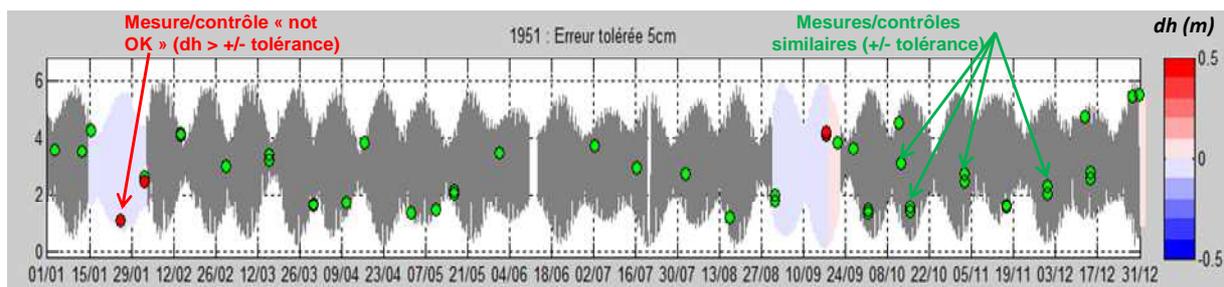


Figure 38 : Utilisation des feuilles de contrôle des marégrammes en se basant sur les tests de concordance réalisés par l'observateur de l'époque. Exemple de l'année 1951.

La courbe grise correspond aux données de hauteurs d'eau brutes nouvellement digitalisées, les points situent les contrôles de hauteurs : vert = concordance à la tolérance près, rouge = pas de concordance à la tolérance près.

Le principe de l'utilisation des contrôles de hauteurs d'eau est relativement simple : la hauteur h_{FC} reportée à la date t_{FC} sur la feuille de contrôle est comparée à celles mesurée par le marégraphe et extraite grâce à NUNIEAU (h_{nun} et t_{nun}). Dès lors que la différence de hauteur dh entre l'extraction et la mesure est supérieure à un seuil vertical de tolérance, ce point de contrôle est identifié comme étant suspect (points rouges sur Figure 38). Dans le cas contraire, le contrôle est concluant (points verts sur Figure 38) et permet de valider la numérisation. Il a été décidé d'utiliser un seuil vertical de tolérance afin de ne pas multiplier le nombre d'anomalies, car ces dernières pourraient être uniquement dues à la légère imprécision de i) l'appareil de mesure, ii) de la lecture faite par l'observateur de l'époque, ou iii) de la digitalisation du marégramme papier.

Les anomalies alors identifiées pouvaient avoir différentes origines. En effet, ces différences permettent d'identifier les problèmes liés à :

- Une mauvaise numérisation du signal due à un mauvais calage lors de la numérisation. Soit la hauteur d'eau n'était pas bien référencée en vertical, soit il y avait une erreur dans le renseignement de la date du signal extrait.
- Des erreurs liées au fonctionnement de NUNIEAU. En effet, lors des premières et dernières minutes de mesures, le logiciel peut induire une sur-/sous-estimation des hauteurs d'eau (Figure 39).

Le signal de hauteur d'eau, extrait grâce à NUNIEAU, est considéré comme continu dans le temps. Lors de l'export des données selon un pas de temps pdt défini, NUNIEAU considère la hauteur d'eau en $x = pdt(n)$ comme la moyenne des hauteurs entre $pdt(n-1)$ et $pdt(n+1)$. Ainsi, si il n'y a pas de donnée avant ou après le point extrait, la moyenne (et donc la hauteur extraite) est mal estimée. Ainsi, si le début des mesures est en marée montante de VE, la première hauteur extraite est sur-estimée, et si le début des mesures est en marée descendante de VE, la première hauteur extraite est sous-estimée.

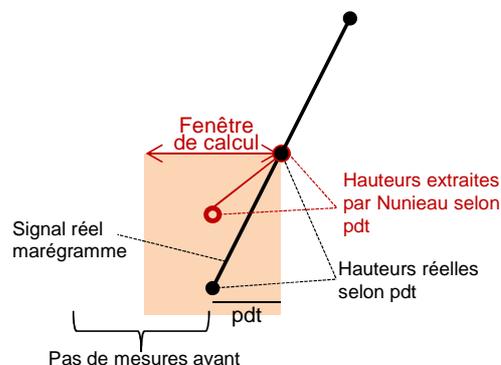


Figure 39 : Schéma du problème lié à l'extraction de la hauteur d'eau par NUNIEAU en début de mesure.

- Des erreurs liées à l'observateur : il peut s'être trompé dans la date (souvent, erreur d'un jour) ou dans les hauteurs reportées.

Ainsi, en fonction de l'origine de l'erreur, le signal analogique a été renumérisé lorsque nécessaire, ou les données contenues dans les feuilles de contrôle ont été corrigées. Lorsqu'il était impossible d'identifier l'origine d'une anomalie, aucune action n'a été réalisée sur les données.

Lors de l'acquisition des mesures de hauteurs d'eau par le marégraphe, l'observateur des marées de l'époque pouvait effectuer des réglages s'il constatait des différences entre les hauteurs mesurées et celles observées à « l'échelle de marée ». Ces réglages étaient notés sur la feuille de contrôle et ils ont été pris en compte : lorsqu'un réglage est fait lors d'un contrôle non concordant et qu'il coïncide avec le *dh* observé au cours de ce contrôle, la suite des mesures est considérée comme bonne. Dans le cas où l'anomalie était corrigée grâce à un réglage de l'observateur, et si l'inspection visuelle des données précédant cette discordance n'a permis d'identifier aucun saut, il a été supposé que la dérive en hauteur se faisait de manière linéaire depuis le dernier contrôle concordant (exemple en Figure 37-E).

Il a été décidé de ne pas prendre en compte les mesures de hauteurs d'eau provenant de marégrammes caractérisés par de trop nombreux réglages importants, comme par exemple celui de la période du 30 avril au 16 mai 1955 (Figure 40).

PONTS-&-CHAUSSÉES
LOIRE-INFÉRIEURE
Service Maritime

LOIRE MARITIME
OBSERVATIONS MARÉGRAPHIQUES
FEUILLE DE VÉRIFICATION DE RÉGLAGE
Marégraphe de SAINT-NAZAIRE (Bailli)
Période du 30 avril 1955 au 16 mai 1955

DATES	HEURES			HAUTEURS			OBSERVATIONS (1)	OBSERVATEUR		
	exactes (G. M. T.)	enregistrées sur le graphique	indiquées par l'horloge du marégraphe	Echelle de marée	Rubans gradués	Degrés enregistrés		NOMS	GRADE	SIGNATURE
30-4-55	10 ^h 50	10 ^h 50	10 ^h 50	4,24	4,04	4,04	non de la feuille	Maubert	Ingénieur	[Signature]
1-5	4 ^h 14	4 ^h 14	4 ^h 14	1,63	1,77	1,77	visite et réglage	}		}
2-5	4 ^h 28	4 ^h 28	4 ^h 28	2,70	3,38	3,38	visite et réglage			
9-5	14 ^h 15	14 ^h 15	14 ^h 15	5,	5,25	5,25	visite et réglage			
13-5	13 ^h 35	13 ^h 35	13 ^h 35	1,93	3,18	3,18	visite et réglage			
16-5	15 ^h 23	15 ^h 23	15 ^h 23	2,50	3,70	3,70	non de la feuille			

(1) Pose de la feuille ;
Enlèvement de la feuille ;
Remise en marche ;

Visite ;
Visite et Réglage ;
(Noter tous incidents intéressants pour l'interprétation de la feuille)

Vu par l'Ingénieur T. P. E. sousigné,
A St-Nazaire, le 17 Mai 1955.

0 Echelle graduée au 1/10 de l'ingénieur Bailli

Figure 40 : Feuille de contrôle associée aux mesures de hauteurs d'eau faites à Saint-Nazaire entre le 20 avril et le 16 mai 1955.

V.4. *Mise en cohérence des données*

V.4.1. *Homogénéisation en temps des mesures de hauteurs d'eau digitalisées*

L'ensemble des mesures de hauteurs d'eau réalisées à Saint-Nazaire a été digitalisé. Lors de la digitalisation, nous nous sommes attachés à retranscrire / extraire les données telles qu'elles ont été écrites/représentées. Or, le système temporel utilisé pour dater ces dernières a évolué au cours du temps historiques : du Temps Solaire Vrai (TSV) au Temps Solaire Moyen du lieu (TSM), au GMT, TU, UTC.

Dans le but d'assurer une continuité temporelle, il est nécessaire de connaître le système temporel auquel se rapportent les mesures de hauteur d'eau de l'époque et de le convertir selon un système de temps qui sera commun à toute la période de mesures. Logiquement, il a été décidé de rapporter toutes les mesures au Temps Universel. Dans ce but, différents types de corrections doivent être appliquées.

V.4.1.1 Conversion TSV en TSM : Equation du temps

Lorsque les heures sont données en Temps Solaire Vrai, il est nécessaire d'appliquer l'équation du temps afin de les convertir selon le Temps Solaire Moyen du lieu. Cette équation rend compte de la variation annuelle de vitesse de rotation apparente du Soleil qui provient de l'obliquité, ou l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'écliptique et de l'ellipticité de l'orbite de la Terre. Les variations de l'équation du temps sont représentées sur la Figure 41 : les corrections à apporter varient entre +14 minutes en février et -16 minutes en novembre, et s'annulent 4 fois par an (avril, juin, septembre et décembre). La formule utilisée pour effectuer ce calcul est celle fournie par le Bureau des Longitudes (2011), valable de 1900 à 2100, et classiquement utilisée dans ce type d'étude (eg. Pouvreau, 2008 ; Gouriou, 2012). Les mesures du 19^{ème} siècle ont également été corrigées selon cette équation, les variations étant très minimes et pouvant alors être négligées.

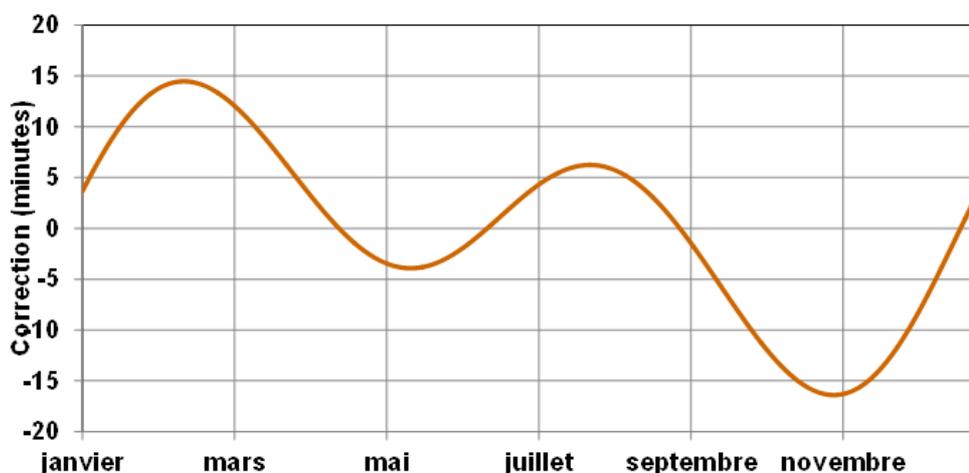


Figure 41 : Graphique de l'équation du temps calculée pour l'année 2000 grâce à la formule du BdL.

V.4.1.2 Conversion TSM en TU : Correction en longitude

Lorsque les mesures sont rapportées selon le Temps Solaire Moyen du lieu, il est nécessaire d'appliquer une correction en longitude par rapport au méridien de Greenwich pour les convertir en Temps Universel. Cette correction a pour but d'homogénéiser l'heure sur une région donnée et de rendre comparable des mesures réalisées en différents lieux de cette région. La Terre tourne autour de son axe en 24 heures, soit une vitesse de rotation de 15°/heure, ce qui induit qu'un écart de longitude de 1° correspond à un écart de temps de 4 minutes. Il suffit alors de connaître l'écart de longitude entre le lieu de l'observation et le méridien de Greenwich pour pouvoir corriger les données et passer de TSM à TU. La correction à appliquer est négative lorsque l'observatoire est à l'Est du méridien, et positive lorsqu'il est à l'Ouest.

L'observatoire des marées était situé à l'extrémité de la jetée du vieux môle lorsque les mesures de hauteurs d'eau ont été rapportées selon le TSV ou le TSM. **L'écart de longitude avec Greenwich était alors de -2.197° ce qui implique une correction de +8,788 minutes pour convertir les données en TU.**

V.4.1.3 Conversion Temps légal en TU

Lorsque les heures sont exprimées selon le temps légal en France, 1 heure lors de l'« heure d'hiver » ou 2 heures lors de l'« heure d'été », doi(ven)t être enlevée(s) pour être en TU. Lorsque l'horaire légal n'est ni indiqué sur la donnée papier ni spécifié dans les métadonnées associées, on le déduit à partir de la date de la donnée papier et des règles en place à l'époque associée et il sera vérifié par la suite lors de la validation des données.

V.4.1.4 Corrections dues à des erreurs de mesures

En plus des corrections permettant l'homogénéisation en temps des mesures de hauteurs d'eau en TU, plusieurs autres corrections temporelles ont dû être effectuées. Ces erreurs pouvaient avoir des origines diverses :

Dérèglement de l'horloge.

La vitesse de rotation du tambour enregistreur du marégraphe est fixée à une révolution par jour grâce à l'horloge associée. Lors des mesures réalisées au cours du 19^{ème} siècle, il n'était pas rare d'observer une dérive de cette horloge ce qui obligeait alors les observateurs des marées à régulièrement effectuer des réglages. Ces derniers étaient essentiels pendant la période pendant laquelle les heures étaient données selon le TSV, car par définition, la durée du jour n'était pas constante au cours de l'année et il était nécessaire d'effectuer régulièrement des réglages de l'horloge. Selon les instructions données aux observateurs des marées, ces derniers devaient :

« 4° L'observateur des marées veille à ce que le marégraphe fonctionne convenablement et soit toujours réglé en temps vrai, à trente ou trente-cinq secondes près. Une montre à secondes indépendantes lui sert pour cet objet. Il la porte, chaque deux jours, chez le Directeur de l'Observatoire ou chez le professeur d'Hydrographie ; celui-ci la règle matériellement en temps vrai

et inscrit dans le *Journal des Marées*, sur la page *Remarques diverses*, de combien elle avançait ou retardait sur ce temps.

5° Dès que la montre a été réglée, l'observateur compare ses indications à celles de la pendule du marégraphe ; si la différence n'excède pas vingt-cinq secondes, il laisse les choses en cet état ; s'il y a excès, il règle le marégraphe et consigne le fait aux pages *Remarques diverses* de son journal et du cahier bi-mensuel. »

Les écarts entre l'heure donnée par l'horloge et l'heure du lieu à midi vrai, et les réglages appliqués à l'horloge du marégraphe pour corriger ces derniers n'ont été reportés pour Saint-Nazaire qu'entre 1863 et 1887 (Figure 42). Les corrections à apporter n'étant données que tous les 2 jours, il a été supposé que le dérèglement de l'horloge entre deux réglages se faisait de manière linéaire. Les dérives maximales observées sont proches de 7 minutes, néanmoins les corrections en temps à appliquer pour corriger la dérive de l'horloge sont régulièrement inférieures à 1 minute.

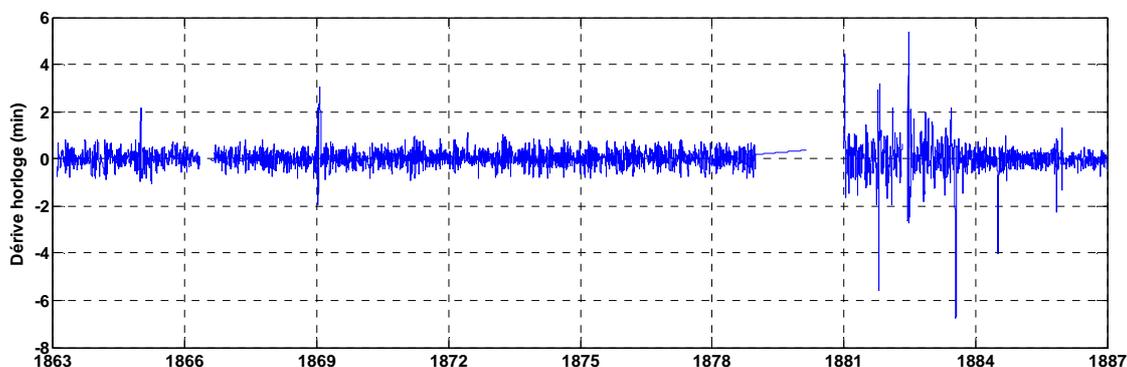


Figure 42 : Dérive de l'horloge déduite des journaux bi-mensuels des marées.

Au-delà de 1888, ces corrections temporelles n'ont pu être appliquées car les observateurs des marées ne notifiaient plus dans les registres les éventuels écarts et réglages de l'horloge. Les réglages de l'horloge étaient régulièrement assez minimes, et il est probable que ce fut similaire par la suite. Ceci semble d'autant plus vrai qu'à partir de 1894, les heures sont données selon le TSM caractérisé par une durée de journée constante au cours de l'année, ce qui a vraisemblablement réduit le nombre de réglages à effectuer par les observateurs.

Erreurs dans la date lors de la retranscription par l'observateur des marées.

Pour les mesures marégraphiques issues des registres de marées, il pouvait arriver que l'observateur des marées se trompe de date lors de la retranscription. Ces erreurs correspondaient souvent à :

- une inversion entre le matin et l'après-midi lors de la retranscription des courbes de marées (Figure 43-A). Selon toute vraisemblance, l'observateur a bien suivi les bonnes courbes mais semble renseigner les mauvaises colonnes lors de la retranscription. Il était aisé

de commettre ce type d'erreur car, jusqu'en 1900 les registres prévus pour extraire les hauteurs d'eau correspondaient à des feuillets doubles, avec une demi-journée par feuille (exemple en Figure 6);

- une erreur d'un jour dans la date (Figure 43-B). Il est vraisemblable que dans ce cas la mauvaise retranscription soit due au suivi de la mauvaise courbe de marée car il peut s'avérer délicat de ne pas se tromper de courbe lorsqu'un marégramme en compte près de 30.

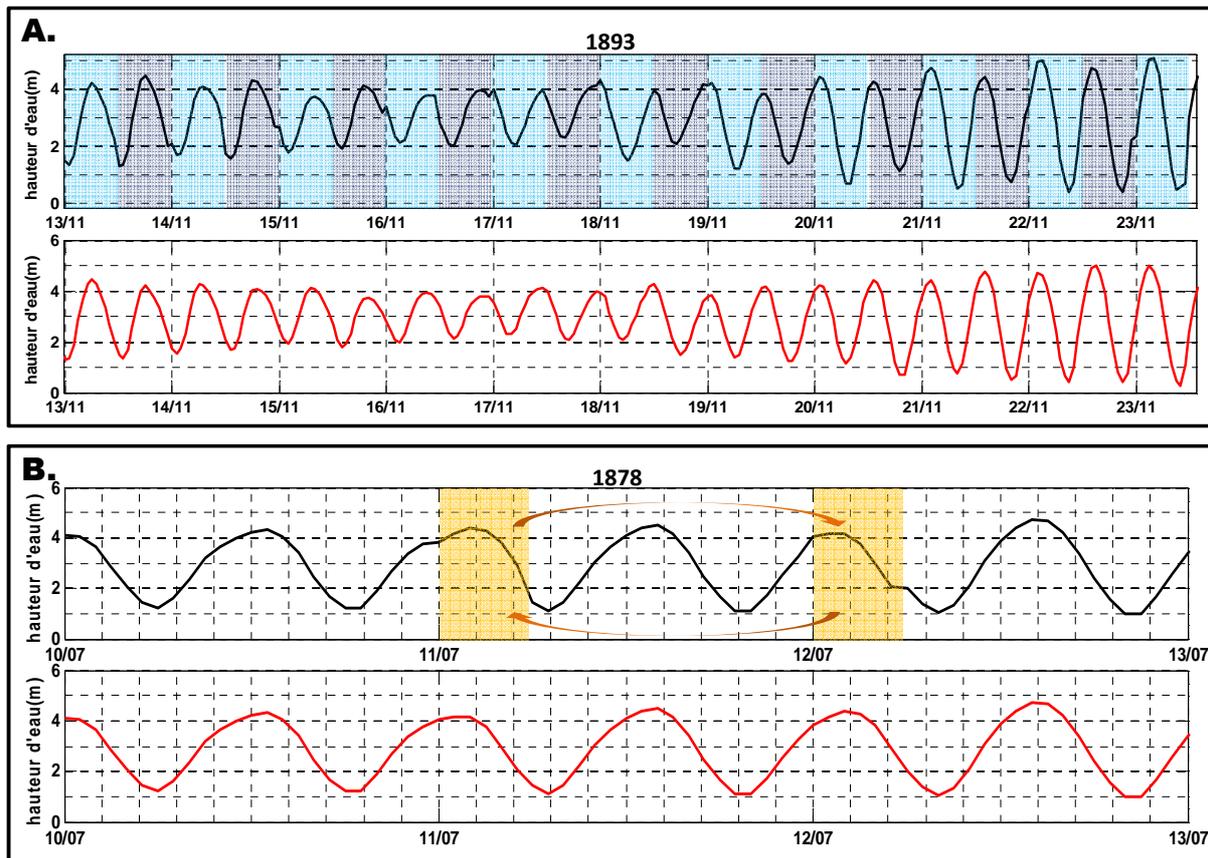


Figure 43 : Exemple d'erreurs de retranscription par l'Observateur de l'époque. A. inversion des courbes de marées entre le matin et l'après-midi en novembre 1893 ; B. erreur de 24 heures en juillet 1878.

