



*La Nouvelle-Aquitaine et L'Europe  
agissent ensemble pour votre territoire*

## PROJET EZPONDA

# Etude des paramètres mécaniques et chimiques à l'origine de l'altération des falaises rocheuses de la côte basque et des ouvrages de défense

### Axe 2

Caractériser et quantifier les paramètres continentaux, littoraux et marins à l'origine de l'érosion des falaises rocheuses de la côte basque et de l'endommagement des ouvrages de défense

### Niveaux d'eau anciens

## Partenaire : Shom

Référence : Accord de consortium n° Shom 32-2019



L'océan en référence

**Rédaction** : Inge van den Beld  
**Supervision** : Alexa Latapy et Nicolas Pouvreau  
**Suivi du partenariat** : Christophe Vrignaud



La Nouvelle-Aquitaine et L'Europe  
agissent ensemble pour votre territoire

## Contenu

|  |    |
|--|----|
| <b>1. PREAMBULE</b> .....  | 3  |
| 1.1. Projet EZPONDA (FEDER).....   | 3  |
| 1.2. La reconstruction de la série marégraphique historique par le Shom..... | 3  |
| <b>2. LA MESURE MAREGRAPHIQUE A SOCOA (ST-JEAN-DE-LUZ)</b> .....             | 4  |
| 2.1. Historique des mesures de hauteurs d'eau et du marégraphe .....         | 4  |
| 2.2. Types de documents marégraphiques traités .....                         | 9  |
| 2.3. Synthèse des données marégraphiques à Socoa (St-Jean-de-Luz) .....      | 10 |
| <b>3. NUMERISATION ET DIGITALISATION DES DOCUMENTS MAREGRAPHIQUES</b> .....  | 11 |
| 3.1. Dématérialisation des documents .....                                   | 11 |
| 3.2. Digitalisation des données marégraphiques .....                         | 12 |
| 3.2.1. <i>Traitement des registres de marée</i> .....                        | 12 |
| 3.2.2. <i>Traitement des marégrammes</i> .....                               | 13 |
| 3.3. Série temporelle brute de hauteurs d'eau .....                          | 17 |
| 3.4. Anomalies observées .....   | 17 |
| <b>4. CONTROLE ET VALIDATION DE LA SERIE DE DONNEES</b> .....                | 19 |
| 4.1. Cohérence en hauteur .....  | 19 |
| 4.2. Corrections temporelles appliquées.....                                 | 21 |
| 4.3. Nettoyage/correction des données .....                                  | 22 |
| 4.4. Conseil d'utilisation de la série validée .....                         | 26 |
| <b>5. CONCLUSION</b> .....   | 26 |
| <b>6. REFERENCES</b> .....   | 27 |



La Nouvelle-Aquitaine et L'Europe  
agissent ensemble pour votre territoire

## 1. PREAMBULE

### 1.1. Projet EZPONDA (FEDER)

La numérisation des données marégraphiques historiques de Socoa (Saint-Jean-de-Luz) a été réalisée dans le cadre du **projet EZPONDA**. Ce projet de recherche est financé par le Fond Européen de Développement Régional (FEDER) et piloté par la Communauté d'Agglomération Pays Basque avec le soutien du GIS Littoral Basque. Sept partenaires participent au projet, dont le Shom, pour cette partie. EZPONDA s'intéresse aux paramètres mécaniques et chimiques qui altèrent, ou ont altéré, les falaises rocheuses et les ouvrages de défense de la côte basque. De plus, l'objectif de ce projet est de « *disposer de nouveaux outils scientifiques mesurant finement les processus d'altération des falaises rocheuses, le recul du trait de côte sur des zones à enjeux spécifiques et les impacts des niveaux extrêmes sur la résistance des ouvrages de défense côtière (digues, enrochements, perrés, ...) afin d'améliorer les actions à la gestion du recul de trait de côte et à l'entretien des ouvrages de défense contre la mer* » (Communauté d'Agglomération du Pays Basque, 2019).