Haut : données brutes erronées, succession de couleurs : matin/après-midi ; Bas : données corrigées

Ces mauvaises retranscriptions sont relativement rares et facilement détectables lors de l'analyse visuelle des données.

Mauvaise définition du système horaire utilisé lors des mesures.

L'analyse de l'évolution des résidus temporels de PM et BM (différence de temps entre la PM/BM observée et celle prédite) a permis de noter que le système horaire indiqué sur les documents numérisés ne correspondait parfois pas au système réellement utilisé lors de l'acquisition des mesures. Pour permettre cette observation, les résidus en temps de PM/BM ont été calculés à partir des observations dont les corrections temporelles déduites des

informations indiquées sur les documents ont déjà été appliquées. Des exemples illustrant ce propos sont présentés en Figure 44 et Figure 45.

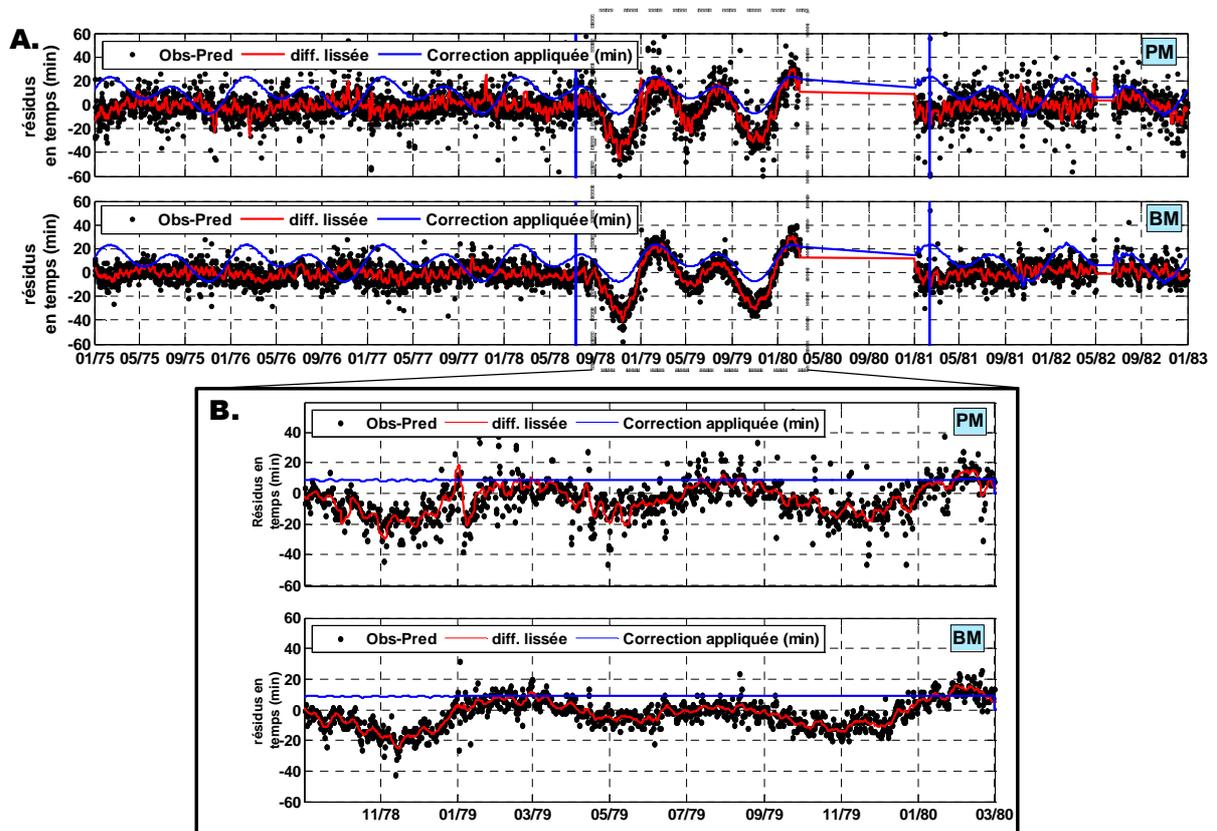


Figure 44 : Résidus en temps de PM et BM (Obs-Pred) et correction en temps appliquée pour convertir les données numérisées en TU.

A. Corrections déduites des informations notées sur les registres : TSV ; B. Corrections en considérant qu'entre 09/1878 et 12/1879, heures notées selon le TSM.

En Figure 44, l'évolution des résidus entre janvier 1875 et janvier 1883 est étudiée. L'analyse harmonique, ayant servi à calculer les prédictions de hauteurs d'eau, a été réalisée sur la période 1863 – 1882 à partir des données censées avoir été rendues homogènes en temps. Au cours de cette période, les hauteurs d'eau sont reportées dans les registres de marées selon le TSV, ce qui a impliqué la prise en compte de l'équation du temps et de la correction en longitude pour passer en TU (correction appliquée visible sur la courbe bleue, Figure 44-A). Jusqu'en septembre 1878, les résidus de PM et de BM sont plus ou moins centrés sur zéro, et, malgré une dispersion relativement importante en PM, il est possible de considérer que les corrections temporelles appliquées sont bonnes. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer l'origine de cette dispersion : i) les conditions météorologiques peuvent avancer ou retarder les heures de PM, ii) lors des périodes de ME, l'onde de marée se déforme

à Saint-Nazaire et les PM tendent à s'aplatir (= tenue du plein), ce qui rend délicat la détermination exacte du moment de la PM.

Du 1^{er} septembre 1878 à fin décembre 1879, les résidus de PM/BM ne sont plus centrés sur zéro et sont caractérisés par de fortes variations qui se corrèlent parfaitement aux corrections temporelles appliquées. Pendant cette période, il est fort probable que les informations de temps notées sur les registres soient fausses. Ainsi, il ne faut pas appliquer l'équation du temps, car cela ne fait qu'amplifier les déphasages observés. C'est pourquoi, pour ne pas artificiellement augmenter les déphasages, seule la correction en longitude a été appliquée entre septembre 1878 et janvier 1880 (Figure 44-B). Grâce à l'application de cette dernière correction, les variations des résidus ont été atténuées (comprises entre +10 et -20 minutes) mais il est cependant toujours possible d'observer l'influence de l'équation du temps. Il se pourrait donc que l'observateur de l'époque ait effectué des corrections temporelles avant d'extraire les données sans pour autant le préciser sur une note. Ainsi, à défaut de connaître les corrections exactes à apporter, il a ainsi été considéré par la suite que les hauteurs d'eau enregistrées entre septembre 1878 et janvier 1880 étaient exprimées en TSM.

La Figure 45 montre un autre exemple d'étude des résidus en temps des PM, effectuée entre 1955 et 1956 (analyse harmonique réalisée sur période 1932 – 1964). D'après les métadonnées associées aux marégrammes, les mesures étaient exprimées en TU. Il est possible d'identifier entre le 21 et le 28 février 1955 des résidus centrés sur environ +60min, ce qui indique qu'au cours de cette période, le marégraphe fonctionnait selon le temps légal TU+1. Il est également possible d'observer des anomalies plus délicates à corriger entre le 16 et le 31 mars 1956 : les résidus ne sont pas centrés sur une valeur mais montrent plutôt une évolution graduelle allant jusqu'à -100 minutes. Lorsque ce type d'erreur est identifié et que le déphasage induit est important, il est délicat d'appliquer une correction pertinente et il est alors préférable de ne pas prendre en compte ces données.

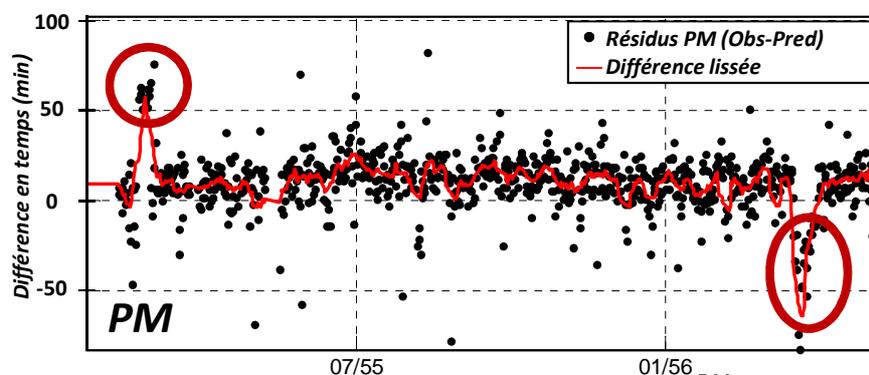


Figure 45 : Résidus en temps de PM (Obs-Pred) après conversion des données numérisées en TU, en se basant sur le système horaire initial indiqué sur le document (1955-1956, noté TU sur les marégrammes).

V.4.1.5 Synthèse des corrections temporelles appliquées

Après avoir identifié l'ensemble des corrections temporelles à effectuer, ces dernières ont été appliquées pour permettre l'homogénéisation en temps des mesures de hauteurs d'eau selon le système TU. Les principales corrections sont synthétisées dans le Tableau 6. Lorsque le système de temps selon lequel sont rapportées les mesures n'a pu être déterminé (*Nd*, Tableau 6) et que le déphasage induit par cette méconnaissance était supérieur à une heure, il a été décidé de supprimer les hauteurs d'eau acquises lors de cette période.

Les résidus en temps moyens de PM/BM (méthodologie appliquée présentée dans le § V.5.2) ont été calculés annuellement à l'issue des corrections temporelles (Figure 46). Globalement, ces derniers sont centrés sur la valeur 0 et varient jusqu'à [-5 ; 5] minutes, ce qui semble être un très bon indicateur de la qualité des mesures.

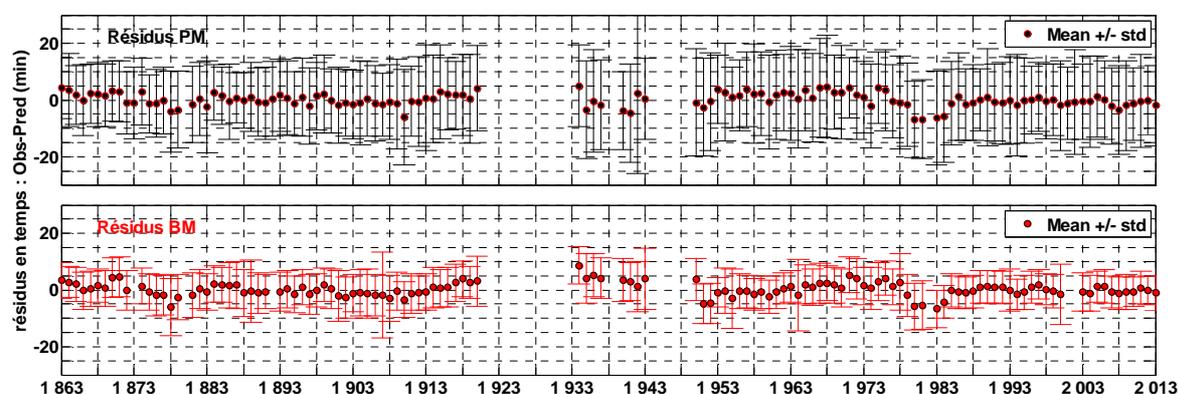


Figure 46 : Evolution des résidus en temps annuels sur l'horaire des PM (haut) et BM (bas) à Saint-Nazaire entre 1863 et 2013.

Predictions réalisées sur périodes [1863-1882], [1883-1902], [1903-1920], [1932-1964], [1965-1984], [1985-2004] et [2005-2014].

Tableau 6 : Synthèse des corrections temporelles appliquées pour homogénéiser les mesures selon le Temps Universel.

EdT = Equation du temps à appliquer ; CL = Correction en longitude à appliquer ; Horl = Correction des écarts d'horloge à appliquer ; ±12h = inversion matin/après-midi ; Supp = Suppression des mesures. Les corrections identifiées avec un astérisque () sont déduites des feuilles de contrôles. La ligne grisée indique que seul un contrôle superficiel a été effectué pour cette période.*

Date Heure Début	Date Heure Fin	Syst. Tps	Corrections
25/05/1821 04:00:00	17/10/1821 17:00:00	TSV	<i>EdT + CL</i>
18/01/1863 00:00:00	05/03/1865 04:00:00	TSV	<i>EdT + CL + Horl</i>
05/03/1865 05:00:00	05/03/1865 20:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl -1h</i>
05/03/1865 21:00:00	31/05/1871 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl</i>
01/06/1871 00:00:00	30/06/1871 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl ±12h</i>
01/07/1871 00:00:00	30/09/1872 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl</i>
01/10/1872 00:00:00	31/10/1872 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl ±12h</i>
01/11/1872 00:00:00	10/07/1878 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl</i>
11/07/1878 00:00:00	11/07/1878 05:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl +24h</i>
12/07/1878 00:00:00	12/07/1878 05:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl -24h</i>
12/07/1878 06:00:00	31/08/1878 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl</i>
01/09/1878 00:00:00	29/02/1880 23:00:00	TSM ?	<i>CL+ Horl</i>
01/01/1881 00:00:00	09/02/1881 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL+ Horl</i>
10/02/1881 00:00:00	10/02/1881 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL + Horl +24h</i>
11/02/1881 00:00:00	11/02/1881 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL + Horl -24h</i>
12/02/1881 00:00:00	31/12/1887 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL + Horl</i>
01/01/1888 00:00:00	30/09/1893 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL</i>
01/11/1893 00:00:00	30/11/1893 23:00:00	TSV	<i>EdT + CL ±12h</i>
01/12/1893 00:00:00	01/01/1894 11:00:00	TSV	<i>EdT + CL</i>
01/01/1894 12:00:00	31/01/1894 23:00:00	TSM	<i>CL</i>
01/02/1894 00:00:00	28/02/1894 23:00:00	TSM	<i>CL ±12h</i>
01/03/1894 00:00:00	31/12/1920 23:00:00	TSM	<i>CL</i>
02/06/1925 07:00:00	04/10/1925 00:00:00	TU1	<i>-1h</i>
04/10/1925 00:00:00	10/10/1925 16:00:00	TU0	<i>0</i>
01/08/1932 10:00:00	01/10/1932 09:00:00	TSM	<i>CL</i>
26/09/1933 15:30:00	01/10/1933 10:00:00	TSM	<i>CL</i>
01/07/1934 10:15:00	06/07/1937 00:00:00	TU0	<i>0</i>
06/07/1937 00:00:00	13/07/1937 06:40:00	TU0	<i>-0.33h*</i>
13/07/1937 06:45:00	28/07/1952 08:48:00	TU0	<i>0</i>
28/07/1952 08:49:00	30/07/1952 15:00:00	TU0	<i>-0.1h*</i>
30/07/1952 15:05:00	19/02/1955 23:55:00	TU0	<i>0</i>
21/02/1955 00:00:00	28/02/1955 08:50:00	TU1	<i>-1h</i>
28/02/1955 09:00:00	06/08/1955 15:00:00	TU0	<i>0</i>
06/08/1955 15:05:00	08/08/1955 05:30:00	TU0	<i>-0.5h</i>
08/08/1955 05:35:00	15/03/1956 23:55:00	TU0	<i>0</i>
16/03/1956 00:00:00	31/03/1956 23:55:00	<i>Nd</i>	Supp
01/04/1956 00:00:00	31/07/1956 09:00:00	TU0	<i>0</i>
31/07/1956 09:30:00	13/08/1956 23:55:00	<i>Nd</i>	Supp
14/08/1956 00:00:00	14/02/1964 23:55:00	TU0	<i>0</i>
15/02/1964 00:00:00	02/03/1964 23:55:00	TU0	<i>0</i>
03/03/1964 00:00:00	31/12/1964 23:55:00	TU0	<i>0</i>
01/01/1965 00:00:00	<i>Aujourd'hui</i>	TU0	<i>0</i>

V.4.2. Homogénéisation verticale des mesures de hauteurs d'eau digitalisées

Grâce à l'analyse documentaire historique de l'observatoire des marées de Saint-Nazaire, il a été possible de suivre l'évolution du zéro de l'échelle de marée en 1821 et de celui du marégraphe de 1863 à aujourd'hui (cf. §IV.3.1.2 et §IV.3.1.3). La zone portuaire de Saint-Nazaire ne semblant pas être affectée par des mouvements terrestres verticaux à l'échelle de la ville (cf. §IV.3.2), seules les corrections se rapportant à l'homogénéisation verticale des données brutes ont été appliquées. Les corrections verticales appliquées sont synthétisées dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Détails des corrections verticales appliquées pour rapporter les mesures au Zéro Hydrographique actuel de Saint-Nazaire (ZH96)

Date Heure Début	Date Heure Fin	Correction verticale (m)	Commentaires
01/01/1800 00:00	01/01/1835 00:00	+ 0.43	0.4 (ZH1864 → ZH96) + 0.11 ($O_{\text{marég}(1863-1934)} \rightarrow \text{ZH1864}$) -0.08 ($O_{\text{échMarée}(1821)} \rightarrow O_{\text{marég}(1863-1938)}$)
01/01/1863 00:00	01/07/1934 00:00	+ 0.51	0.4 (ZH1864 → ZH96) + 0.11 ($O_{\text{marég}(1863-1934)} \rightarrow \text{ZH1864}$)
01/07/1934 00:00	20/01/1938 00:00	+ 0.48	0.4 (ZH1864 → ZH96) + 0.08 ($O_{\text{marég}(1934-1938)} \rightarrow \text{ZH1864}$)
20/01/1938 00:00	01/01/1965 00:00	+ 0.4	0.4 (ZH1864 → ZH96)
01/01/1965 00:00	01/01/2015 00:00	0	Après 1965, les données étaient déjà disponibles dans la base de données SHOM (TdB) et déjà rapportées selon le ZH96.

Ainsi, à l'issue de ces corrections, le jeu de données final est rapporté selon le zéro hydrographique défini à Saint-Nazaire par le SHOM depuis 1996. Les éventuels sauts verticaux, réglages de l'appareil affectant les hauteurs enregistrées, ... ne sont pas considérés à ce stade de la reconstruction. Leur prise en compte est détaillée lors de la validation des données.

V.5. Validation des données historiques

Une fois les données numérisées nettoyées des valeurs aberrantes et rendues cohérentes en temps et en hauteur, et avant de procéder à leur validation, les lacunes de mesures (et/ou liées à des suppressions de données lors de la reconstruction) ont été interpolées par spline cubique dès lors que la durée de lacune était inférieure à 3 heures. Cette méthode d'interpolation est largement utilisée dans ce type d'étude (*e.g.* Pouvreau, 2008 ; Gouriou, 2012). Les analyses permettant la validation des données portent sur ces données interpolées.

Il existe plusieurs méthodes pour vérifier la qualité des données brutes numérisées. Elles sont souvent complémentaires et doivent donc être utilisées en parallèle dans le processus de validation, surtout en ce qui concerne la cohérence verticale des mesures de hauteurs d'eau. Les principales méthodes utilisées pour valider/corriger/supprimer les données ainsi que leurs principaux résultats sont présentés brièvement dans ce chapitre. Cette étape de validation a pour objectif final la création d'un fichier qualifiant les mesures en fonction de leur qualité à associer aux jeux de données nouvellement numérisés.

V.5.1. Etude de la corrélation avec des niveaux moyens de stations proches

Une méthode relativement simple à utiliser pour contrôler la qualité de la série nouvellement numérisée consiste à comparer les niveaux moyens obtenus à ceux enregistrés au cours de la même période à des stations marégraphiques proches d'un point de vue géographique. En effet, les observatoires situés à quelques centaines de kilomètres les uns des autres ont de très fortes chances d'être soumis aux mêmes conditions atmosphériques à large échelle, ce qui induit normalement une bonne corrélation des variations journalières et mensuelles du niveau marin observées sur ces différents sites.

La ville de Saint-Nazaire étant située à distances relativement réduites des villes de Brest et de La Rochelle (210 et 150 km respectivement), il est alors possible d'utiliser ces 2 seules longues séries françaises disponibles sur la façade atlantique. L'évolution des niveaux moyens mensuels de ces séries marégraphiques historiques est visible en Figure 47.