### 1.2. La reconstruction de la série marégraphique historique par le Shom

L'action menée par le Shom porte sur la caractérisation de l'évolution des niveaux d'eau à la côte depuis le 19<sup>ème</sup> siècle et se fait à travers la reconstruction de la série marégraphique historique du marégraphe de Socoa afin d'obtenir une série temporelle de hauteurs d'eau historique fiable. Cette série va permettre d'étudier l'érosion des zones littorales de Pays Basque, d'identifier les événements extrêmes et également d'examiner l'évolution du niveau marin.

La reconstruction d'une série marégraphique historique se décompose en quatre étapes :

1. la recherche des documents en lien avec des mesures de hauteurs d'eau ;
2. la numérisation de ces dernières ;
3. la digitalisation des données de hauteurs d'eau ;
4. la validation des données nouvellement digitalisées.

Ce travail dans le projet EZPONDA, est réalisé par Inge van den Beld, supervisée par Yann Ferret, puis par Alexa Latapy, responsables de l'activité « reconstruction marégraphique historique » ainsi que par Nicolas Pouvreau (expert niveau de la mer).

### Terminologie utilisée dans ce rapport :

- **Numériser (scanner)** : produire une image numérique à partir d'un document papier.
- **Digitaliser (vectoriser)** : produire une série temporelle de données de hauteurs d'eau (tableau numérique, fichier texte) à partir d'une image numérique (scans de registres, des courbes de marée, ...).



La Nouvelle-Aquitaine et L'Europe  
agissent ensemble pour votre territoire

- **Marégramme** : représentation graphique de courbes de hauteurs d'eau en fonction du temps sur une feuille de papier. Il y a plusieurs courbes sur une feuille qui correspondent à plusieurs jours et sont obtenus par un marégraphe à flotteur.
- **Marégraphique (marégraphie)** : tout ce qui est en lien à la mesure de hauteurs d'eau et aux informations contextuelles sur les observations et la manière dont les mesure ont été réalisée.

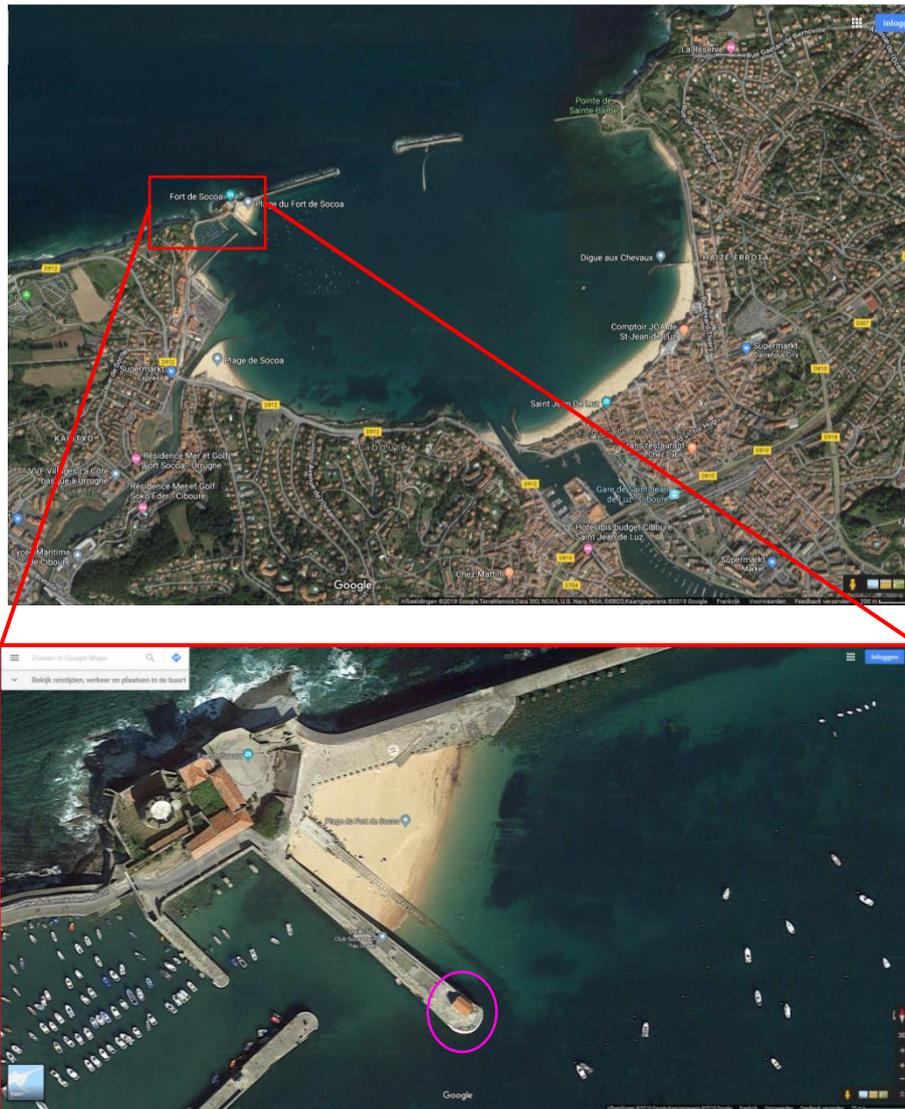
### Chiffres clés des données numériques fournies :