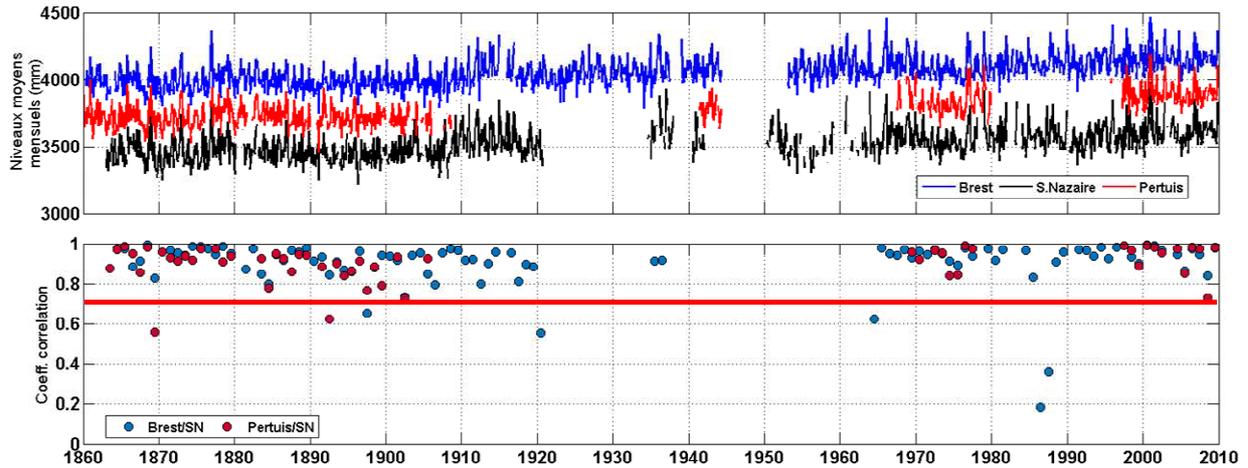


Figure 47 : Evolution des niveaux moyens mensuels observés à Brest (Pouvreau, 2008 ; source : SONEL), dans le Pertuis d’Antioche (Gouriou, 2012) et à Saint-Nazaire (Haut) et calcul des coefficients de corrélation annuels entre ces différentes séries (Bas).

Les données de Saint-Nazaire inédites, numérisées dans le cadre de cette étude sont comprises entre 1863 et 1964.

Il est d’ores et déjà possible de noter visuellement la bonne corrélation de ces séries qui sont la plupart du temps caractérisées par des variations similaires et coïncidentes. Dans le but de détecter les périodes pour lesquelles les valeurs de niveaux moyens sont suspectes, les coefficients de corrélation annuels ont été calculés entre la série de Saint-Nazaire et celles de Brest et du Pertuis d’Antioche (Figure 47). Ces coefficients n’ont pu être calculés qu’à partir des moyennes mensuelles de ces 3 sites car les NMj ne sont pas disponibles en ce qui concerne la série composite du littoral charentais. Le calcul a été réalisé pour une année dès que chacun des 3 sites disposait d’au moins 8 valeurs mensuelles. Bien que cette première analyse soit relativement grossière, elle permet de confirmer l’impression visuelle obtenue précédemment, à savoir que la série de Saint-Nazaire est globalement de bonne qualité. Quelle que soit la comparaison considérée, il est possible de noter que les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.8 la majeure partie du temps, sachant qu’un coefficient de 0.7 est le minimum recommandé par GLOSS pour ce type d’étude (*in* Gouriou, 2012). De plus, cette analyse permet d’identifier des périodes pour lesquelles la série de Saint-Nazaire doit être inspectée soigneusement. En effet, lorsque pour une année donnée la série de Saint-Nazaire n’est pas bien corrélée aux deux autres, il est fort probable que certains NMm calculés à Saint-Nazaire soient de moins bonne qualité.

Dans le but d’affiner notre connaissance des périodes présentant de potentiels problèmes dans les mesures, les coefficients de corrélations mensuels entre Brest et Saint-Nazaire ont été calculés à partir des NMj des 2 séries. Les calculs ont été effectués dès qu’un mois comprenait au moins 15 NMj pour chacun des deux observatoires. Les résultats sont visibles en Figure 48.

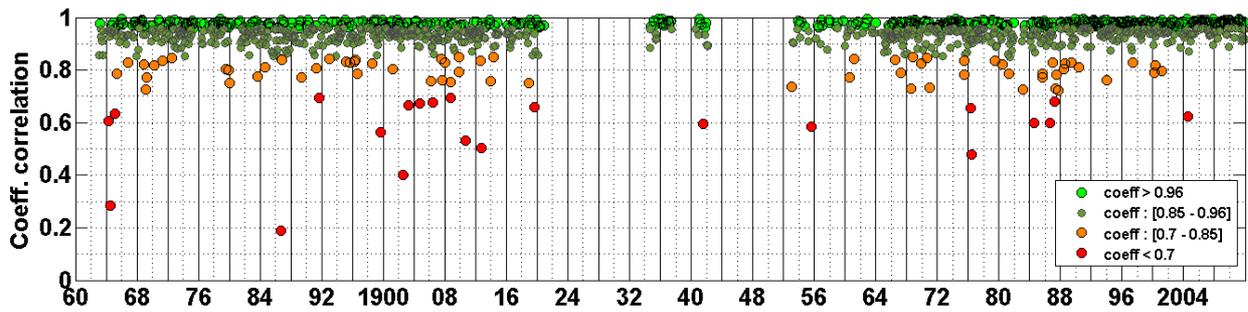


Figure 48 : Calcul des coefficients de corrélation mensuels calculés à partir des moyennes journalières entre Brest et Saint-Nazaire.

La plupart du temps, les NMj observées à Saint-Nazaire sont caractérisés par une forte corrélation avec les NMj de Brest :

- Plus de 44% des mois ont un coefficient de corrélation supérieur à 0.96 (points vert clair, Figure 48), ce qui correspond à la valeur obtenue sur la période récente RONIM (depuis 2007).
- 48 % des mois sont caractérisés par un coefficient de corrélation très satisfaisant, compris entre 0.85 et 0.96.
- Sur les 8 % restants, seuls 2 % des mois (22 valeurs) présentent une mauvaise corrélation (coefficient < 0.7, points rouges sur Figure 48).

Ces données de corrélations ne sont pas directement utilisées pour corriger, ou rejeter les données, mais permettent de définir des périodes qui doivent être soigneusement examinées pour identifier les raisons de cette mauvaise corrélation (décalages verticaux, précision variable liée aux observateurs, problèmes liés à l'observatoire des marées, influence des conditions atmosphériques différentes selon les sites, ...), et donc cette mauvaise qualité relative. L'autre limite de cette méthode repose sur le fait que ses résultats dépendent de la qualité des mesures des autres longues séries reconstruites.

V.5.2. *Etude des résidus*

Les résidus correspondent aux différences entre les hauteurs d'eau observées (h_{obs}) en un point et celles prédites (h_{pred}) à la même période. Il est possible de distinguer les résidus instantanés, qui sont le résultat d'une simple soustraction entre h_{obs} et h_{pred} à un instant t , et les résidus de PM (ou BM), qui correspondent aux différences des heures et des hauteurs atteintes par les PM (ou BM) observées et prédites. Dans le cadre de cette étude, ce dernier type de résidus sera préférentiellement utilisé car les résidus instantanés sont très sensibles aux décalages en temps des observations. Lorsque des résidus instantanés sont calculés à partir d'observations mal calées en temps (même de quelques minutes), on observe alors de

nombreuses surcotes/décotes artificielles qui sont uniquement liée aux écarts de temps : ceci est particulièrement vrai en VE car la hauteur d'eau peut varier de façon importante en peu de temps. L'utilisation des résidus de PM/BM s'affranchit de ces problèmes de calage temporel, ce qui est nécessaire pour des données historiques pour lesquelles une précision à 5 minutes est considérée comme bonne.

Plusieurs étapes successives sont nécessaires pour calculer les résidus en temps et en hauteur de PM/BM :

- Calcul de la prédiction de la marée, réalisé grâce au logiciel MAS en se basant sur une analyse harmonique des hauteurs d'eau observées. La marée prédite peut différer en fonction de la durée et de la qualité des jeux de données considérés pour calculer les constantes harmoniques. Dans le cadre de cette étude, dès qu'un calcul de prédiction est réalisé, il est associé aux période(s) utilisée(s).

- Interpolation des données de hauteurs d'eau observées et prédites. Cette étape a pour but de 1) combler d'éventuelles lacunes de courte durée (seuil : 2 valeurs horaires manquantes successives, d'après Gouriou, 2012), et 2) extraire avec la meilleure précision possible la hauteur et l'heure de PM/BM pour la suite de l'analyse. La méthode d'interpolation par spline cubique est utilisée : à partir des mesures encadrant les PM et BM, les hauteurs d'eau sont alors recalculées selon un pas de temps régulièrement compris entre 1 et 5 minutes.

- Extraction des PM/BM observées et prédites. Pour identifier ces hauteurs caractéristiques, la tendance a d'abord été retirée du signal marégraphique, puis pour chaque période définie par les intersections de la courbe avec 0, les hauteurs maximales ou minimales ont été identifiées et, connaissant les heures exactes des PM/BM, les hauteurs sont finalement extraites du signal initial. La Figure 49 illustre ces différentes étapes.

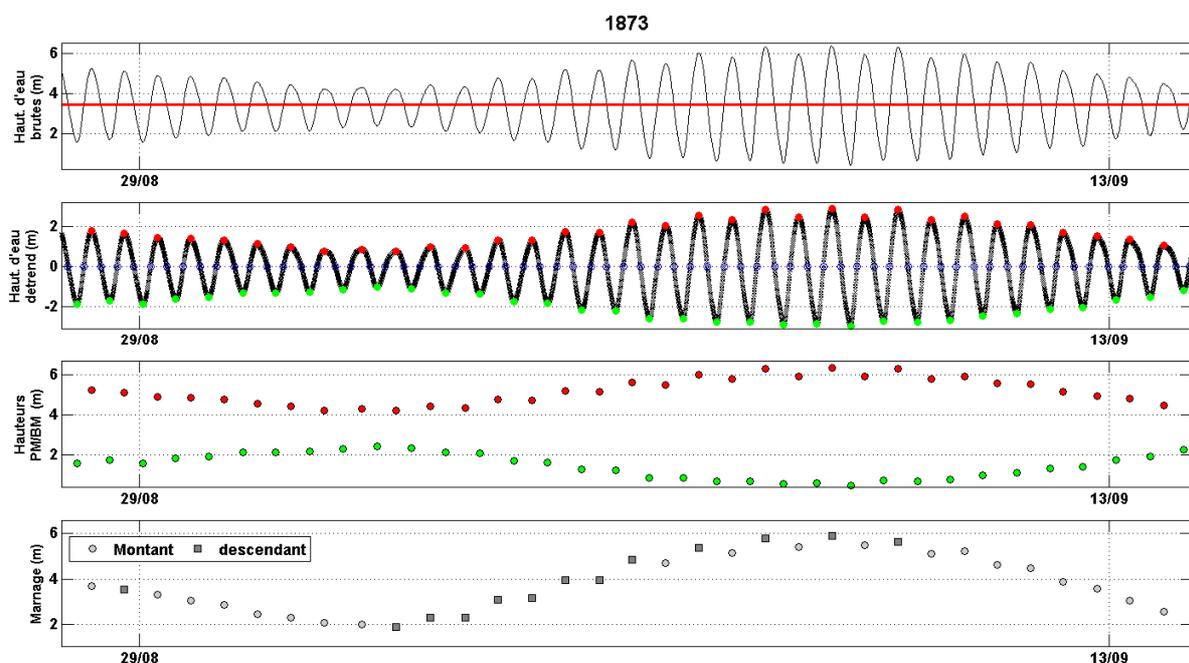


Figure 49 : Etapes suivies pour l'extraction des PM/BM à partir d'un signal marégraphique observé (ou prédit).

- Identification des PM/BM correspondantes entre l'observation et la prédiction en se basant sur les heures auxquelles elles étaient atteintes respectivement.

La Figure 50 présente les résidus sur les hauteurs de PM et BM à Saint-Nazaire entre 1863 et 2014. Pour éviter que ces résidus ne soient impactés par l'évolution du niveau marin à Saint-Nazaire, plusieurs analyses harmoniques ont été réalisées au cours du temps sur des périodes disposant d'environ 20 ans de données à chaque fois. Ainsi, les prédictions ont ici été calculées sur les périodes [1863-1882], [1883-1902], [1903-1920], [1932-1964], [1965-1984], [1985-2004] et [2005-2014]. Les calculs des résidus ont pu être effectués sur environ 85000 hauteurs de PM et BM.

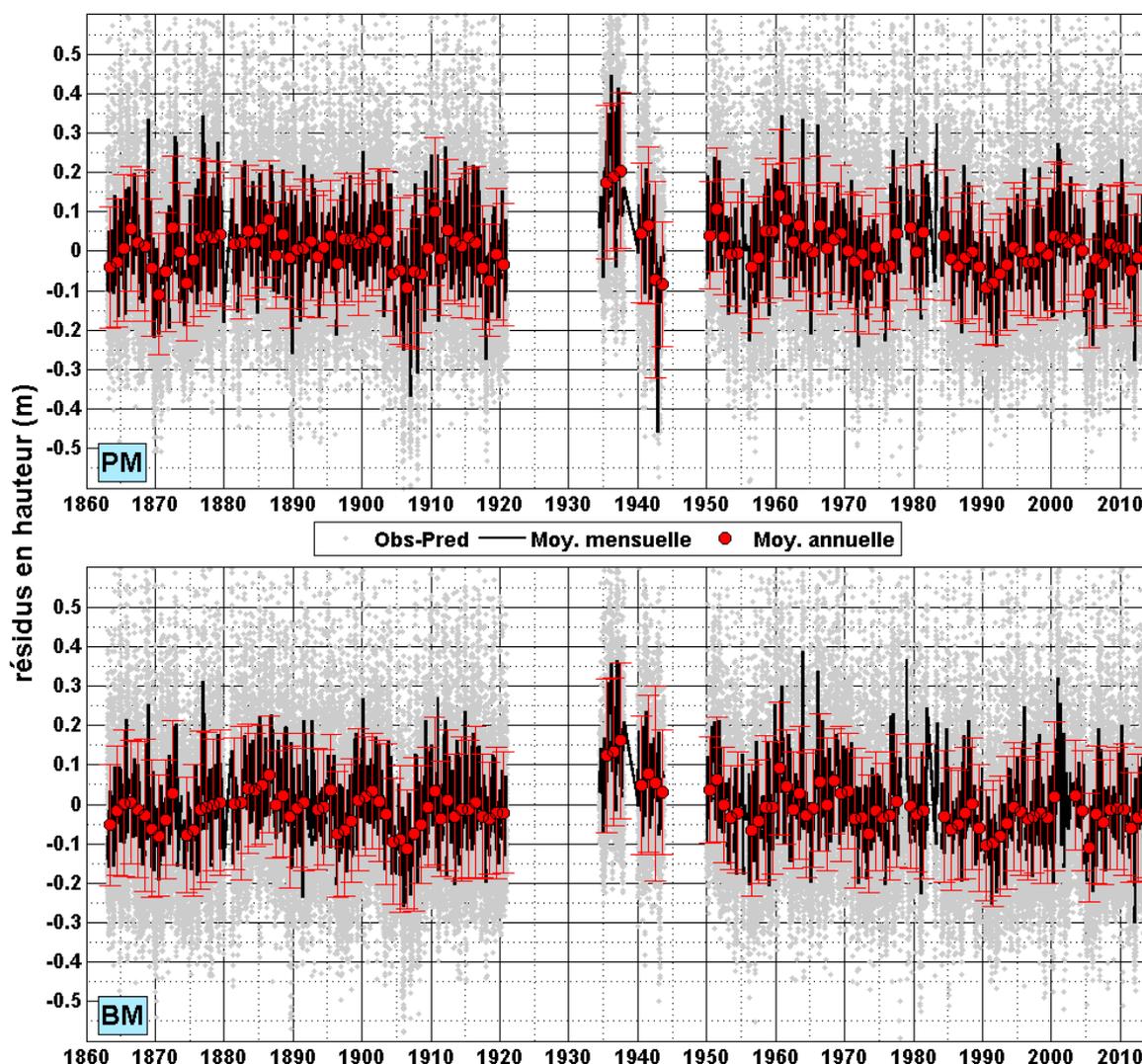


Figure 50 : Résidus sur les hauteurs de PM (haut) et BM (bas) à l'observatoire des marées de Saint-Nazaire.

Prédictions réalisées sur périodes [1863-1882], [1883-1902], [1903-1920], [1932-1964], [1965-1984], [1985-2004] et [2005-2014].

L'analyse des résidus en temps a déjà montré que la série reconstruite de Saint-Nazaire était cohérente d'un point de vue temporel (§ V.4.1.5, Figure 46). Lorsque les résidus en hauteurs sont étudiés, les moyennes des résidus de PM et BM sur la totalité de la période historique sont respectivement de +0.9 cm et -1 cm, ce qui illustre que la majorité du temps, la série semble être bien recalée en hauteur. On peut noter que les résidus en hauteur montrent une variabilité relativement importante (majoritairement entre - 40 et +50 cm environ) et leurs écarts-type moyens, que ce soit pour les PM ou les BM, sont d'environ 17 cm. Ces valeurs sont cohérentes avec celles obtenues dans les études portant sur la reconstruction des séries de Brest (Pouvreau, 2008) et celle du littoral charentais (Gouriou, 2012). Il est important de garder à l'esprit que les observations utilisées ici ne sont pas corrigées des effets de la pression atmosphérique, ce qui peut expliquer cette relative dispersion des données.

Pour une meilleure lecture des résultats, les valeurs moyennes mensuelles et annuelles ont été calculées dès lors que, pour la période considérée, au moins 30 et 360 hauteurs de PM/BM avaient pu être extraites respectivement (soit environ 15 jours pour les valeurs mensuelles et 6 mois pour les valeurs annuelles). Il est alors possible de vérifier que globalement, les résidus sont centrés sur des valeurs proches de 0 cm : 72 % des valeurs annuelles de résidus sont comprises entre -4 et +4 cm, et cela monte à 82% et 86 %, respectivement pour les BM et PM, lorsque l'intervalle [-6cm +6cm] est considéré. Malgré cette apparente excellente qualité de la série reconstruite, il est tout de même possible d'identifier des périodes pour lesquelles il y a eu vraisemblablement des problèmes de calages verticaux.

La période [1935-1937] se distingue clairement. Elle est caractérisée par des résidus en hauteur moyens annuels proches de + 20 cm pour les PM et d'environ + 14 cm pour les BM, alors que les écart-types moyens sont de l'ordre de 19 cm, soit similaire à ce qui est observé le reste du temps. Selon toute vraisemblance, le zéro du marégraphe de l'époque n'était pas calé sur le niveau de référence déduit de la consultation des documents historiques, rendant donc désuète la correction appliquée pour rendre cohérente la série reconstruite. Cette période d'acquisition de données de hauteurs d'eau correspond à la remise en route du marégraphe par les Ponts & Chaussées, après une interruption de mesure (du moins en continue) longue de plus de 10 ans (*cf.* § IV.2.3). Ainsi, il est fort possible que le personnel alors en place à l'observatoire n'avait pas l'expertise nécessaire à la bonne marche de l'appareil. Par la suite, nous verrons qu'au cours de cette période, le puits de tranquillisation est régulièrement suspecté d'être envasé, ce qui semble indiquer le probable désintérêt du personnel de l'époque pour ces mesures. Etant donné qu'aucun document apportant des informations supplémentaires sur le zéro du marégraphe de cette époque n'a été trouvé, il est délicat d'appliquer un décalage vertical pertinent sur une période aussi longue. Il a donc été décidé de ne pas considérer ces données comme étant de mauvaise qualité.

Dans une moindre mesure, il est également possible d'identifier d'autres périodes semblant présenter des anomalies. Par exemple, entre 1904 et 1907, les niveaux annuels de PM et BM observés sont en moyenne, respectivement 6 cm et 9 cm plus bas que ceux prédits,

pour des écart-type similaires à ce qui est observé le reste du temps. Cette période correspond aux dernières années d'exercice de l'observateur Evain qui décède en poste en 1908 : il est alors possible qu'il n'ait pas été aussi rigoureux que par le passé. En 1960, le phénomène inverse est observé : les résidus moyens annuels de PM et BM atteignent respectivement +14 cm et + 9 cm. Nous verrons par la suite qu'à cette période le puits de tranquillisation était régulièrement envasé.

V.5.3. *Utilisation des données de pression atmosphérique historiques*

Les variations de la pression atmosphérique ont une influence directe sur le niveau de la mer : en période dépressionnaire, les basses pressions induisent une augmentation du niveau de la mer, et à l'inverse, en période anticyclonique, les hautes pressions provoquent une diminution du niveau marin. Ce phénomène, connu comme étant l'effet du baromètre inverse, est loin d'être négligeable et en moyenne il est estimé qu'une diminution (augmentation) de la pression de 10 hPa entraîne une augmentation (diminution) du niveau moyen de la mer de 10 cm. A cet effet mécanique peut s'ajouter les effets dynamiques liés à l'action du vent qui, lors d'une tempête et en fonction de leur direction, peut « pousser » les masses d'eau et ainsi influencer de façon non négligeable les surcotes observées. La prise en compte de l'évolution de la pression atmosphérique mesurée au cours de la même période se révèle donc essentielle dans le cadre du processus de validation de la série marégraphique. Cela permet de vérifier que des fluctuations du niveau de la mer pouvant être considérées comme erronées ont bien une réalité physique, ou à l'inverse, de permettre de déterminer des périodes pour lesquelles les mesures marégraphiques sont douteuses une fois corrigées de l'effet du baromètre inverse.