- Les tableaux des valeurs des hauteurs d'eau numérisés :
  - Les registres de marée (hauteurs d'eau toutes les heures ou tous les ¼ d'heure) de 1875 à 1920 numérisés représentent environ 1000 fichiers PDF, soit **2,4 Go (Gigaoctet)**.
  - Les journaux des marées indiquant les hauteurs et les heures de basses mers (BM) et pleines mers (PM) ainsi que les mesures météorologiques pour les années de 1875-1920 : **3 320 pages en total** équivalent à **42 Go**.
- Les 2477 marégrammes numérisés des Archives Départementales de Pyrénées-Atlantiques : représentent environ **230 Go d'images** (scans de marégrammes et photos des feuilles de contrôle).
- Les documents contextuels qui renseignent sur l'observatoire marégraphique, les mesures de hauteurs d'eau ou d'autres sujets liés aux mesures des hauteurs d'eau ont également été consultés (182 documents).

## 2. LA MESURE MAREGRAPHIQUE A SOCOA (ST-JEAN-DE-LUZ)

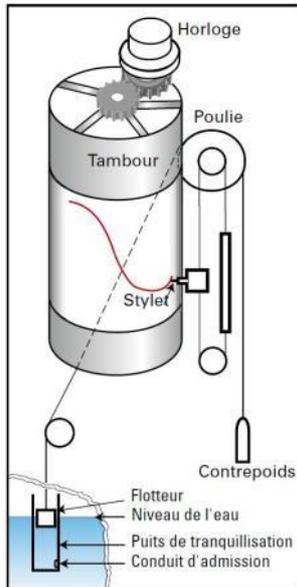
### 2.1. Historique des mesures de hauteurs d'eau et du marégraphe

L'installation d'un observatoire permanent du niveau de la mer débute à la deuxième partie du 19<sup>e</sup> siècle. En 1873, les plans du bâtiment et du puits sont dressés par le Service de Ponts et Chaussées (source : SHD Vincennes – DD2-2053) puis les travaux débutent à l'extrémité de la **digue de Socoa à Saint-Jean-de-Luz** (Figure 1). Un marégraphe mécanique à flotteur de type Brillié (au 1/10), installé à La Rochelle depuis 1861, est transféré et installé à Socoa en 1875 (Source : SHD Vincennes – DD2-281- fol 74, DD2-281 - fol 116, DD2-2053.). C'est l'emplacement qui donnera par la suite la désignation de « *Socoa (Saint-Jean-de-Luz)* » à cet observatoire marégraphique.



**Figure 1 : haut : l'emplacement du marégraphe dans la baie de Saint-Jean-de-Luz au Pays Basque indiqué par le carré rouge ; bas : zoom sur l'observatoire montrant le marégraphe à l'extrémité de la digue de Socoa (cercle rose). Source d'image : Google Maps.**

Le flotteur du marégraphe oscille sur la surface de l'eau dans un puits de tranquillisation de 80 cm de diamètre. Ce puits communique avec la mer via des trous de sonde, percés dans un rocher fendillé (source : SHD Vincennes – DD2-2053). Le flotteur est également connecté à un enregistreur par l'intermédiaire d'un jeu de fils, poulies et contrepoids. Les fluctuations du niveau de la mer sont retranscrites par un stylet sur une feuille, ou marégramme, enroulée sur un tambour dont la rotation est réglée par une horloge (1 tour du tambour = 24 heures). Une représentation schématique d'un marégraphe à flotteur est visible en Figure 2.



**Figure 2 : représentation schématique d'un marégraphe à flotteur (dessin). Un flotteur se trouve sur la surface de la mer dans un puits (formant un abri contre la houle et les vagues) qui communique avec la mer (la hauteur d'eau à l'intérieur du puits est la même qu'à l'extérieur). Le flotteur oscille en fonction de la marée et les variations de hauteur d'eau sont retranscrites par un système de poulies et un crayon sur un papier qui se tourne autour du tambour en fonction du temps.**

Source :

<http://refmar.shom.fr/fr/documentation/instrumentation/maregraphe-a-flotteur>

Le marégraphe mécanique était alors installé dans le bâtiment construit à l'occasion à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et qui existe encore. Aujourd'hui, ce bâtiment n'abrite plus les équipements modernes de mesures du niveau de la mer, les appareils étant installés directement au-dessus du puits de tranquillisation historique (Figure 3).



**Figure 3 : Photos de l'observatoire marégraphique placé au bout de la digue de Socoa (Saint-Jean-de-Luz) au Pays Basque. A) vu sur le fort de Socoa (à gauche) et la digue (au fond de l'image). Le local du marégraphe est indiqué par le cercle rouge. B) Le local du marégraphe et le puits (à droite du bâtiment) ; et C) vu sur le puits (protégé par une construction en bois ainsi qu'un local en verre et métal). Une partie du bâtiment est visible à gauche. Le marégraphe à flotteur était localisé dans ce local, tandis que le flotteur se trouvait dans le puits de tranquillisation. Source photos : I. van den Beld et N. Pouvreau, Shom.**

Suite à l'installation de l'observatoire marégraphique, un dysfonctionnement du puits de tranquillisation est identifié à proximité des basses mers durant plusieurs années (source : SHD Vincennes – DD2-2053). De grands travaux sont réalisés entre le 25 juillet 1883 et le 26 mai 1884 (notes de registres de marée, Archives de Shom). Ce dysfonctionnement des mesures à basse mer

résulte du dépôt de sables et de graviers causant une obstruction de canal de communication du puits avec la mer. L'obstruction était telle que le marégraphe ne donnait plus de hauteurs de basse mer correctes, surtout lors des marées de vive-eau. Avec l'accord du Ministère de la Marine et des Colonies, un aqueduc (comparable à un canal ou un tuyau) est construit (Figure 4) pour remplacer le système mise en place initialement et ainsi faciliter la communication avec la mer en limitant les obstructions (source : SHD Vincennes – DD2-2053).