Un exemple de l'effet des conditions atmosphériques observé en novembre 1894 est présenté sur la Figure 51 sur laquelle il est possible de voir une importante surcote, atteignant +1.38 m. L'observateur de l'époque, A. Evain, note que *“Le 12 Novembre, de midi à 5h du soir, une violente tempête, ouragan même, s'est déchainé sur nos côtes de Bretagne. Le marégraphe de St-Nazaire [...] a été particulièrement éprouvé.”*. Dans cet exemple, il est clairement visible que la prise en compte des effets de la pression atmosphériques est primordiale pour permettre de qualifier ces données comme étant de bonne qualité.

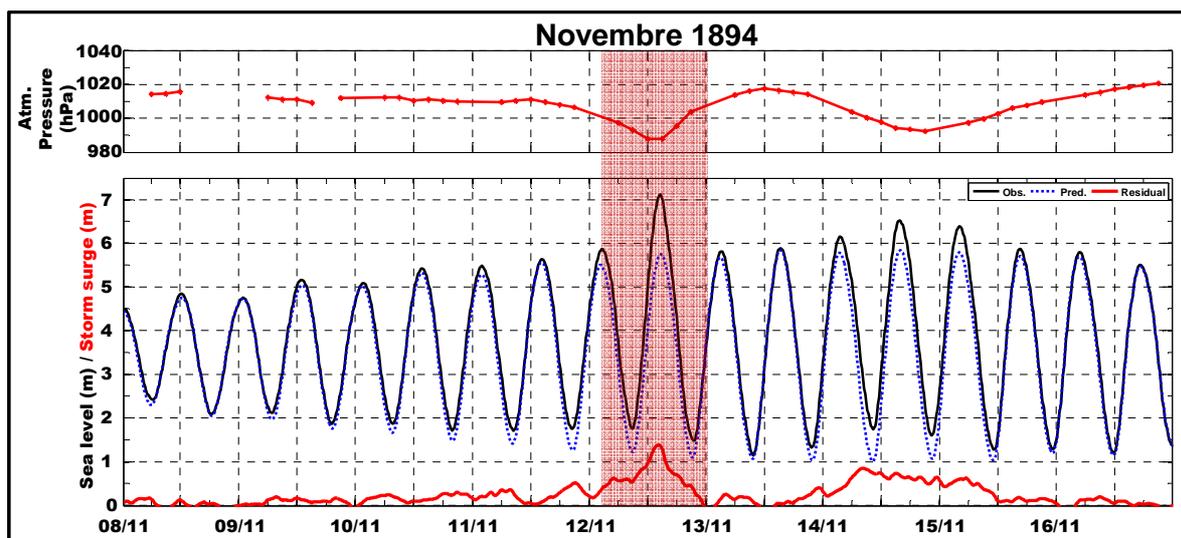


Figure 51 : Exemple de l'influence des conditions atmosphériques sur la mesure des hauteurs d'eau : surcote de PM observée le 12 novembre 1894 à Saint-Nazaire.

Haut : Pressions atmosphériques tri-horaires diurnes mesurées par l'observateur des marées de Saint-Nazaire, non corrigées ; Bas : Hauteurs d'eau observées/prédites, et calcul des résidus instantanés en hauteur.

Au cours de la période pendant laquelle le marégraphe était opéré par le SH (1863-1920), des mesures de pression atmosphérique étaient réalisées quotidiennement par l'observateur des marées (mesures tri-horaires diurnes) qui lisait la pression sur le baromètre au mercure de type fortin (Figure 8) et retranscrivait ces valeurs dans les registres de marées. Dans le cadre d'un stage, François Jude et Louis Brenon (L3, Université de La Rochelle) ont numérisé 30 ans de mesures atmosphériques à Saint-Nazaire (1863-1894). Lors de leur travail de numérisation, ils ont retranscrit les valeurs de pression brutes ainsi que les températures relevées conjointement afin de permettre la correction des pressions pour les rapporter à 0°C. En effet, l'unité des mesures barométriques est le 10^e de mm de mercure, or cet élément chimique subit une certaine dilatation en fonction de sa température qu'il faut considérer et corriger. Une correction liée à l'altitude à laquelle se trouve le baromètre est également réalisée afin de rapporter la pression au niveau de la mer.

La comparaison de ces pressions atmosphériques, mesurées à Saint-Nazaire, à celles issues de la reconstruction historique (1850-2003) des pressions atmosphériques moyennes quotidiennes au niveau de la mer en Europe Nord-Atlantique (données EMSLP ; Ansell *et al.*, 2006) a permis de vérifier la bonne qualité et la validité des données de pressions nouvellement numérisées. Les données EMSLP et le détail de la comparaison sont disponibles en annexes.

En se basant sur les 30 années pour lesquelles des données de pressions atmosphériques étaient disponibles, l'effet moyen du baromètre inverse à Saint-Nazaire a été quantifié. Pour cela, la relation liant le niveau moyen de la mer et la pression atmosphérique moyenne à Saint-Nazaire a été établie à partir des moyennes journalières pour les 2 variables

(Figure 52) : une différence de pression de 1 hPa induit une différence de niveau moyen d'environ 1.4 cm.

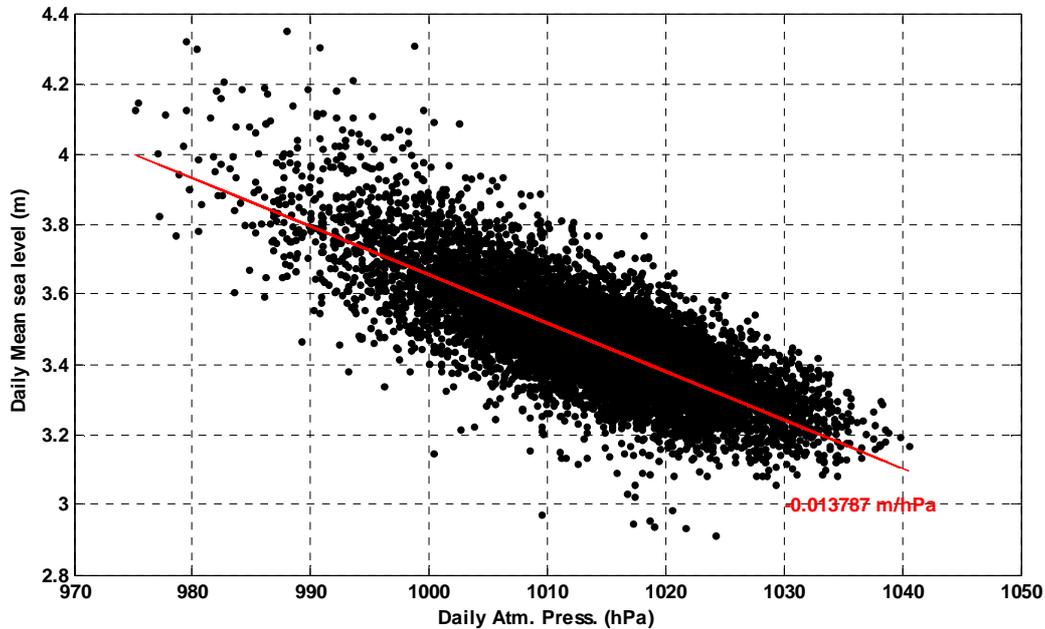


Figure 52: Niveaux moyens journaliers en fonction de la pression atmosphérique au niveau de la mer, mesurés à Saint-Nazaire entre 1863 et 1894.

En s'appuyant sur cette relation, les surcotes/décotes liées à l'effet du baromètre inverse ont pu être calculés pour les périodes pour lesquelles nous disposons de mesures de pressions (1863-1894). Ce calcul, bien que ne comprenant pas les composantes dynamiques liés à l'effet du vent, a été utilisé pour permettre la validation des données lors de l'inspection visuelle des résidus (exemple visible en Figure 53).

A partir de 1894, les données de pression n'ayant pas été numérisées, les données EMSLP ont été utilisées pour valider les mesures marégraphiques. Ces données sont moins précises (moyennes journalières) et tendent à surestimer les pressions en périodes dépressionnaires, mais permettent néanmoins d'avoir une idée des conditions atmosphériques.

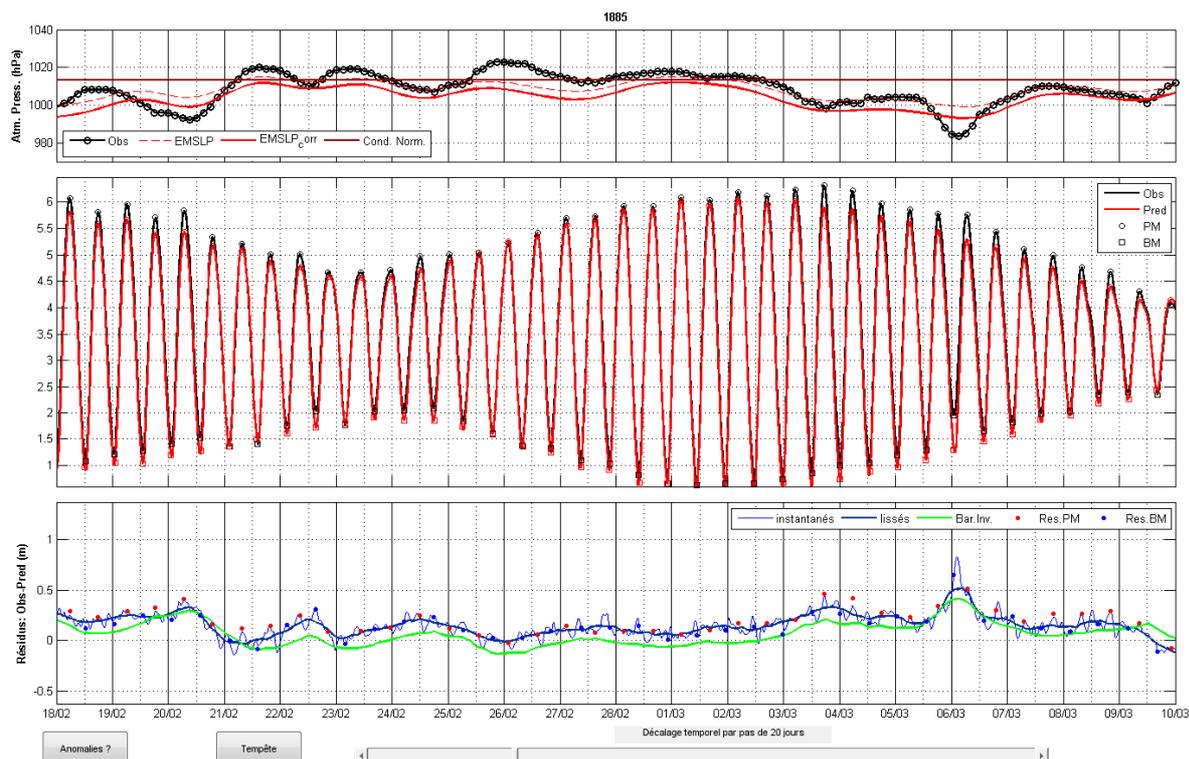


Figure 53 : Contrôle visuel de la qualité des mesures de hauteurs d'eau à Saint-Nazaire.

Haut : Mesures des pressions atmosphériques à Saint-Nazaire et données EMSLP ; Milieu : Hauteurs d'eau mesurées et prédites, extraction de PM/BM ; Bas : Résidus instantanés et de PM/BM et effet du baromètre inverse calculé à partir des pressions mesurées.

V.5.4. Nettoyage des données : définition des étiquettes qualité

Dans le but de définir la qualité des données, l'ensemble des mesures a été inspecté visuellement afin d'identifier de potentielles erreurs ou anomalies dans les mesures. Cette inspection a été réalisée grâce au logiciel TDB développé par Chersoft afin d'intégrer, de visualiser et de valider l'ensemble des données de marée et de courant du SHOM. En parallèle/complément à cette inspection, l'ensemble des méthodes présentées précédemment a été utilisé comme « outils d'aide à la validation », et il a été indispensable de revenir régulièrement sur les documents sources (marégrammes, registres, métadonnées) pour confirmer ou infirmer de potentielles anomalies.

Lors de cette étape de vérification, plusieurs types d'anomalies ont été identifiés :

- **Calage en hauteur.** Les sauts verticaux qui peuvent correspondre à 1) un mauvais calage du marégramme selon la verticale lors de la mise en place de ce dernier (exemple en Figure 54), ou à 2) un dérèglement de l'appareil suite à un incident technique (fil sorti de la poulie, flotteur échoué sur le fond, ...) ou à 3) de mauvaises conditions météorologiques. Dans ce dernier cas, les données ne présentent donc pas d'anomalie (cf. §V.5.3) ;

- **Erreur lors de la numérisisation.** Les erreurs intervenant lors de la numérisation des registres et des marégrammes liées à des confusions dans les courbes, ... (exemple présenté en Figure 55).

- **Calage en temps.** Les problèmes d'horloge qui peuvent correspondre à une erreur lors de la mise en place du marégramme sur le tambour impliquant un mauvais calage temporel, à une dérive de l'horloge, ou à l'application d'une correction en temps pas assez précise. Malgré tous les efforts faits pour rendre la série cohérente en temps (cf. § V.4.1), ce type d'anomalie n'est pas rare car il s'avère extrêmement difficile d'avoir une précision de l'ordre de la minute pour les données historiques (recommandation internationale du programme GLOSS de la COI). L'effet de ces problèmes d'horloge est clairement visible sur les résidus instantanés calculés à Saint-Nazaire sur la Figure 54 ;

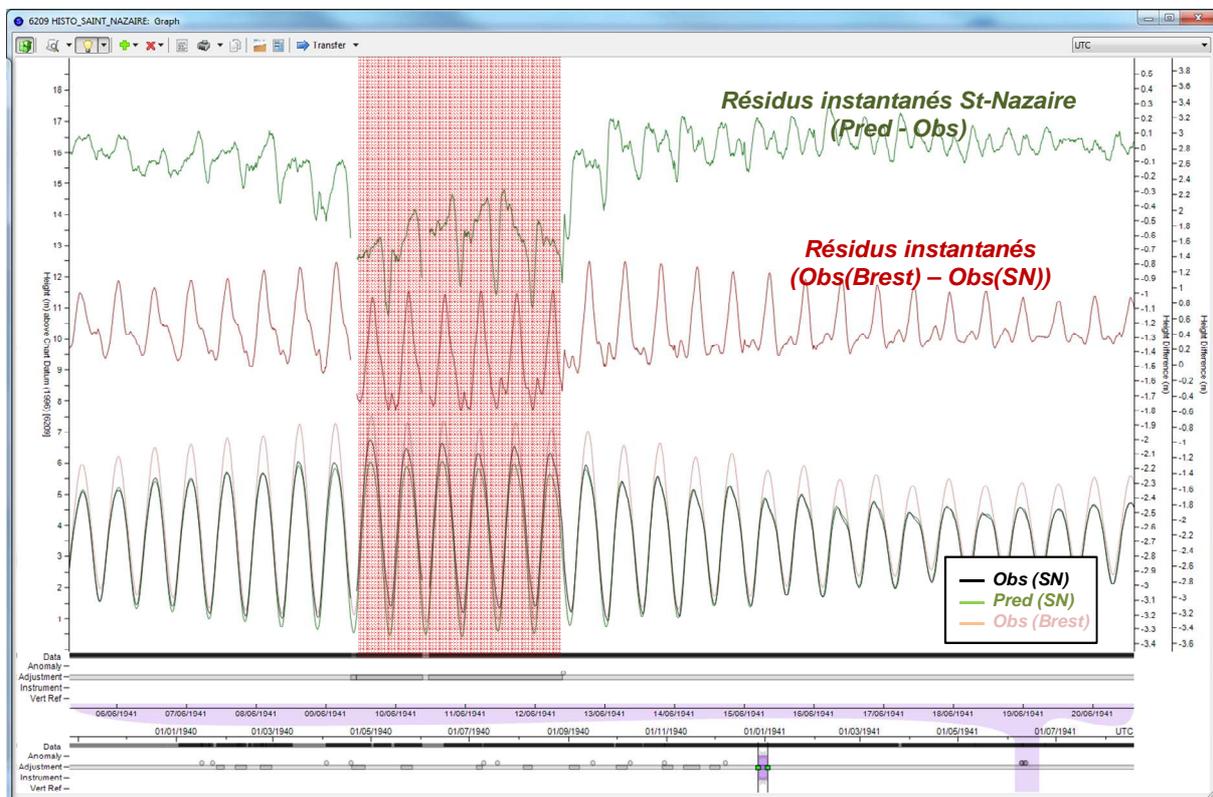


Figure 54 : Exemple d'identification de saut vertical dans les mesures marégraphiques historiques de Saint-Nazaire en juin 1941.

Pour cet exemple, des indications ont été écrites sur les marégrammes par l'observateur des marées de l'époque (le 9 juin 1941 : « cotes trop fortes de 0.4m jusqu'à la fin de l'enregistrement » ; le 11 juin 1941 : « depuis la pose de la feuille, cotes trop fortes de 0.4m jusqu'au 12 juin à 10:12 »).

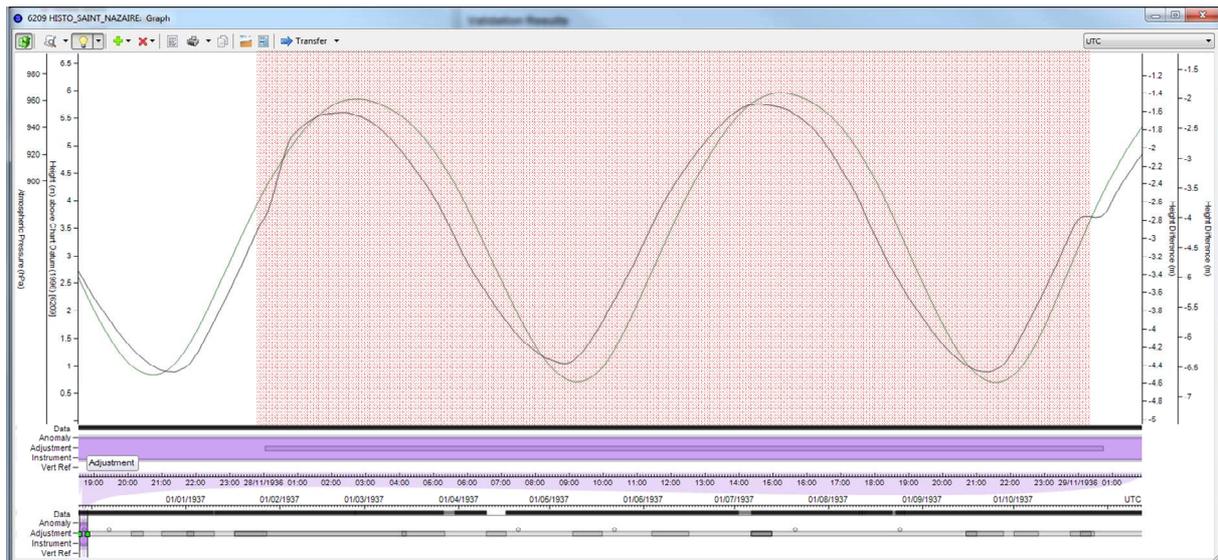


Figure 55 : Exemple d'erreur lors de la numérisation du marégramme avec NUNIEAU (La courbe du 27/11/1936 a été numérisée à la place de celle du 28/11/1936).

Parfois, les anomalies identifiées sont fidèles aux mesures et ne peuvent donc pas être corrigées. Par exemple, l'**envasement de la base du puits de tranquillisation** est un phénomène très souvent observable sur les données historiques de Saint-Nazaire.

Lorsque les observations historiques de hauteur d'eau nouvellement numérisées sont analysées, il est fréquent que les niveaux enregistrés lors des basses mers, lorsqu'ils sont comparés aux prédictions, soient surestimés et/ou déphasés. Ce phénomène, lorsqu'il est présent, est d'autant plus remarquable en périodes de grandes VE. Ceci semble indiquer un envasement important de la base du puits de tranquillisation. En effet, l'accumulation de vase dans le puits peut obturer en partie les orifices communiquant avec la surface libre extérieure, ralentissant de ce fait la vidange du puits (d'où le déphasage observé) et ne permettant pas d'atteindre au même moment un niveau d'eau similaire à l'extérieur et à l'intérieur du puits lors de la BM, surtout quand cette dernière est très basse en VE (illustration du phénomène en Figure 56). Lorsque l'envasement est important, il semble que cela impacte également les PM. Ce problème tend à la surestimation des niveaux moyens journaliers lors des périodes pendant lesquelles cela se produit. D'ailleurs, il a été identifié que, souvent, les corrélations entre la série de Saint-Nazaire et celle de Brest sont moins importantes à cause de ce phénomène.

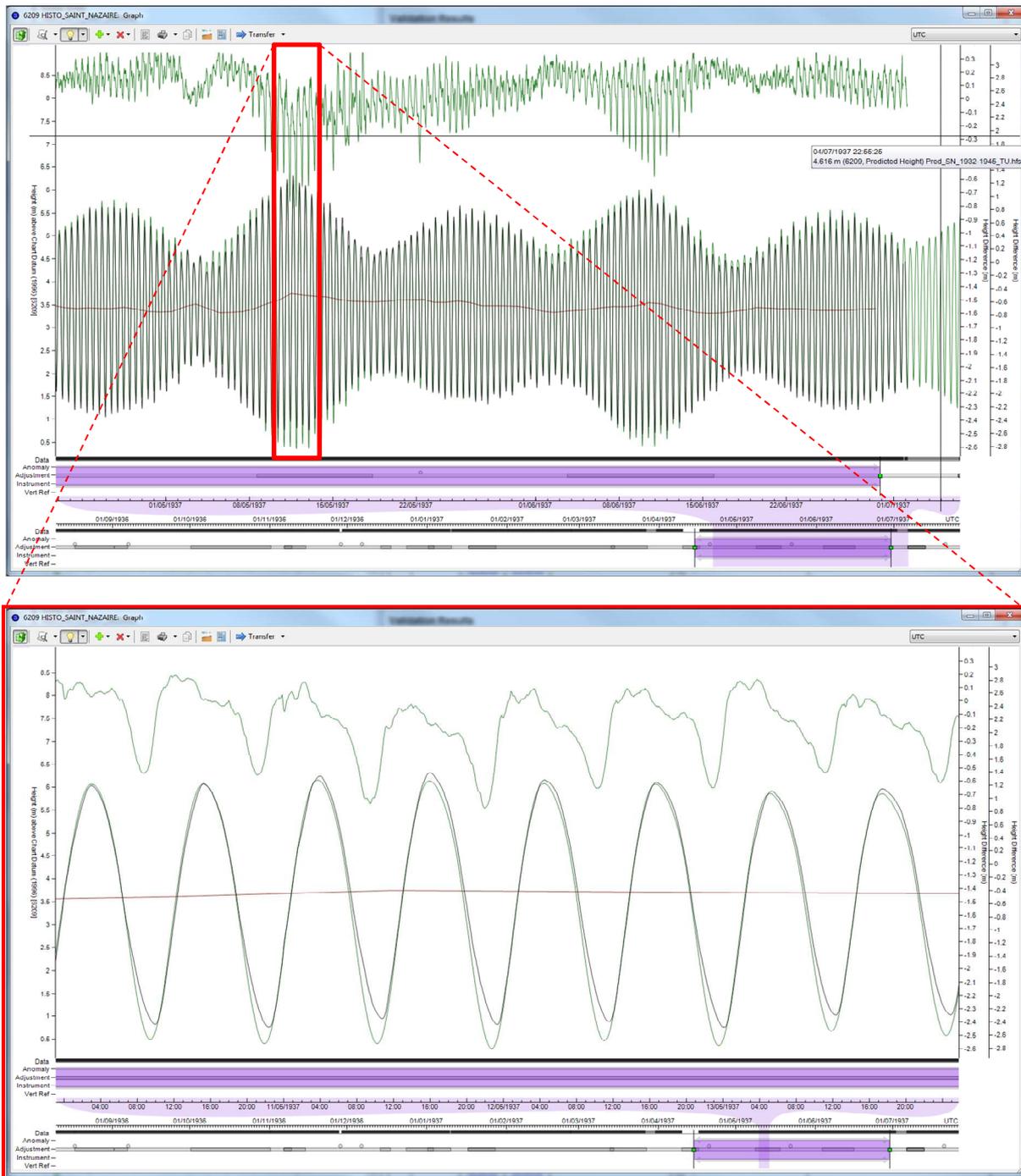


Figure 56 : Exemple d'une suspicion d'envasement de la base du puits de tranquillisation

Au cours de la période pour laquelle les hauteurs d'eau ont été extraites à partir des registres de marée (1863-1920), seules les données de hauteurs d'eau horaires ont été numérisées, et les résidus instantanés sont souvent impactés par des problèmes d'horloges. Ces caractéristiques rendent parfois l'identification visuelle du phénomène d'envasement assez délicate : les résidus instantanés sont régulièrement bruités du fait du léger décalage entre observations et prédictions, et le pas de temps horaire ne permet pas toujours d'observer la déformation des marées basses liée à un envasement. Ainsi, les périodes identifiées comme

présentant un problème d'envasement du puits de tranquillisation le sont souvent en se basant sur les dires des observateurs des marées, et lorsque cela est détecté grâce à l'inspection visuelle, le phénomène est alors assez bien marqué. Il est donc probable que le nombre de ces périodes ait été sous-estimé au cours de ces années (1863-1920).

Dès lors que les données de hauteurs d'eau sont extraites de marégrammes (à partir de 1932), il devient beaucoup plus aisé d'observer les conséquences d'un envasement de la base du puits de tranquillisation. Ainsi, lors des années 1935, 1936 et 1937, il est très fréquent d'observer ce type d'anomalies bien que cela n'ait jamais été indiqué par les observateurs de l'époque. Sur la période 1940-1944, ce phénomène se poursuit et il en est parfois fait mention sur les marégrammes :

- Sur le marégramme couvrant la période du 22 novembre au 30 novembre 1940, il est noté : *" Le 30 Nov, il a été procédé au nettoyage du fond du puits du marégraphe ainsi qu'à l'obturation des ouvertures entre le puits et l'extérieur. L'amortissement de la houle se retrouve grandement amélioré. Ing TPE Touchet"*

- sur le marégramme couvrant la période du 10 mai au 21 mai 1941, il est noté : *« Au dessous de la cote 0.2m, les cotes sont fausses, le flotteur ayant touché le fond du puits »,* ce qui semble indiquer qu'à cette époque il y avait environ 20 cm de vase au fond du puits.

- Sur le marégramme couvrant la période du 31 mai au 11 juin 1941, il est noté : *« A partir du 9 juin à 10h30 (H.S.) les cotes sont trop fortes de 0.4m Le nettoyage du puits a été effectué les 9 et 10 juin: 1/2 m3 de vase a été retiré, résultant vraisemblablement des déversements de vase à l'extrémité du môle. Touchet »*

- sur les marégrammes de novembre 1942 (Figure 57) jusqu'au 5 janvier 1943 : *« Nota: en fin d'enregistrement de la courbe, l'anomalie qui avait disparue s'est reproduite. Nous allons chercher si cela ne proviendrait pas d'un envasement éventuel du puits et d'un défaut de communication de ce dernier vers l'extérieur. L'Ing. TPE soussigné Touchet ».*

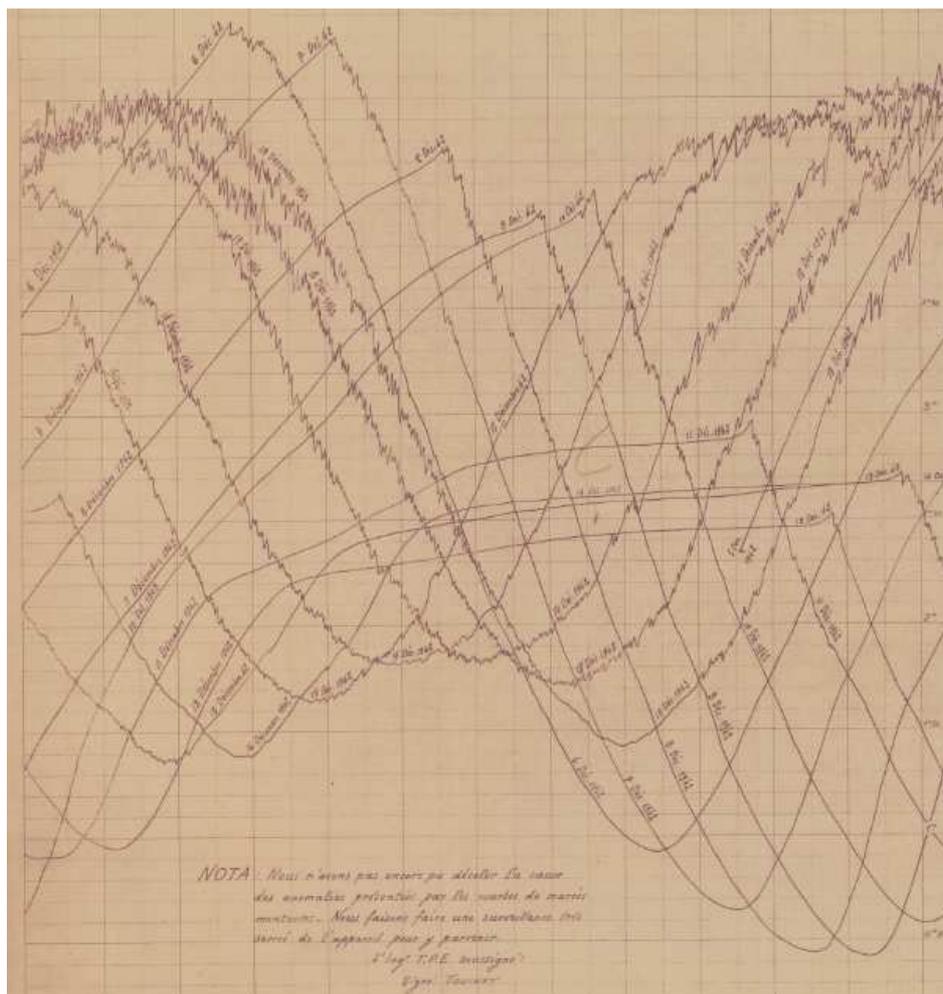


Figure 57: Anomalies, rapportées par l'observateur de marée Touchet dès novembre 1942, lors de la marée montante

Depuis la reprise des mesures de hauteurs d'eau en décembre 1949, des surestimations des hauteurs de BM et des déphasages sont régulièrement observés, en particulier lors des marées de VE. Le puits de tranquillisation semble être envasé : il n'est pas certain que ce dernier ait été vidangé avant la reprise des mesures. Cet(te) surestimation / déphasage semble s'aggraver le temps passant, du moins jusqu'à ce que le site du Vieux Môle soit abandonné et que le marégraphe soit relocalisé à l'extrémité sud de l'avant-port de Saint-Nazaire en décembre 1950.

Malgré le nouvel emplacement du marégraphe à partir de 1951, de nombreuses périodes sont fortement suspectées de présenter un envasement de la base du puits qui va parfois jusqu'à induire un déphasage des mesures de PM et BM. Dans ce dernier cas, les mesures sont directement identifiées comme étant de mauvaise qualité. Cette nouvelle localisation avait, entre autres, pour objectif de réduire ce phénomène d'envasement du puits, mais il semble que cela n'ait pas été aussi efficace qu'escompté. L'observatoire des marées de

Saint-Nazaire situé en embouchure d'estuaire rend ce problème d'envasement quasi-inévitable du fait de la quantité importante de sédiment transportée dans la Loire.

V.6. Résultats obtenus sur la série marégraphique historique de Saint-Nazaire

A l'issue des contrôles qualité de la série inédite de Saint-Nazaire, un fichier qualifiant les données selon un code inspiré de celui utilisé par Gouriou (2012) a été créé. Ce fichier constitue la synthèse du processus de validation et il permet de définir les périodes suivant différentes **étiquettes qualité** :

- pour lesquelles le contrôle qualité a montré que les données sont de qualité. Ces données sont identifiées comme de « **bonne qualité** » (étiquette 1) ;
- pour lesquelles il subsiste un doute sur la qualité des mesures. Ces données sont identifiées comme « **probablement bonnes** » (étiquette 2). ;
- pour lesquelles les données de hauteurs d'eau sont suspectées d'être de mauvaise qualité. Ces données sont identifiées comme « **probablement mauvaises** » (étiquette 3) ;
- pour lesquelles il ne fait aucun doute que la donnée est de « **mauvaise qualité** » (étiquette 4) ;
- pour lesquelles aucune procédure de contrôle n'a été appliquée (étiquette 0).

Lors de la validation des données, grâce à l'analyse des résidus et à la comparaison avec la série de Brest, de légers sauts verticaux semblaient être parfois identifiés (régulièrement inférieur à 10 cm, sur une période de quelques jours). Lorsqu'il n'était fait mention d'aucune anomalie sur les documents numérisés et qu'il était délicat de distinguer avec certitude que ce saut n'était pas dû aux conditions atmosphériques, les données de hauteurs d'eau correspondantes étaient identifiées comme « probablement bonnes ».

Lorsqu'un saut vertical important (régulièrement supérieur à 15 cm) se mettant en place de façon brutale était identifié, et que cela ne semblait pas pouvoir être la conséquence des conditions météorologiques, les données ont alors été qualifiées de « probablement mauvaise », voire de « mauvaise qualité » lorsque le saut dépassait plusieurs décimètres.

Une proportion importante des hauteurs d'eau qualifiée de « probablement mauvaise qualité » concerne les périodes pendant lesquelles le puits de tranquillisation était envasé ou suspecté de l'être. Dans ce cas, ce sont souvent les mesures des hauteurs de BM qui ont été impactées par ce phénomène, et il est régulièrement possible d'identifier visuellement la hauteur d'eau à partir de laquelle les mesures ne sont plus fidèles à la réalité. Ainsi, cette hauteur est notée dans le fichier définissant la qualité des données, pour permettre par la suite, en fonction de ce pour quoi les données seront utilisées, de requalifier comme probablement bonne les mesures au-delà de cette hauteur seuil. Dès lors que l'envasement du puits semble avoir un effet négatif sur l'ensemble du cycle tidal (déphasage permanent, surestimation de la hauteur de PM liée à la vidange lente du puits, ...), l'ensemble de la période est identifiée comme étant de « mauvaise qualité ».

Le processus de validation étant très consommateur de temps car cela implique l'utilisation de méthodes variées et des allers retours réguliers aux documents papiers, seules les données nouvellement numérisées ont pu être qualifiées. Pour autant, les données non inédites déjà disponibles numériquement (ex : sites internet REFMAR, SONEL, PSMSL, ...) sont identifiées comme validées.

L'ensemble des données numérisées de au cours de cette étude a ainsi été qualifié, ce qui correspond à plusieurs centaines de périodes. La représentation graphique synthétisant le travail de validation des données est présentée en Figure 58. Pour avoir le détail de ces contrôles qualité, se référer au fichier qualité fourni avec les données.

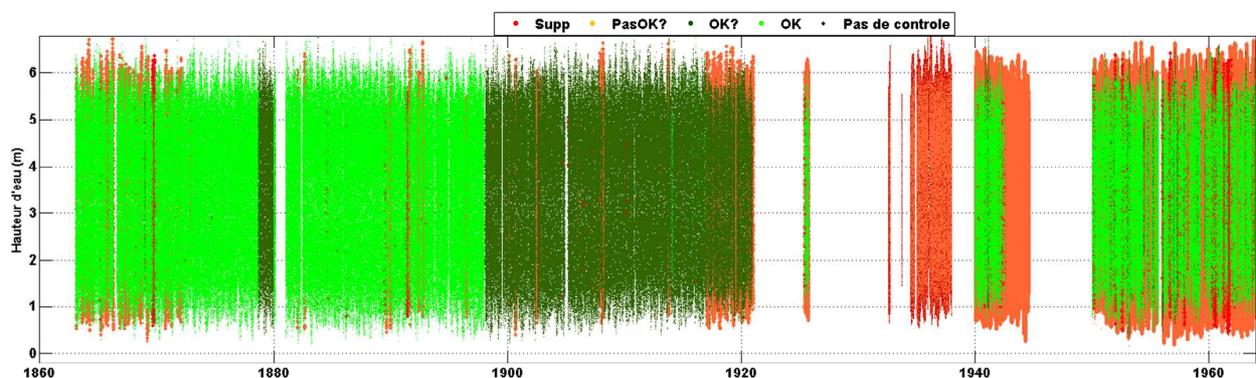


Figure 58 : Synthèse du travail de validation des données: application d'étiquettes qualité aux données horaires de hauteurs d'eau.

Globalement, il est possible de voir que les données de Saint-Nazaire sont de bonne qualité :

- environ 53 % des données horaires sont identifiées comme étant de bonne qualité.
- environ 30 % des données horaires sont qualifiées comme étant de probable bonne qualité.
- seules 15 % des données sont identifiées comme potentiellement de mauvaises qualité. Cette proportion peut sembler importante, mais des périodes longues de plusieurs années (ex : 1934-1937, 1942-1944, ...) ont dû être qualifiées ainsi car il subsiste d'importants doutes quant au calage des données. Dans le cas où de nouvelles informations viendraient annuler ces doutes et permettre une correction fiable, cette quantité serait donc considérablement réduite.
- Environ 1% des données sont supprimées.

A partir de ces étiquettes qualité, il est maintenant possible de calculer les niveaux moyens caractéristiques enregistrés à Saint-Nazaire depuis 1863 selon les standards

internationaux (cf § II.2.1) en se basant sur les données qualifiées comme bonnes, probablement bonnes et déjà publiées. Les données de 1821 ne sont pas considérées dans cette analyse car elles ne correspondent qu'à des mesures diurnes, ce qui rend le calcul classique de niveau moyen journalier impossible. La Figure 59 présente l'évolution des NMj, NMm et NMa calculés entre 1863 et 2014, et synthétise les principales corrections appliquées aux données pour rendre la série cohérente.

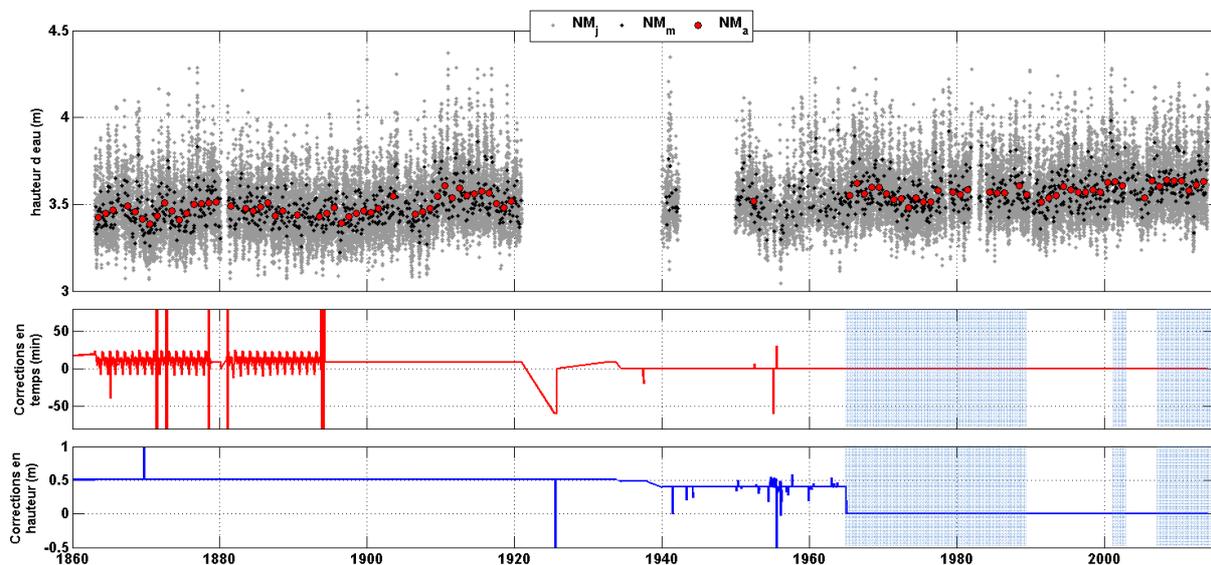


Figure 59 : Calcul des niveaux moyens journaliers, mensuels et annuels à Saint-Nazaire à partir de la série marégraphique reconstruite qualifiée (haut) ; corrections temporelles (milieu) et corrections en hauteurs (bas) appliquées pour rendre la série cohérente.

Pour les calculs de NM, seules les données étiquetées 0,1 et 2 ont été considérées. Les périodes indiquées en bleu correspondent aux données numériques censées être validées.

Il est possible de noter que de nombreux NMa n'ont pu être calculés lors de périodes pour lesquelles la quantité de données valides semblait suffisante. Ceci est particulièrement frappant lorsque les années 1950 sont analysées. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce constat :

- Le fait de supprimer la totalité de l'enregistrement marégraphique dès lors que plusieurs BM présentent des anomalies liées à une suspicion d'envasement, a pour conséquence de supprimer plusieurs jours de données par mois. Suivant les recommandations internationales, si ce nombre de jours est supérieur à 15 jours, il n'est pas possible de calculer le NMm, et si cela se répète sur 2 mois au moins dans l'année, le NMa ne peut être déterminé.
- Le calcul des NMj grâce au filtre de Demerliac nécessite 3 jours d'observations continues pour le calcul d'un niveau moyen journalier. Ainsi, même si le phénomène d'envasement n'impacte que peu de BM dans un mois, le nombre de jours pour lesquels le NMj ne peut être calculé augmente peut-être de façon importante du fait de la méthodologie, rendant ainsi impossible l'estimation des niveaux moyens à plus long terme.