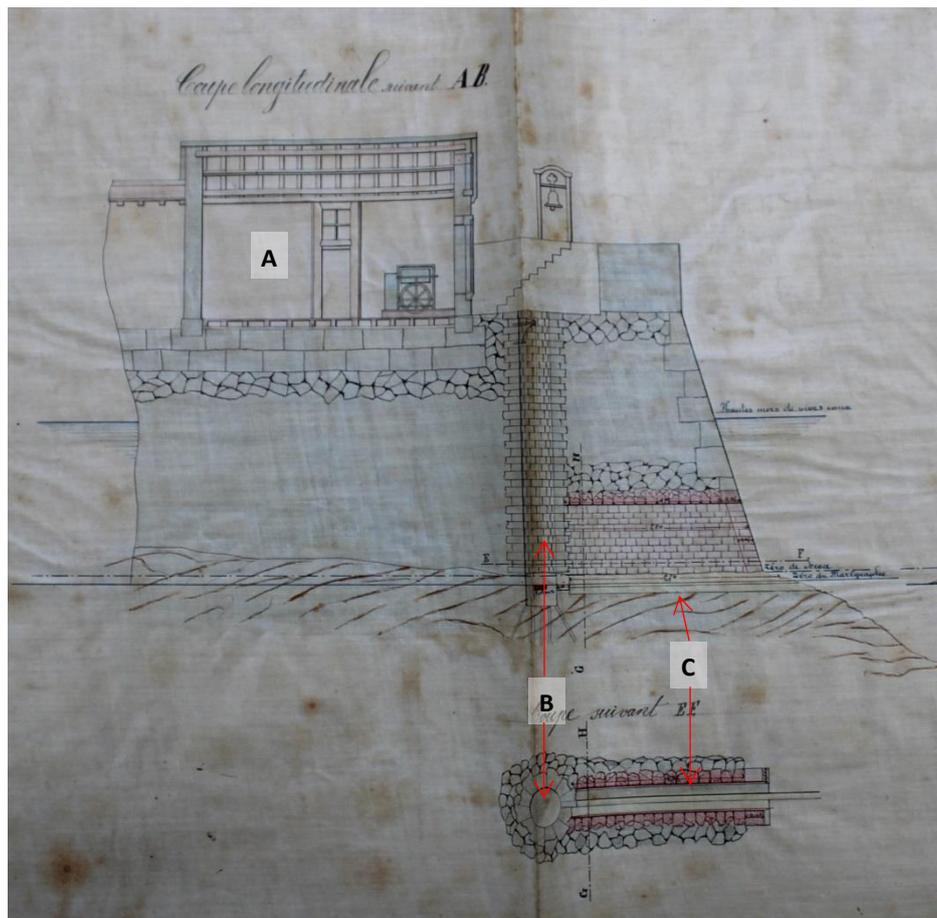


Figure 4 : Plan exécuté pour le projet de construction d'un aqueduc pour faciliter la communication du puits avec la mer sans avoir d'obstructions par les dépôts de sable et de gravier. Ce dessin montre une coupe longitudinale le long de la digue et montre une coupe du local (A), du puits (B) et de l'aqueduc proposé (C) ainsi qu'une vue de dessus du puits (B) et de l'aqueduc (C). Source : AD64 - 4S 33 (Pau) (plan également retrouvé au SHD Vincennes – DD2-2053).

Le marégraphe historique est installé et opéré entre 1875 et 1920 par le Service Hydrographique de la Marine (SHM), précurseur du Shom. En 1920, il est décidé de supprimer le réseau de marégraphes géré par le SHM. Des accords de transfert des observatoires sont alors recherchés comme à Saint-Nazaire par exemple avec le transfert aux Ponts et Chaussées (Ferret, 2016 ; Pouvreau, 2008). Aucune trace d'un tel transfert et aucun enregistrement n'ont été retrouvés durant cette période pour l'observatoire de Socoa. En 1950, le Service Maritime des Ponts et Chaussées reprend les mesures de hauteur d'eau sur l'observatoire historique.

Les mesures de hauteurs d'eau à l'aide d'un marégraphe à flotteur perdurent jusqu'en début de 21<sup>e</sup> siècle, où le site intègre le réseau d'observation du niveau de la mer RONIM opéré par le Shom. Le marégraphe mécanique est remplacé par un marégraphe côtier numérique (MCN) radar en 2004. L'appareil émet un signal et l'onde réfléchi est captée en retour. Le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal permet de connaître la hauteur de la colonne d'eau. À partir de cette distance, la hauteur de la mer est calculée. Les mesures de hauteurs d'eau sont consultables à l'adresse suivante : [https://data.shom.fr/donnees/refmar/SAINT-JEAN-DE-LUZ\\_SOCCA](https://data.shom.fr/donnees/refmar/SAINT-JEAN-DE-LUZ_SOCCA).