A Saint-Nazaire, où les phénomènes d'envasement de la base du puits ne sont pas rares du fait de sa situation en embouchure d'estuaire, il serait intéressant d'estimer des niveaux moyens autres que ceux conseillés par les standards internationaux. Par exemple, à l'image de ce qu'a été réalisé par Pouvreau (2008) pour la série historique de Brest, les niveaux moyens pourraient être calculés à partir des hauteurs de pleines mers uniquement. Ceci permettrait alors, en plus de pouvoir exploiter les mesures de 1821, d'augmenter le nombre de données valides. Par manque de temps, ceci n'a pu être réalisé car cela impose une étude préliminaire pour vérifier que les PM ne sont pas trop impactées par l'envasement du puits, et/ou lorsqu'elles le sont, déterminer un critère permettant de supprimer automatiquement ces périodes. Ce critère seuil pourrait être basé sur l'étude différentielle PM/BM du déphasage lié à l'envasement, sur étude des résidus,....

Bien qu'il soit frustrant de devoir se passer d'un nombre important de données, le volume considérable de mesures de hauteurs d'eau numérisées au cours de cette étude permet d'analyser l'évolution des composantes du niveau marin à Saint-Nazaire de façon inédite. De plus, si les données pour lesquelles des incertitudes demeurent (calage en hauteurs, envasement du puits rendant impossible le calcul de NMj, NMm,...) ne peuvent être utilisées pour le calcul de tendances à long-terme, elles pourront l'être en fonction de l'objectif de l'étude. Par exemple, lorsque les événements extrêmes de surcote sont étudiés, il n'est pas nécessaire que la série dans son entier soit bien calée en hauteur. Si une tempête, dont la durée est de quelques jours, survient au cours d'une période (longue de quelques semaines) pour laquelle aucun saut n'est suspecté, il suffit dès lors de calculer la surcote en se basant sur l'analyse harmonique de cette courte période. Des tests ont montré qu'à partir de 4 semaines de mesures, la surcote est estimée de manière satisfaisante.

VI. Evolutions des composantes du niveau de la mer à Saint-Nazaire

VI.1. Evolution des caractéristiques de la marée

Dans l'hypothèse où le milieu environnemental ne subit pas de modifications majeures au cours du temps, les caractéristiques de la marée restent stables. Sur une période historique, il est très rare d'observer une réelle stabilité des ondes de marées car l'observatoire marégraphique a changé au cours du temps et son environnement a également plus ou moins évolué, que ce soit de manière naturelle ou anthropique. Le site de Saint-Nazaire ne fait pas exception à la règle : les mesures marégraphiques ont été réalisées grâce à plusieurs types d'appareils, à deux endroits différents, en utilisant des puits de tranquillisation aux caractéristiques diverses (*cf.* §IV.2.), et la zone portuaire ainsi que la Loire, à plus large échelle, ont largement été anthropisées depuis le 19^{ème} siècle (*cf.* §IV.1.). Néanmoins, cette étude préliminaire de l'évolution des constantes harmoniques reste intéressante car elle permet, dans un premier temps, de vérifier la qualité des données reconstruites et d'identifier de potentielles anomalies dans la série. Cette analyse permet également d'observer, voire quantifier, les conséquences des modifications du milieu sur l'évolution des caractéristiques de la marée.

L'évolution de constantes harmoniques dominantes (ondes semi-diurnes : M2, S2 et N2 ; onde quart-diurne M4) pour la série reconstruite de Saint-Nazaire est présentée en Figure 60. Ces constantes ont été calculées grâce à des analyses harmoniques réalisées tous les ans depuis 1863 dès lors que le nombre de jours disponibles pour l'année considérée était supérieur à 244, soit environ 8 mois. Les données de hauteurs d'eau qui ont été qualifiées de probable mauvaise qualité car un doute subsiste quant au zéro du marégraphe utilisé ont également été prises en compte dans cette analyse, ce qui permet de vérifier notre validation.

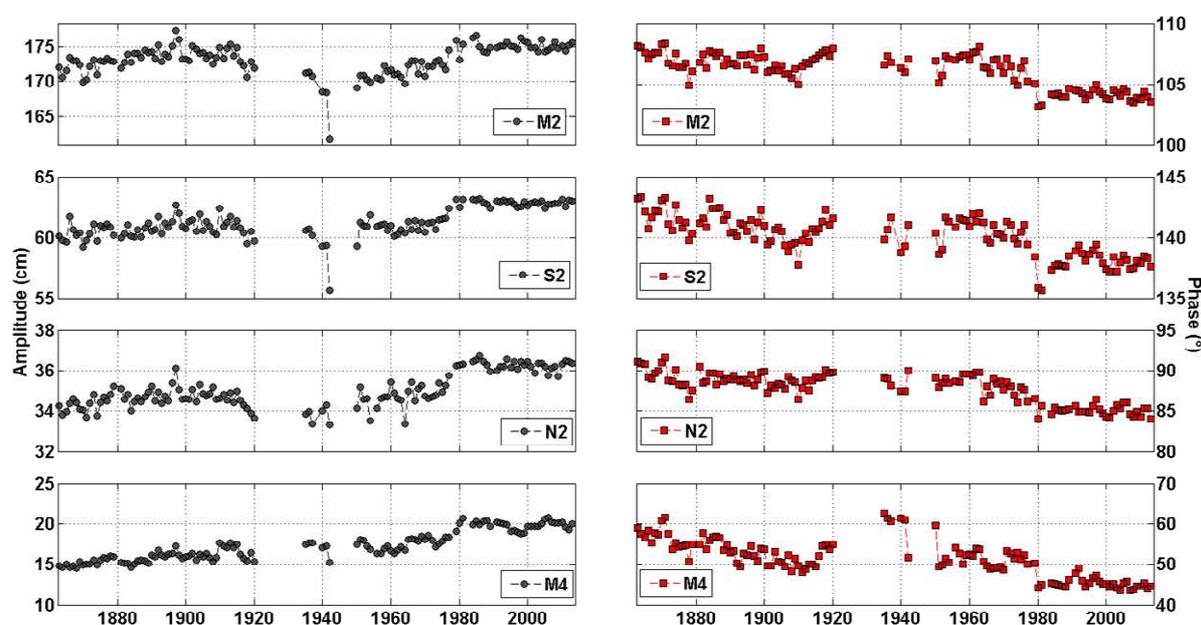


Figure 60 : Evolution des constantes en amplitude (gauche) et en phase (droite) des harmoniques dominantes (M2, S2, N2 et M4) pour la série reconstruite de Saint-Nazaire sur la période 1863 – 2014.

Lorsque l'évolution de l'ensemble des ondes est observée, il est possible d'identifier une rupture assez flagrante dans les caractéristiques des ondes en 1979-1980. A partir de cette date, les amplitudes des constantes harmoniques tendent à légèrement augmenter avant de se stabiliser. Antérieurement, elles étaient caractérisées par des variations interannuelles d'ordre centimétrique à pluri-centimétrique (cas des ondes M2, S2 et N2) ou une tendance à l'augmentation (cas de l'onde M4 dont l'amplitude a augmenté de près de 5 cm entre 1863 et 1980). Une rupture est également observée lorsque les phases sont analysées : à partir de 1979-1980, quelle que soit l'onde considérée, la phase diminue brusquement avant de se stabiliser. Il se trouve que ce changement brutal des composantes harmoniques de la marée coïncide avec destruction du local du marégraphe dans la nuit du 27 au 28 décembre 1979 suite à la collision d'un navire (*cf.* § IV.2.3.4). Lors de la reconstruction de l'abri du marégraphe (début 1980), un nouveau puits de tranquillisation, avec de nouvelles caractéristiques (diamètres du puits et de l'ouverture vers l'extérieure), a alors été mis en place. Ceci a alors eu pour conséquences de modifier les constantes harmoniques à Saint-Nazaire. Simon (2007) a montré que même d'infimes modifications du puits pouvaient induire des déphasages et des variations dans les amplitudes des ondes de marées.

La période 1937-1943 se détache également des autres années. De nombreuses anomalies sont observées au cours de cette période : diminution brutale de 8 et 5 cm des amplitudes des ondes M2 et S2 en 1943, phase de l'onde M4 plus importante d'environ 10° de 1937 à 1942. Selon toute vraisemblance, les mesures acquises au cours de ces années sont entachées d'erreurs ou d'anomalies. Ce constat tend à justifier la qualification de cette période comme étant de mauvaise qualité lors du processus de validation des données.

Néanmoins, s'il est fait exception des périodes indiquées ci-dessus, il est possible de noter que les principales constantes sont globalement assez stables au cours du temps, ou du moins ne montrent que peu de changements brutaux que ce soit en amplitude ou en phase. Ceci tend donc à montrer la bonne qualité globale des données. De plus, cela permet de visualiser que les mesures n'ont été que très faiblement impactées par le changement de localisation du marégraphe en 1950.

Lorsque l'évolution de l'amplitude de l'onde M2 est analysée en détail, il est possible de noter qu'elle varie entre 170 et 175 cm pendant la période 1863 – 1980 : des tendances à l'augmentation sont observées entre 1863 et 1900, puis entre 1950 et 1980 alors que l'amplitude moyenne diminue entre 1900 et 1950. Ce même type d'allure, pouvant s'apparenter à une cyclicité à longue période dont l'origine reste inconnue, a également été observée à Brest (Pouvreau *et al.*, 2006) et pourrait être donc le résultat d'un phénomène à large échelle. Cependant, à Brest, les variations sont de moins grandes amplitudes (de l'ordre de 3-4 cm) et les maximas/minimas sont déphasés par rapport à ce qui est observé à Saint-Nazaire. Ainsi, ces variations pourraient être les conséquences locales des différents travaux d'envergure effectuant dans la Loire depuis le 19^{ème} siècle.

L'onde M4 montre une augmentation régulière de son amplitude depuis 1863 associée à une diminution progressive de sa phase. Il serait là encore intéressant d'essayer de comprendre les origines de cette évolution lors d'analyse ultérieures.

VI.2. Tendance long terme

La reconstruction de la série historique de hauteurs d'eau mesurées à Saint-Nazaire depuis le milieu du 19^{ème} siècle permet d'appréhender l'évolution séculaire du niveau marin, ce qui était jusqu'alors impossible. Lors du processus de validation, de nombreux niveaux moyens mensuels et annuels ont été qualifiés de probablement mauvaise qualité, ce qui a eu comme conséquence de les écarter pour le calcul de tendance. Néanmoins, la reconstruction permet d'apporter un volume considérable de mesures inédites, notamment entre 1863 et 1920, et entre 1950 et 1965. L'évolution du niveau de la mer à Saint-Nazaire a été calculée à partir des NMm dans le but d'augmenter le nombre de moyennes pris en compte dans l'analyse. Si, pendant longtemps les tendances étaient calculées à partir des NMa, les recommandations actuelles conseillent l'utilisation des NMm (PSMSL). Les résultats ne diffèrent que de peu tout en diminuant l'erreur liée à l'estimation (Daubord, 2015). La Figure 61 présente l'évolution des NMm validés à Saint-Nazaire entre 1863 et 2014, et les tendances linéaires estimées pour différentes durées.

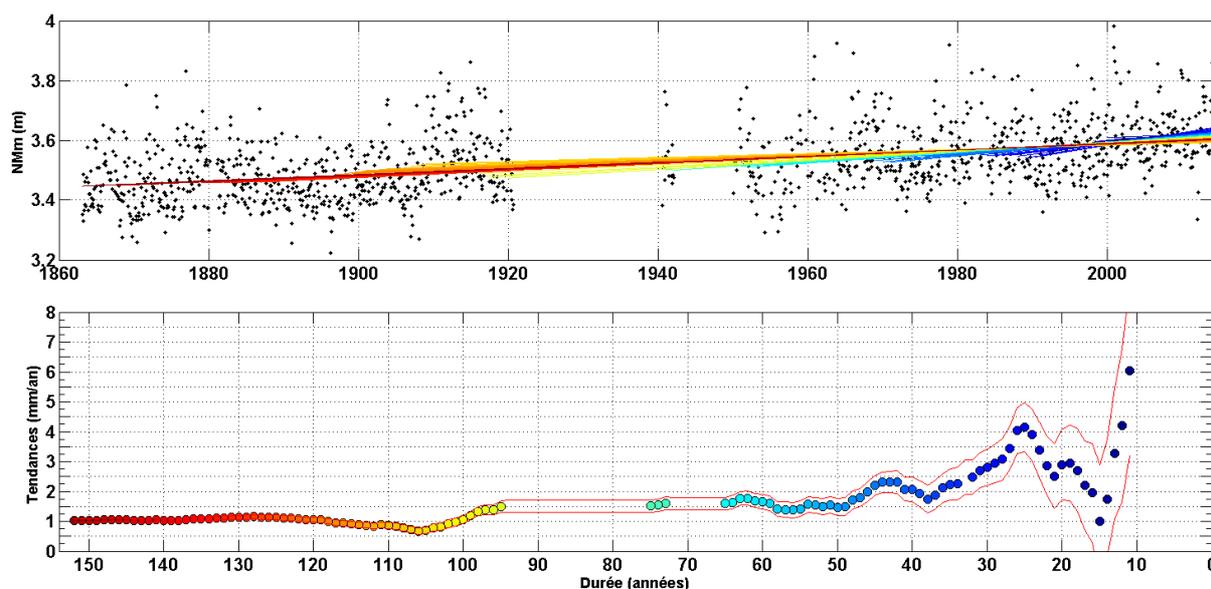


Figure 61: Evolution des niveaux moyens mensuels calculés à partir de la série marégraphique historique validée de Saint-Nazaire (Haut). Calcul des tendances linéaires et de l'erreur type associée (ligne rouge) en fonction de la durée d'observation(Bas).

Les couleurs utilisées pour les tendances (droites de régressions en haut, et valeurs en bas) varient du bleu au rouge en fonction de la durée considérée pour effectuer les calculs (courtes et longues respectivement). Les tendances ont été calculées à partir de 2014 : une durée de 100 ans correspond donc à une période comprise entre 1914 et 2014.

Entre 1863 et 2014, une augmentation globale du niveau moyen de la mer de l'ordre de $+1.03 \pm 0.05$ mm/an est observée à Saint-Nazaire.

Ce résultat tend à être plus faible en comparaison de ce qui est rapportée dans la littérature pour des périodes similaires : entre 1860 et 2010, la tendance estimée à Brest est de $+1.32 \pm$

0.07 mm/an, celle de la série composite du Pertuis d'Antioche est de $+1,38 \pm 0.07$ mm/an et celle de Liverpool estimée à $+ 1.44 \pm 0.13$ mm/an (Gouriou, 2012). Cette faible évolution obtenue à Saint-Nazaire reste néanmoins cohérente à ± 2 écart-types près avec les autres longues tendances présentées. Cette évolution est discutée dans les paragraphes suivants.

En fonction de la durée considérée pour estimer l'évolution du niveau marin à Saint-Nazaire, il est possible d'observer des variations dans les valeurs calculées.

Les tendances calculées restent relativement constantes lorsque la série considérée débute dans la période 1863 – 1890 : le taux d'élévation du niveau marin est alors compris entre $+1.02 \pm 0.06$ mm/an (période [1872 – 2014]) et $+1.16 \pm 0.07$ mm/an (période [1887 – 2014]). Ceci tend à montrer que l'élévation du niveau de la mer à Saint-Nazaire est relativement faible à la fin du 19^{ème} siècle. Ce résultat est conforme à ce qu'observent Gouriou (2012) pour la série du Pertuis d'Antioche et Wöppelmann *et al.* (2006) pour la série de Brest : les auteurs estiment que le niveau marin y est stable, avec des tendances respectivement estimées à $+0.3 \pm 0.7$ mm/an ([1860 – 1889]) et à -0.09 ± 0.15 ([1807 – 1890]) mm/an.

Les tendances calculées à Saint-Nazaire à partir des années comprises entre 1890 et 1909 diminuent progressivement jusqu'à atteindre 0.68 ± 0.11 mm/an lorsque le calcul est réalisé sur la période [1909 - 2014].

Lorsque les tendances sont calculées au cours du 20^{ème} siècle, les vitesses de l'évolution du niveau marin tendent à augmenter :

- Depuis 1950 (soit 64 ans de mesures), l'évolution est estimée à $+1.59 \pm 0.22$ mm/an.
- Depuis 1970 (soit 44 ans de mesures), l'évolution est estimée à $+2.20 \pm 0.33$ mm/an.
- Les tendances calculées avec moins de 30 ans de données sont très variables car fortement influencées par les régimes climatiques interannuels à large échelle. De plus, le plus faible nombre de NMm considéré dans le calcul de ces tendances induit des erreurs type relativement importantes (plus de 0,6 mm/an).

Dans le but de vérifier la cohérence de l'ensemble de ces résultats, les tendances obtenues à Saint-Nazaire sont comparées à celles issues de l'analyse des séries de Brest et du Pertuis d'Antioche, stations situées à quelques centaines de kilomètres de Saint-Nazaire sur la façade atlantique (Figure 62).

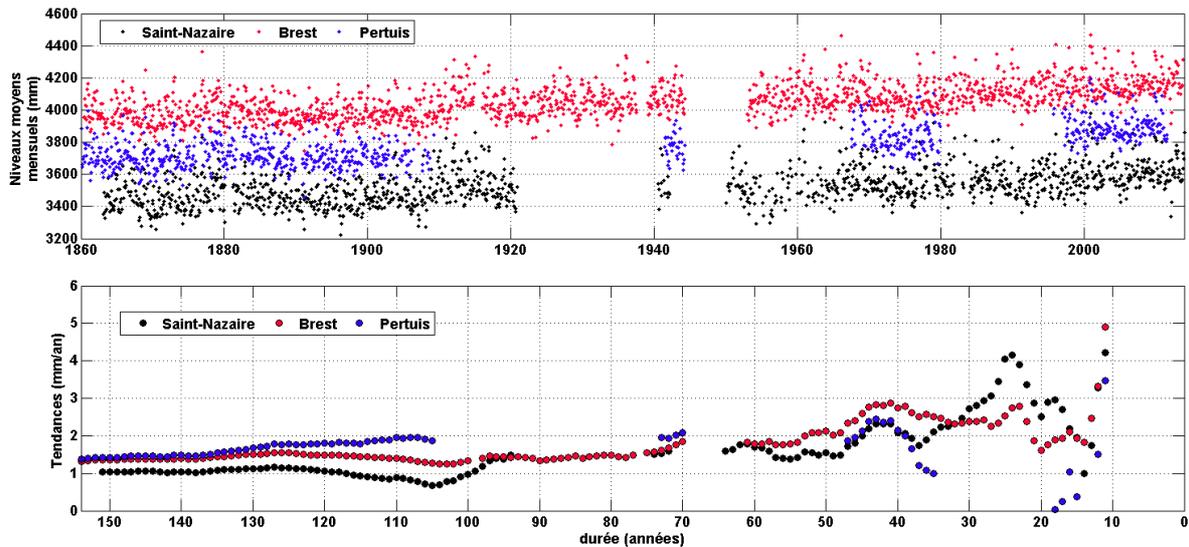


Figure 62 : Niveaux moyens mensuels de Saint-Nazaire, de Brest (source : SONEL) et du Pertuis d'Antioche (Gouriou, 2012) (Haut) et comparaison des tendances du niveau marin calculées pour chaque site (Bas).

Les tendances ont été calculées à partir de 2014 : une durée de 100 ans correspond donc à une période comprise entre 1914 et 2014.

Si les tendances calculées les 30 dernières années ne sont pas considérées, car trop variables, l'analyse de cette comparaison met en évidence le fait que :

- les tendances calculées pour les trois séries depuis les années 1950-1960 sont assez cohérentes entre elles, bien que le niveau marin à Brest tend à augmenter légèrement plus rapidement au cours de cette période.

- les tendances calculées à Saint-Nazaire à partir des NMm valides au cours des années 1940 sont cohérentes avec celles estimées à Brest pour la même période (respectivement $+1.54 \pm 0.21$ mm/an et 1.61 ± 0.16 mm/an ; [1941-2014]). La tendance obtenue sur le littoral charentais pour cette même période est plus importante : 1.94 ± 0.23 mm/an.

- les tendances calculées à Saint-Nazaire à partir de la période 1863 – 1915 sont globalement plus faibles que celles obtenues pour les 2 autres séries bien cohérentes entre elles (du moins jusqu'en 1885 environ). Les tendances obtenues à Saint-Nazaire sont en moyenne plus basse de 0.3 mm/an que celles de Brest.

Plusieurs causes potentielles pourraient expliquer cette probable sous-estimation de l'élévation du niveau marin à Saint-Nazaire depuis le 19^{ème} siècle :

- **L'application de possibles « mauvaises » corrections lors de la mise en cohérence verticale de la série reconstruite.** Lors de la reconstruction de la série historique de Saint-Nazaire, des corrections verticales ont dues être apportées aux données de 1863 – 1920 pour les rendre cohérentes au reste des mesures. Suite à l'analyse des documents historiques retrouvés, il a été décidé d'appliquer une correction constante de 11 cm sur l'ensemble de la période, mais selon les sources considérées, ce décalage était compris entre 10 et 13 cm. Cette

incertitude de 3 cm peut paraître faible, mais étant donné qu'elle concerne une période de près de 60 ans en début de série, elle a un impact non négligeable sur les tendances alors calculées. Si la correction constante appliquée sur les données avait été de 10 cm ou 13 cm, les tendances obtenues sur la période 1863-2014 auraient été respectivement de 1.12 ± 0.06 mm/an ou de $+0.84 \pm 0.06$ mm/an. De plus, cette correction a été considérée comme constante entre 1863 et 1920, or la coexistence d'un zéro hydrographique et d'un zéro du marégraphe distincts a pu entraîner des décalages longs de quelques jours/mois qui n'auraient pas été détectés lors de la qualification des données.