## 2.2. Types de documents marégraphiques traités

La reconstruction d'une série historique marégraphique commence avec la recherche et l'inventaire des documents existants relatifs à l'observation du niveau de la mer. Pour la reconstruction de Socoa, les informations trouvées concernaient la mesure des hauteurs d'eau à Socoa mais également des informations sur l'observatoire lui-même. La difficulté de cet exercice réside dans le fait que ces informations ne sont pas concentrées en un lieu unique, et par conséquent la recherche dans de nombreux centres d'archivage a dû être réalisée. Les organismes consultés sont les suivants : les archives du Shom à Brest, les Archives Départementales de Pyrénées-Atlantiques (AD64) à Bayonne et à Pau, les Archives du Service Historique de la Défense (SHD) à Vincennes, à Brest et à Rochefort ainsi que les Archives Nationales (AN) à Paris.

Les documents relatifs aux mesures de hauteurs d'eau se présentent sous différentes formes (Figure 5) :

- Les **registres de marée** (Figure 5A) correspondent à des observations de hauteurs d'eau relevées par l'observateur, soit sur une échelle de marée, soit à partir de marégrammes. Pour Socoa, des registres de marée ont été retrouvés entre la fin du 19<sup>ème</sup> et le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Ces registres correspondent à une retranscription des marégrammes tous les ¼ d'heure (pour la période 1875-1897) ou toutes les heures (1898-1920). Ces documents se trouvent dans les archives du Shom.
- Les **marégrammes** (Figure 5B et C) représentent les mesures de hauteur d'eau faites directement sur la feuille du marégraphe. Sur les marégrammes de Socoa, plusieurs courbes sont représentées (1 courbe = 1 jour), en général 8 jours, mais il peut arriver que le marégramme enregistre plusieurs semaines de mesures. L'échelle du quadrillage imprimé sur la feuille du marégramme est connue et permet de connaître la hauteur d'eau à un instant donné. Ces enregistrements sont disponibles pour deux périodes : 1) pendant la 2<sup>e</sup> Guerre Mondiale de novembre 1942 à mai 1944 (Archives du Shom), et 2) de décembre 1950 à mai 2001 (AD64).
- Les documents contextuelles ou métadonnées (Figure 5D) sous forme des lettres de communications, de rapports, de campagnes hydrographiques, etc. ont été trouvés dans les archives mentionnés au début de ce chapitre. Ces documents sont souvent d'une grande aide pour confirmer les anomalies observées dans la série reconstruite et permet parfois d'identifier quelles corrections sont nécessaires pour obtenir une série de hauteurs d'eau correcte.

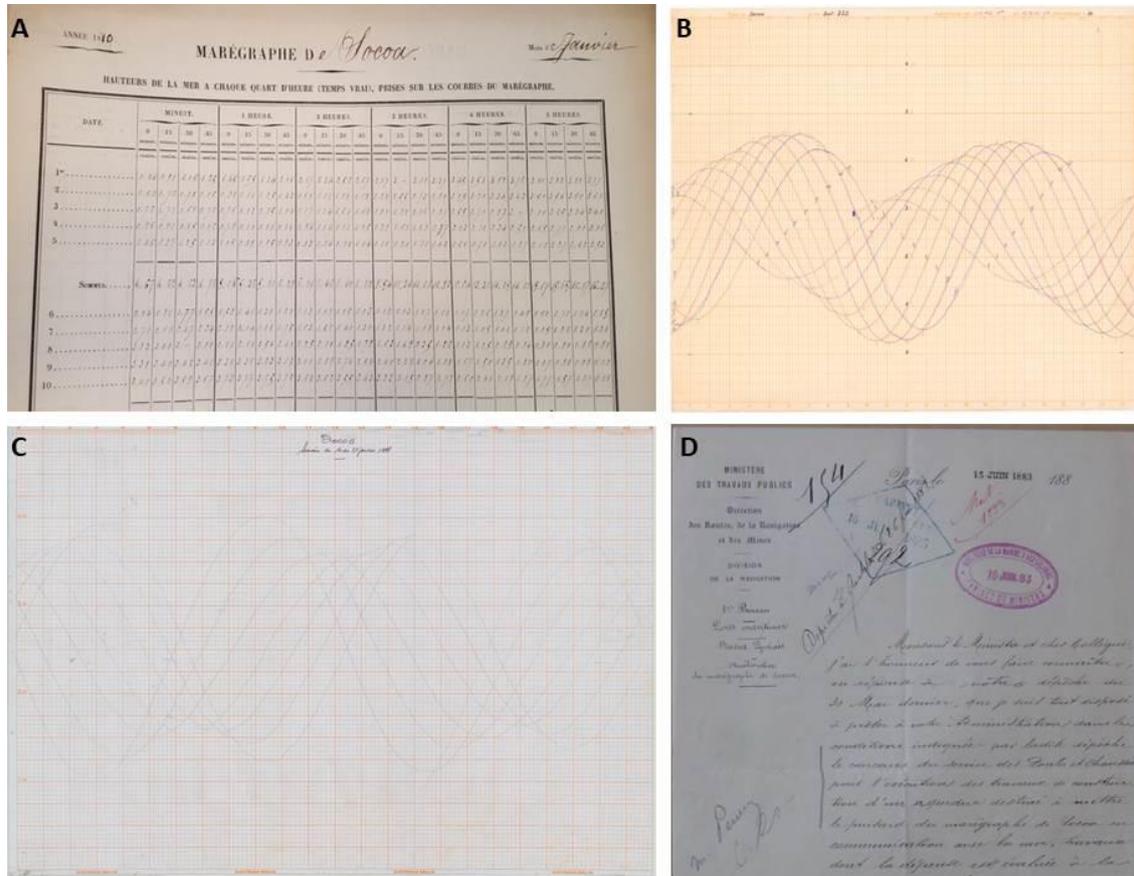


Figure 5 : Exemples des différents documents utilisés pendant le travail de reconstruction des hauteurs d'eau de Socoa. Il existe plusieurs types de documents : A) un registre de marée datant de l'année 1880 (source : Archives Shom), B) un marégramme enregistré pendant la 2e Guerre Mondiale du 2 au 12 décembre 1942 (source : Archives Shom), C) un marégramme de 14 au 21 janvier 1919 (source : AD64 – 2003W-47 ; Bayonne), et D) une lettre de correspondance datée du 15 juin 1883 qui fait partie des documents contextuelles (Source : SHD Vincennes – DD2-2053).

### 2.3. Synthèse des données marégraphiques à Socoa (St-Jean-de-Luz)

En général, deux types de documents (registre et marégramme) comportant des mesures de hauteur d'eau ont été trouvés dans les différentes archives et sont synthétisés en Tableau 1. Tableau 1: Synthèse des documents identifiés dans la cadre de la reconstruction de Socoa (TSV : Temps Solaire Vrai ; TSM : Temps Solaire Moyen ; UTC : Temps Universel Coordonné ; Heure légale : UTC+1 pour les années antérieure à 1976 et UTC+1/UTC+2 pour l'heure d'hiver et l'heure d'été postérieure de l'année 1976)

Tableau 1: Synthèse des documents identifiés dans la cadre de la reconstruction de Socoa (TSV : Temps Solaire Vrai ; TSM : Temps Solaire Moyen ; UTC : Temps Universel Coordonné ; Heure légale : UTC+1 pour les années antérieure à 1976 et UTC+1/UTC+2 pour l'heure d'hiver et l'heure d'été postérieure de l'année 1976)

| Période   | Durée effective | Nombre de documents | Système de temps | Période d'archivage | Type d'archivage | Lieu d'archivage |
|-----------|-----------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1875-1893 | 18 ans          | 217                 | TSV              | 15 min              | Registre         | Shom (Brest)     |
| 1894-1897 | 4 ans           | 48                  | TSM              | 15 min              | Registre         | Shom (Brest)     |
| 1898-1920 | 23 ans          | 276                 | TSM              | 60 min              | Registre         | Shom (Brest)     |

|           |         |      |              |         |            |                   |
|-----------|---------|------|--------------|---------|------------|-------------------|
| 1942-1944 | 1,5 ans | 44   | Heure légale | Continu | Marégramme | Shom (Brest)      |
| 1950-2001 | 50 ans  | 2477 | Heure légale | Continu | Marégramme | AD64<br>(Bayonne) |