- **Mouvements verticaux terrestres.** Lors de cette étude, le site de l'observatoire des marées de Saint-Nazaire a été considéré comme stable au cours du temps (*cf.* §IV.3.2). Cette hypothèse a été confirmée pour le 20^{ème} siècle, mais peu d'indices étaient à notre disposition pour ce qui est du 19^{ème} siècle. Ainsi, si l'extrémité de la digue avait tendance à s'affaisser au cours de cette période, les hauteurs d'eau relatives mesurées seraient alors plus importantes au cours du temps, ce qui induirait donc une diminution de la tendance calculée depuis 1863. Le fait que la digue était construite sur un socle rocheux semble rendre cette cause peu vraisemblable, d'autant plus que les repères de nivellement sont stables au cours du 20^{ème} siècle. Une antenne GNSS est déployée sur le toit de la capitainerie du port de Saint-Nazaire depuis 2013²². Cette installation trop récente ne nous permet pas encore de pouvoir déterminer l'existence, ou pas, de mouvements verticaux terrestres dans ce secteur. De plus, cette antenne GNSS n'est pas positionnée au niveau de la digue, nous empêchant de savoir si cet ouvrage d'art est stable ou s'il s'affaisse.

- **Causes « naturelles ».** Il est également possible que ces faibles tendances calculées à partir du 19^{ème} siècle soit à mettre en relation avec les modifications naturelles et anthropiques qu'a connu la Loire au cours de cette période.

Dans le but de comprendre ces différences et d'identifier les causes de cette potentielle sous-estimation des tendances du niveau marin depuis le 19^{ème} siècle, il serait nécessaire d'investiguer plus en détail la série de Saint-Nazaire. Ceci pourrait être fait notamment par le biais d'intercomparaisons poussées entre plusieurs séries pour identifier des possibles problèmes de calage vertical.

VI.3. Evolution du marnage

Quelles que soient les incertitudes restantes liées au référencement vertical des données, il est vraisemblable que s'il subsiste des décalages verticaux non corrigés, ils se mettent en place sur des périodes relativement longues (ex : période 1935-1937). Lors de la phase de validation des données, la majorité des sauts se mettant en place sur une courte échelle temporelle ont été corrigés ou supprimés. Ainsi, le calcul de l'évolution du marnage à Saint-Nazaire sur les temps historique peut être réalisé de manière relativement fiable, et si

²² <http://www.sonel.org/spip.php?page=gps&idStation=3424>

quelques erreurs demeurent, elles sont en nombre très réduit en comparaison de la quantité de valeurs totale.

A partir de la série de Saint-Nazaire reconstruite, le marnage a été estimé pour chaque marée pour laquelle les hauteurs de PM et BM ont pu être extraites, ce qui correspond à environ 85 000 valeurs. Afin de faciliter l'étude de l'évolution historique du marnage, le marnage mensuel moyen a été calculé dès qu'au moins 30 valeurs de marnages ont pu être calculées, soit environ 15 jours de données (Figure 63).

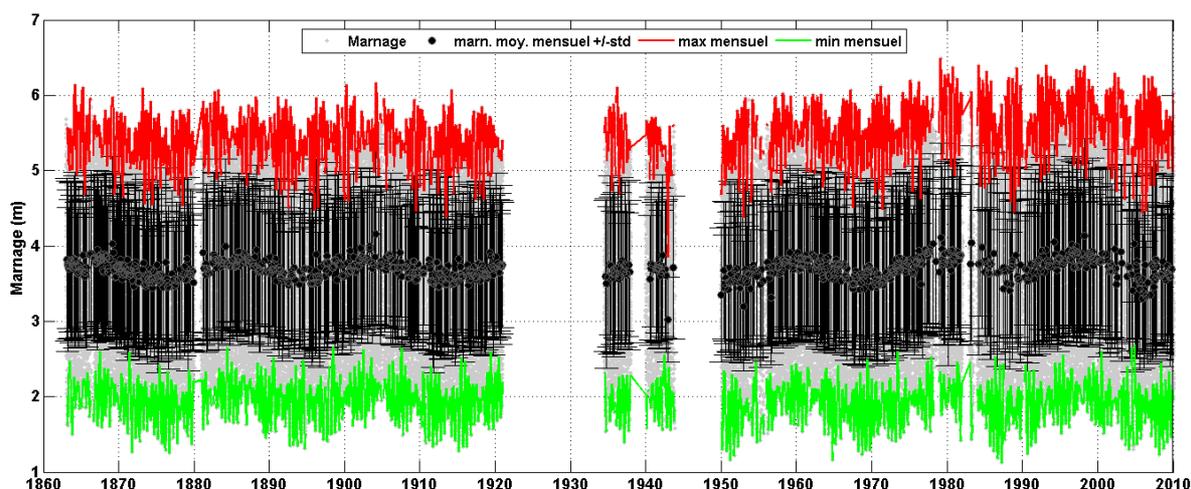


Figure 63 : Evolution du marnage mensuel moyen à Saint-Nazaire depuis 1863.

Le marnage mensuel moyen est relativement stable à Saint-Nazaire depuis 1863 : la moyenne sur l'ensemble de la période est de 3.7 m, et la tendance à l'augmentation est très faible, le marnage moyen n'augmentant qu'en moyenne de 2 mm par an, soit environ 2 cm en 100 ans. Cette tendance est sans commune mesure avec ce qui est observé plus en amont : à Nantes, le marnage est passé d'un peu plus de 1 mètre en 1900 à environ 5 mètres en 2000, du fait de la chenalisation de la Loire (Winterwerp, 2013)

Bien que le marnage reste en moyenne stable depuis le 19^{ème} siècle à Saint-Nazaire, il est néanmoins possible de noter plusieurs faits remarquables. L'influence du cycle lunaire nodal de 18,6 ans est clairement visible sur l'évolution de des marnages mensuels moyens depuis 1863. Lorsque ces oscillations long-terme sont analysées en détails, il semble que leur amplitude augmentent avec le temps et soient soumises à une plus grande variabilité. Dans le but de mieux définir cela, les marnages maximaux et minimaux ont été extraits pour chaque mois analysés et l'écart-types des marnages mensuels moyens calculés (Figure 64). L'analyse de l'évolution de l'écart-type montre une tendance à l'augmentation de la variabilité (+0.71mm/an). Ce phénomène s'explique par le fait que les PM tendent à être de plus en plus

hautes (+1.85 mm/an) alors que les BM tendent à être de plus en plus basse (-0.44mm/an) au fil du temps.

Cette tendance pourrait être à lier aux changements induits par l'Homme sur la zone d'étude. Il semble que l'impact du nouveau puits de tranquillisation installé en 1980 soit là encore assez important car une rupture semble se dégager à cette période surtout en ce qui concerne les marnages maximaux (plus importants à partir de 1980 et caractérisés par une variabilité forte, Figure 64). Néanmoins, les travaux d'aménagements et de dragages intervenus dans l'estuaire ne sont sans doute pas non plus étrangers à cette évolution. Pour définir l'origine(s) potentielle(s) de ces modifications, il est nécessaire d'effectuer d'autres analyses et d'investiguer les relations entre cette évolution et les travaux en Loire.

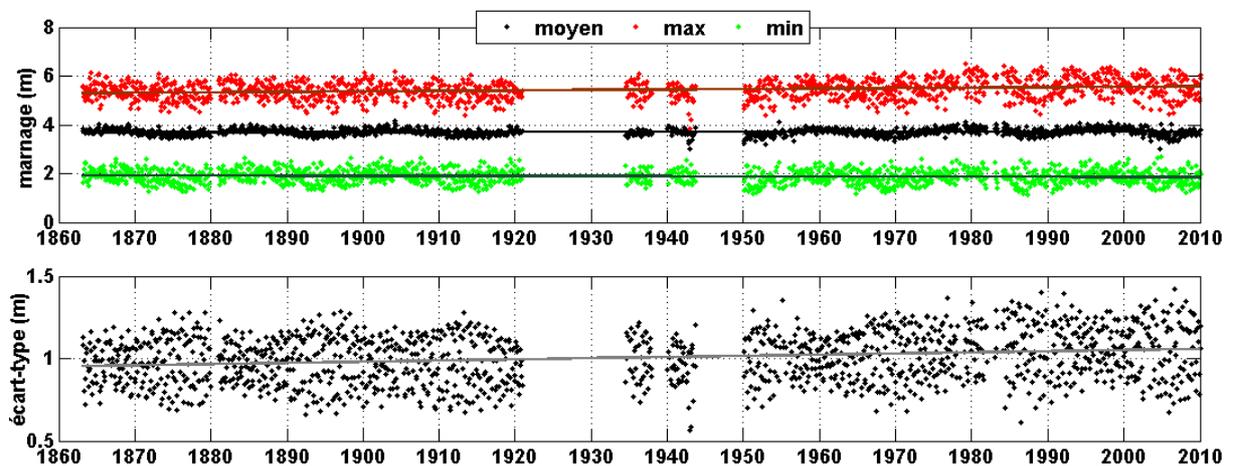


Figure 64 : Evolution des marnages mensuels maximaux, moyens et minimaux à Saint-Nazaire depuis 1863 (haut) et évolution de l'écart-type (bas).

VII. Conclusion & Perspectives

La valorisation des archives scientifiques en lien avec la marégraphie, qui sont longtemps restées oubliées, est de plus en plus répandue internationalement (*e.g.* Bradshaw *et al.*, 2015). Cette activité de « Data rescue » a pour premier objectif d'assurer la pérennité de ces documents historiques en les numérisant, mais permet également l'amélioration de la connaissance des évolutions historiques du littoral, et notamment la quantification de l'évolution séculaire du niveau moyen de la mer. En effet, bien qu'un réseau marégraphique se soit mis en place le long des côtes françaises dès le milieu du 19^{ème} siècle, ces enregistrements de hauteurs d'eau anciens de plus d'un siècle ne sont pas exploités car toujours au format papier. C'est dans ce contexte que ce projet de reconstruction de la série marégraphique historique de Saint-Nazaire a été élaboré afin d'améliorer la connaissance de l'évolution des composantes du niveau marin sur le littoral atlantique français.

La première étape de ce projet a consisté à rechercher l'ensemble des données et/ou documents en lien avec la mesure marégraphique à Saint-Nazaire. La totalité des documents marégraphiques retrouvés permet de couvrir une période d'environ 195 ans (de 1821 à aujourd'hui) et de reconstruire au moins 125 ans de mesures continues du niveau marin à Saint-Nazaire. Grâce à l'analyse des métadonnées, il a été possible d'augmenter la cohérence et la qualité de la série finale. Ces documents ont notamment été très utiles pour suivre les différents zéros du marégraphe utilisé depuis 1863. Malgré le nombre important de sources étudié, des doutes, ou imprécisions, subsistent encore parfois pour certaines périodes quant au référencement vertical des mesures de hauteurs d'eau. Ces doutes peuvent être dus au manque de données contextuelles associé à un manque d'expertise du personnel en charge des marégraphes ou des encadrants locaux en place (cas des années 1935-1937), ou lié au fait que les informations sont parfois incohérentes entre elles (confusion entre le zéro hydrographique et le zéro instrumental, imprécision dans les mesures de ces zéros induisant parfois des différences de quelques centimètres, ...).

L'ensemble des données inédites retrouvées a été numérisé, ce qui correspond à plus de 500.000 valeurs de hauteurs d'eau horaires à partir des registres de marée (1863-1920) et plus de 8000 courbes journalières extraites à partir d'environ 500 marégrammes. Lors de cette étude, 30 années de mesures de pressions atmosphériques, réalisées à l'observatoire des marées de Saint-Nazaire selon un pas de temps tri-horaires diurne, ont également été digitalisées (1863-1894). Ces données se sont révélées essentielles lors de la validation des données.

Grâce aux métadonnées, il a été possible de rendre la série reconstruite cohérente en temps (TU) et en hauteur (selon le zéro hydrographique défini en 1996). Des procédures ont été adaptées ou développées pour permettre de détecter et corriger/supprimer les anomalies dans les mesures.

La qualification de ces données est une étape nécessaire avant toute analyse ultérieure. Par manque de temps, seules les données inédites ont pu être validées dans le cadre de cette étude. Ce processus a été réalisé grâce à l'utilisation de différentes méthodes (analyse des résidus en temps et en hauteurs des PM et BM, comparaisons inter-série, utilisation des données de pression atmosphérique pour évaluer l'effet du baromètre inverse) associées à une

inspection visuelle des données. Cela a permis d'identifier les périodes pour lesquelles les données étaient de mauvaise qualité (environ 16 % des données numérisées). Il a ainsi été possible de mettre en évidence que l'observatoire des marées de Saint-Nazaire était régulièrement soumis à un envasement de la base du puits de tranquillisation. Bien que ce problème impacte surtout les BM de VE (périodes de quelques jours), sa répétition a rendu impossible le calcul, selon les recommandations internationales, de nombreux NMj, NMm et NMa.

L'analyse de l'évolution des niveaux moyens mensuels validés à Saint-Nazaire a permis d'estimer son augmentation depuis 1863 à $+1.03 \pm 0.05$ mm/an. Cette tendance est plus faible que celles observées par ailleurs sur la façade atlantique sur des périodes comparables : à Brest (Pouvreau, 2008) et au Pertuis d'Antioche (Gouriou, 2012), les tendances calculées entre 1860 et 2010 sont respectivement de $+1.32 \pm 0.07$ mm/an et $+1,38 \pm 0.07$ mm/an. Cette faible évolution de la tendance séculaire à Saint-Nazaire pourrait être réelle, mais pourrait également être due à des problèmes de calage vertical des données entre 1863 et 1920. Il a par exemple été calculé que si le zéro instrumental était descendu d'un centimètre sur cette période, la tendance aurait alors été estimée à 1.12 ± 0.06 mm/an. Cette potentielle sous-estimation semble d'autant plus curieuse que les tendances calculées à partir des années 1950 sont cohérentes avec celles calculées à Brest et sur le littoral charentais.

A partir de ce jeu de données inédit, il a également été possible d'appréhender l'évolution des caractéristiques de la marée à Saint-Nazaire sur l'échelle de temps séculaire. Il a ainsi été possible de voir l'impact de la modification du puits de tranquillisation sur les caractéristiques des ondes de marée dominantes. Le marnage moyen semble relativement stable à Saint-Nazaire depuis le 19^{ème} siècle, mais les marnages mensuels maximaux et minimaux tendent respectivement à augmenter et diminuer. Ceci pourrait être du à l'anthropisation de l'estuaire et/ou aux modifications de l'observatoire des marées. Cette analyse préliminaire mériterait d'être approfondie, et l'influence de cette évolution sur la dynamique sédimentaire pourrait également être investigué.

Les données vont être mises à dispositions sur le site internet REFMAR.

Ce rapport constitue l'aboutissement de ce projet, néanmoins il serait intéressant d'approfondir encore certains aspects :

La période 1863-1920 mériterait d'être inspectée en détail afin de s'assurer qu'elle n'est affectée d'aucun problème de calage des données en vertical, ou si ce n'est pas le cas d'estimer ce décalage, les métadonnées retrouvées à l'heure actuelle ne permettant pas de clarifier la situation.

Bien que de nombreuses méthodes aient été utilisées pour tenter de fournir un produit le plus qualitatif possible, il est vraisemblable que la série finale soit encore perfectible. Par exemple, il serait extrêmement intéressant d'automatiser le plus possible les analyses pour obtenir une plus grande objectivité dans les résultats. Lors du processus de validation des données et de la définition des étiquettes de qualité, le développement d'outils de détection « automatique » des périodes pendant lesquelles le puits de tranquillisation est envasé serait

d'une grande aide. Toutes les périodes identifiées comme de mauvaise qualité le seraient alors selon les mêmes critères, car il est difficile de garder cette objectivité et surtout cette constance lors des contrôles visuels.

Il serait en outre intéressant de tenter de calculer les niveaux moyens en se basant uniquement sur les hauteurs de pleines mers uniquement. Ceci permettrait alors, en plus de pouvoir exploiter les mesures de 1821, d'augmenter le nombre de données valides dans l'hypothèse où l'envasement du puits n'impacte que les PM. Cela induit une étude préliminaire pour vérifier que les PM ne sont pas trop impactées par l'envasement du puits, et/ou lorsqu'elles le sont, pour déterminer un critère permettant de supprimer automatiquement ces périodes.

Enfin, cette nouvelle série marégraphique historique devrait permettre d'apporter des éléments primordiaux pour l'étude séculaire des niveaux extrêmes. Elle permet la redécouverte de tempêtes passés (§ V.5.3) associées aux relevés de pression atmosphérique mais en s'intéressant également aux relevés inédits de température de l'observatoire.

Bibliographie

- Ansel T.J. *et al.*, 2006. *Daily Mean Sea Level Pressure Reconstructions for the European–North Atlantic Region for the Period 1850–2003*. *Journal of Climate*, vol 19, No. 12, pp 2717-2742, doi: 10.1175/JCLI3775.1
- Bradshaw, E., Rickards, L. & Aarup, T., 2015. *Sea level data archaeology and the Global Sea Level Observing System (GLOSS)*. *GeoResJ* (6), pp. 9-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.005>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214242815000133>)
- BUREAU DES LONGITUDES, 2011. *Ephémérides astronomiques : Connaissance des temps*. Edition 2011, EDP Sciences, 350 pp.
- Daubord C., 2015. *Rapport technique final du projet NIVEXT*. Rapport SHOM, 448 pp.
- Demerliac, A. 1973. *Le niveau moyen de la mer, calcul du niveau journalier*. Rapport SHOM.
- Douglas, B.C., 1991. *Global sea level rise*. *Journal of Geophysical Research* 96, pp. 6981-6992.
- Gouriou T., 2012. *Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18ème siècle en Charente-Maritime*. *Sciences de la Terre*. Thèse, Université de La Rochelle, 475 pp.
- Maquet J.F., 1974. Aménagement de l'estuaire de la Loire. *La Houille Blanche*, n° 1/2, pp. 79-89. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1974007>
- Pouvreau, N., Miguez B.M, Simon B. & Wöppelmann G., 2006. *Evolution de l'onde semi-diurne M2 de la marée à Brest de 1846 à 2005*. *C.R. Géosciences* 338, pp. 802-808.
- Pouvreau N., 2008. *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*. *Climatologie*. Thèse, Université de La Rochelle, 468 pp.
- Privat-Deschanel & Focillon, 1877. *Dictionnaire général des sciences théoriques et appliquées. Partie 1*. Ed. Delagrave – Garnier frères. BNF, 1160 pp. ([Lien Galica](#)).
- Simon B., 2007. *La marée océanique côtière*. Ed. Institut Océanique, 432 pp.
- UNESCO, 1985. *Manual on sea level measurement and interpretation*. IOC, Manuals and guides, 83 pp.
- Vacher Antoine, 1908. *L'état actuel du port de Saint-Nazaire : Société de Géographie commerciale de Saint-Nazaire, Saint-Nazaire, son port, son commerce*. *Annales de Géographie*, 17, n°93. pp. 271-276 ; ([Lien](#), consulté en juillet 2016).
- Wöppelmann, G., Pouvreau, N. & Simon, B. 2006. *Brest sea level record : a time series construction back to the early eigtheenth century*. *Ocean Dynamics* 56 (5-6), pp. 487-497.
- Winterwerp, J.C., Wang, Z.B, van Braeckel, A., van Holland, G. & Kösters, F., 2013. *Man-induced regime shifts in small estuaries—II: a comparison of rivers*. *OceanDynamics*. DOI 10.1007/s10236-013-0663-8

ANNEXES

Annexe 1. Détails des livrables numériques fournis	116
Annexe 2. Travail sur les pressions atmosphériques enregistrées à l'observatoire des marées de Saint-Nazaire entre 1863 et 1920.....	118

Annexe 1. Détails des livrables numériques fournis

Le détail des livrables numériques fournis avec le rapport est décrit ci-après :

- Les données brutes de hauteurs d'eau issues de la numérisation (dossier : **00_Données_brutes**):
 - *1_RawData_SNazaire_Registres-Bruts_1821-1921.txt* : données brutes issues de la numérisation manuelle des registres de 1821 (hauteur convertie en mètre) et de 1863 à 1921. Pas de temps ¼ heure diurne (1821) et horaire pour le reste ;
 - *2_RawData_SNazaire_Registres-Bruts_1925.txt* : données brutes issues de la numérisation manuelle des mesures de 1925. Pas de temps ¼ heure diurne ;
 - *3_RawData_SNazaire_Nunieau_05min_1932-1965.txt* : données brutes issues de la numérisation des marégrammes grâce à NUNIEAU. Pas de temps 5 minutes ;
 - *4_RawData_SNazaire_TdB_TU_1h_1957-2014.txt* : données brutes issues de l'export des depuis TDB. Pas de temps 1 heure ;
 - *Donnees_brutes_SN_1821_2014.txt* : ensemble des données disponibles concaténé. Les pas de temps des mesures est variable en fonction de la source (données registres horaire, données marégrammes 5 minutes, ...).

- Les données brutes de hauteurs d'eau corrigées des éventuelles anomalies identifiées (dossier : **01_Données_brutes_sansAnomalies**):
 - *Anomalies_hauteurs_v070716.txt* : permet d'identifier les périodes pour lesquelles des anomalies ont été observées (erreur de retranscription, ...) et défini l'action à réaliser (suppression, correction) ;
 - *Donnees_brutes_SN_1821_2014_SA.txt* : données de hauteurs d'eau brute de Saint-Nazaire sans anomalies.

- Les données de hauteurs d'eau sans anomalies rendues cohérentes en temps et exprimée en TU (dossier : **02_Données_TU_SA**):
 - *Coherence_temporelle.txt* : permet de définir les corrections en temps à appliquer en fonction des périodes considérées
 - *Reglages_Horloge.txt* : Retranscription des écarts de l'horloge notés dans les registres de marées
 - *Donnees_brutes_SN_1821_2014_SA_TU.txt* : Jeu de données, sans anomalies et sans homogénéisation verticale, convertie en TU grâce aux corrections citées précédemment. Le pas de temps est fidèle aux mesures brutes.

- Les données de hauteurs d'eau, en TU et sans anomalies, rendues cohérentes en vertical selon le ZH96 (dossier : **03_Données_TU_CM96_SA**):
 - *Suivi_zero_mesures_1821_2014.txt* : permet de définir les corrections en hauteur à appliquer pour rapporter les mesures au ZH96, en fonction des périodes considérées.
 - *Corrections_coherence_verticale.txt* : Vision des corrections en hauteurs pour cohérence verticale
 - *Donnees_brutes_SN_1821_2014_SA_TU_CM96.txt* : Jeu de données en TU dont les hauteurs sont définies selon le ZH96 (grâce aux corrections citées précédemment). Le pas de temps est fidèle aux mesures brutes.

- Les données de hauteurs d'eau, en TU, sans anomalies et selon le ZH96, associées aux étiquettes de qualité des données (dossier : **04_Données_TU_CM96_Flag**) :
 - *Etiquettes_qualité.txt* : Fichier issu de la validation des données, définissant la qualité des données par période par un jeu d'étiquette (0 : pas de contrôle, 1 : bonne, 2 : probablement bonne ; 3 : probablement mauvaise (lorsque lié à envasement, et associée une information de hauteur d'eau à partir de laquelle il y a problème) ; 4 : mauvaise ; 9 : Pas de données)
 - *Donnees_SN_1821_2014_SA_TU_CM96_Flag.txt* : Jeu de données, en TU et selon le ZH96, associé aux étiquettes qualité. Le pas de temps est fidèle aux mesures brutes.

- Les données de hauteurs d'eau validées (étiquettes 0, 1 et 2) interpolées à un pas de temps horaire (dossier : **05_Donnees_validees_interpolées_1h**) :
 - *Données_SaintNazaire_OK_TU_CM96_hor.txt*

- Les niveaux moyens calculées à partir des données validées horaires (**06_Niveaux_Moyens**) :
 - *NMj_valid_SaintNazaire.txt* : Niveaux moyens journaliers
 - *NMm_valid_SaintNazaire.txt* : Niveaux moyens mensuels
 - *NMa_valid_SaintNazaire.txt* : Niveaux annuels journaliers

Annexe 2. Travail sur les pressions atmosphériques enregistrées à l'observatoire des marées de Saint-Nazaire entre 1863 et 1920.

En janvier 2016, François Jude et Louis Brenon ont réalisé un stage de 5 semaines au SHOM dans le cadre de leur formation (L3, Université de La Rochelle) qui avait pour but de numériser et d'analyser ces mesures atmosphériques. Ils ont ainsi permis la retranscription de 30 ans de mesures atmosphériques à Saint-Nazaire (1863-1894). Lors de leur travail de numérisation, ils ont retranscrit les valeurs de pression brutes ainsi que les températures relevées conjointement afin de permettre la correction des pressions pour les rapporter à 0°C. En effet, l'unité des mesures barométriques est le 10^e de mm de mercure, or cet élément chimique subit une certaine dilatation en fonction de sa température qu'il faut considérer et corriger. Une correction liée à l'altitude à laquelle se trouve le baromètre est également réalisée afin de rapporter la pression au niveau de la mer. Pour réaliser toutes corrections, les étudiants ont suivis la procédure détaillée par Gouriou (2012).

Pressions atmosphériques mesurées à Saint-Nazaire vs. données EMSLP

Dans le but de vérifier la qualité et la validité des pressions atmosphériques mesurées au niveau de l'observatoire marégraphique de St-Nazaire nouvellement numérisées, ces dernières ont été comparées à celles issues de la reconstruction historique (1850-2003) des pressions atmosphériques moyennes quotidiennes au niveau de la mer en Europe Nord-Atlantique ([EMSLP reconstruction](#)²³).

Cette reconstruction a été réalisée dans le cadre du projet EMULATE (European and North Atlantic daily to MULTidecadal climATE variability) financé par la communauté européenne. L'objectif initial du projet était de définir les caractéristiques de la circulation atmosphérique en Europe et dans la région Nord-Atlantique. Les études précédentes portant sur le sujet étaient limitées par le manque de données de pressions au niveau de la mer, que ce soit d'un point de vue temporel (série pas assez longues) ou d'un point de vue spatiale (grille de données). C'est pourquoi, une étape primordiale de ce projet a consisté à développer un jeu de données 2D de MSLP (Mean Sea Level Pressure).

Ces données, connues sous le nom de EMSLP (European Mean Sea Level Pressure), correspond à une combinaison unique de 86 stations continentales et insulaires (Figure A. 1) des observations de pression marines selon une grille latitude-longitude, de pas 5 degrés, sur la région 70 W - 50 E, 25 à 70 N, de 1850 à 2003. La description de la méthodologie employée pour développer les EMSLP est décrite par Ansell *et al* (2006).

²³ Consulté en Aout 2016.

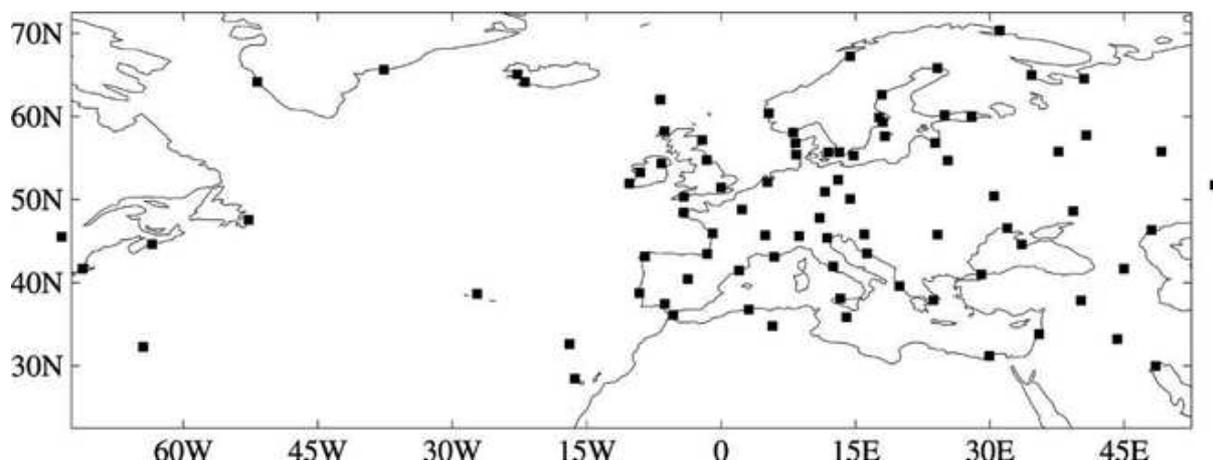


Figure A. 1 : Répartition des 86 stations continentales et insulaires EMSLP. Quarante-trois enregistrements de stations commencent entre 1850 et 1880; Tasiilaq, Potsdam et Tenerife commencent après 1880. Les années 1850-1880 correspondent à la période où aucun champ de J86 sont disponibles

Les données du EMSLP permettent donc de suivre l'évolution des conditions atmosphériques au cours du temps (Exemple en Figure A. 2).

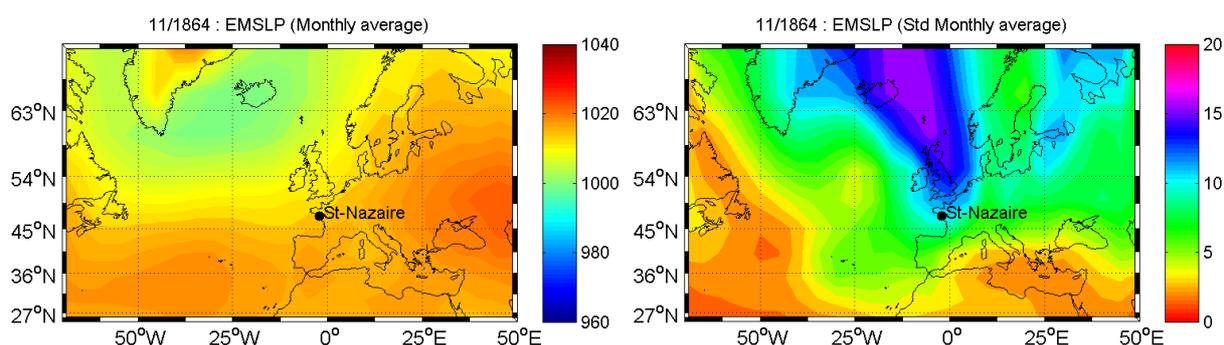


Figure A. 2 : Champs de pressions moyennes mensuels (Nov 1864) et écart-type selon le même mois. Données EMSLP

Dans le but d'extraire les pressions issues du EMSLP au niveau de Saint-Nazaire, une interpolation a été réalisée pour affiner l'extraction : les données extraites correspondent au pixel défini par une longitude $[-2.5^{\circ}\text{W} -2^{\circ}\text{W}]$ et une latitude $[47^{\circ}\text{N} 47.5^{\circ}\text{N}]$ dans lequel la ville de Saint-Nazaire est localisée $(-2.20^{\circ}\text{W}, 47,27^{\circ}\text{N})$.

Les données provenant du EMSLP correspondant à des valeurs moyennes quotidiennes, il est nécessaire de moyenner sur un jour les données mesurées à Saint-Nazaire dans le but de pouvoir comparer les deux jeux de données. Pour ce faire, une simple moyenne arithmétique a été réalisée dès lors qu'un jour contenait au moins 3 mesures de pressions.

Une première inspection visuelle rend compte de la corrélation entre ces 2 jeux de données (Figure A. 3), ce qui semble indiquer la bonne qualité des données de Saint-Nazaire.

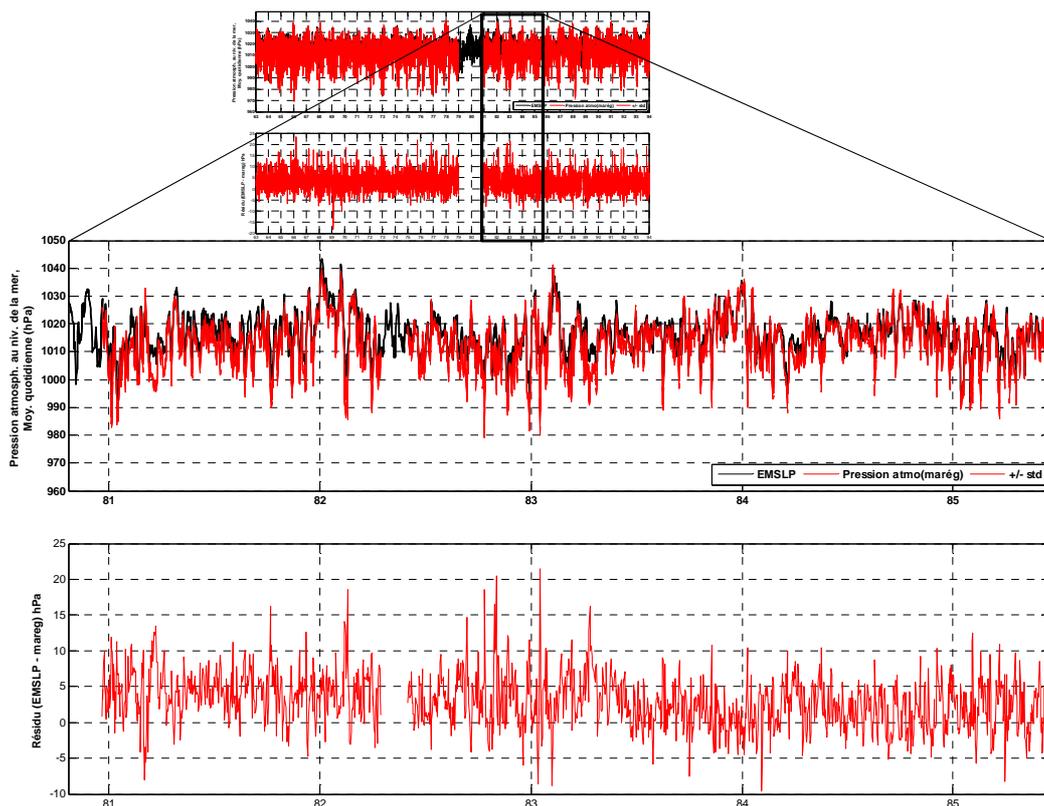


Figure A. 3 : Comparaison entre mesures réalisées à Saint-Nazaire et données issues du EMSLP.

L'analyse de l'évolution des coefficients mensuels de corrélation (Figure A. 4) permet de mettre en évidence que plus de 90 % des données ont un coefficient de corrélation supérieur à 0,8 et que seuls quelques mois ne présentent pas de corrélation significative.

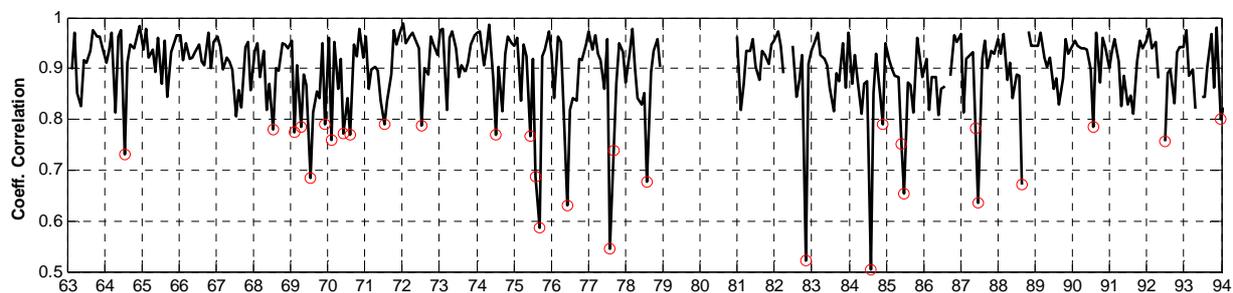


Figure A. 4 : Coefficients de corrélation entre EMSLP et Pressions mesurées à Saint-Nazaire entre 1863 et 1894. Les coefficients mensuels, calculés dès que le nombre de jour dans le mois est supérieur à 20.

Néanmoins, quelques remarques peuvent être faites à l'issue de cette comparaison :

- Sur l'ensemble de la période considérée, les pressions EMSLP sont légèrement plus élevées que celles mesurées à Saint-Nazaire (3 hPa en moyenne), et la dispersion de ces dernières semblent plus fortes :

	Moyenne (hPa)	Ecart-type (hPa)
Données issues du EMSLP (Pixel St-Nazaire, 1863-1894)	1016.506	7.0705
Pressions mesurées à Saint-Nazaire (1863-1894)	1013.5484	8.9778

- Il est également notable que les basses pressions mesurées à Saint-Nazaire ont tendance à être plus basses que celles issues du EMSLP (Figure A. 5).

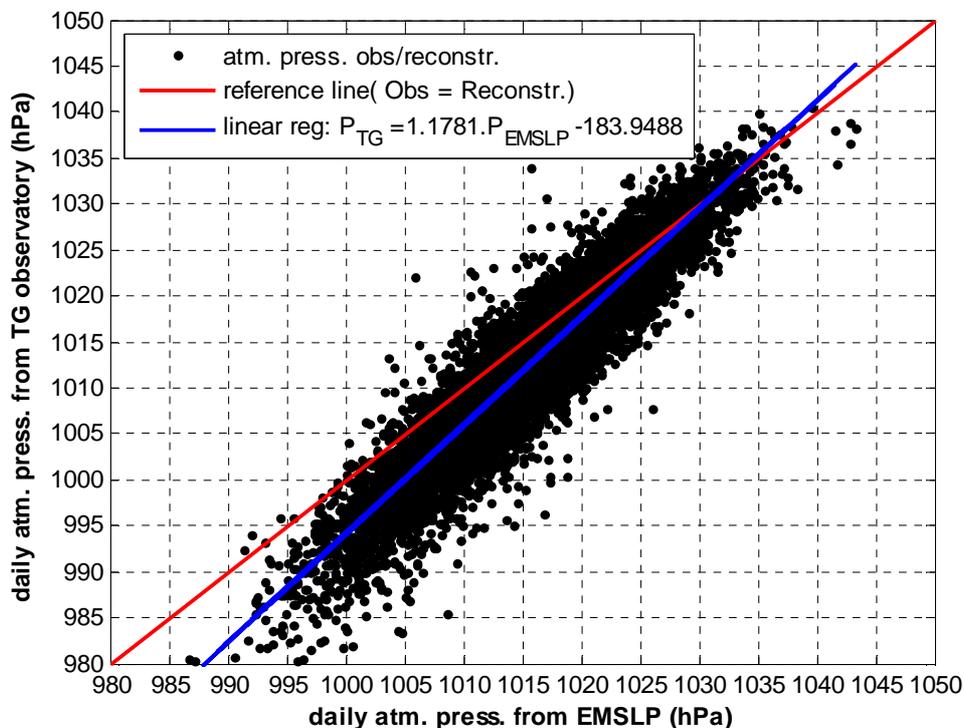


Figure A. 5 : données quotidiennes EMSLP extraites du "Pixel St-Nazaire" (axe x) vs Mesures de MSLP faites à Saint-Nazaire (axe y).

Ansell et al. (2006) avaient déjà noté cette tendance à la surestimation des basses pressions par le jeu de données EMSLP. Ils remarquaient également que cette tendance s'accompagnait d'une sous-estimation des hautes pressions, mais ceci n'est pas clairement visible sur la Figure A. 5. Selon les auteurs, ces tendances seraient, autre autres, une conséquence des procédures de lissage et de remplissage qui ont dues être appliquées afin de constituer une grille spatiale de MSLP. Il est également possible que le fait que les mesures à Saint-Nazaire

soient diurnes ait une influence sur les moyennes journalières, particulièrement lorsqu'une dépression est présente. Les moyennes journalières n'ont été calculées qu'en prenant les 6 mesures tri-horaires de pressions (6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h). Si les mesures avaient été poursuivies lors de la nuit, 2 autres valeurs auraient été ajoutées (24h, 3h). Or, lorsqu'un épisode dépressionnaire se met en place, il peut ne durer que quelques heures, et donc n'impacter fortement que quelques mesures. Ainsi, si une moyenne est réalisée sur des mesures diurnes (pendant lesquelles une dépression est mesurée), la valeur moyenne pourrait être sous-estimée dans le cas où les pressions nocturnes tendent à remonter. Sous des conditions anticycloniques, les changements de pressions atmosphériques sont moins amples et moins rapides : le fait que les mesures ne soient que diurnes est donc moins impactant.

Les résultats de cette comparaison semblent indiquer la très bonne qualité des données de pressions atmosphériques mesurées à Saint-Nazaire pendant l'ère marégraphique. La très bonne corrélation entre ces données et celles issues du EMSLP pourrait permettre l'utilisation de ces dernières pour les périodes pendant lesquelles aucune mesure n'a été réalisée à Saint-Nazaire, ou que ces dernières sont toujours au format papier. Néanmoins, pour utiliser les données reconstruites du EMSLP pour combler les lacunes de mesures, il faudrait au préalable les corriger par la fonction de transfert déduite de la comparaison entre ces deux données pour ne pas trop surestimer les basses-pressions.

De plus, les données de pressions issues des registres de marées permettent d'accéder à un suivi plus haute fréquence de l'évolution des conditions atmosphériques, et permet ainsi une meilleure définition/caractérisation des épisodes dépressionnaires. Les moyennes journalières lissent les événements et, si une dépression se met en place et « disparaît » rapidement, il est possible de la manquer. Ainsi, dès lors qu'il est possible de le faire, il est préférable de numériser ces données.

Adresse postale

13 rue du Chatellier - CS 92803
29228 BREST CEDEX 2 - FRANCE

Internet

www.shom.fr
www.refmar.shom.fr

Renseignements

+33 (0) 2 56 31 23 12