La totalité de ces documents couvre, au total, **environ 97 ans** de mesures de hauteurs d'eau, divisé sur trois périodes temporelles : 1) fin du 19<sup>e</sup> au début du 20<sup>e</sup> siècle (nov. 1875 – déc. 1920 ≈ 45 ans) ; 2) durant la 2<sup>e</sup> Guerre Mondiale de mai 1942 à mai 1944 (≈ 1,5 ans), et 3) de décembre 1950 à mai 2001 ≈ 50 ans). Il s'agit en total de **3062** documents, dont 541 registres et 2521 marégrammes.

### 3. NUMERISATION ET DIGITALISATION DES DOCUMENTS MAREGRAPHIQUES

Une fois la recherche et l'inventaire des documents marégraphiques terminés, les étapes suivantes de la reconstruction des données marégraphiques consistent à numériser (scanner) les documents, puis à digitaliser les hauteurs d'eau.

#### 3.1. Dématérialisation des documents

Sur les **3062 documents** (registres et marégrammes), seulement 44 marégrammes conservés dans les archives de Shom étaient déjà numérisés, le reste des documents ont été scannés dans le cadre de ce projet.

Ainsi, les **2477 marégrammes** conservés dans les Archives Départementales des Pyrénées-Atlantiques ont été numérisés (scannés) afin d'obtenir une image numérique. Pour cela, les marégrammes (au format de 73 x 52 cm) ont été scannés un par un à l'aide d'un scanner à rouleau, en veillant à amoindrir au maximum les effets d'un stockage qui n'a pas toujours été idéal (trace de pliure, bordures abîmées, trous, ...etc.). Les fichiers numériques issus de ce processus de numérisation sont en format « TIF », avec une résolution de 200 dpi et une taille entre 70 et 80 Mo par fichier. Ces caractéristiques permettent à la fois de pérenniser ces documents historiques et de faciliter la digitalisation ultérieure de ces documents par des logiciels experts.

Les feuilles de contrôle, au format A4 et attachées au dos des marégrammes, ont été photographiées pour éviter que les marégrammes ne soient scannés deux fois et pour accélérer le travail de numérisation. Ces feuilles de contrôles font parties des métadonnées ou documents contextuelles et sont importantes pour le contrôle et la validation de la série de données marégraphiques (chapitre 4).

Les autres documents constituant les métadonnées (par ex. des correspondances avec le Ministère, des rapports de l'ingénieur, des demandes de subvention pour les travaux, etc.) sont consultés.

Le processus de numérisation des **541 registres de marées**, avec un format de 32 x 49 cm, a également été réalisé dans le cadre de ce projet. En utilisant le même scanner que les marégrammes, les images numériques sont stockées en format « PDF » avec une taille d'environ 1 à 1,2 Mo, soit un total de 2,23 Go de données de registres.

Au final, l'ensemble des documents numérisés correspond à plus de 400 Go d'images numériques.

### 3.2. Digitalisation des données marégraphiques

Après avoir dématérialisé les documents marégraphiques, il faut extraire les données pour récupérer le signal de marée mesuré. Ce processus de digitalisation varie en fonction du type de document considéré : la digitalisation des registres est ainsi différente de celle des marégrammes.

#### 3.2.1. Traitement des registres de marée

La technologie de reconnaissance automatique de caractères ne pouvait pas être utilisée pour ce genre de documents car les registres de marées sont des manuscrits avec une écriture permettant une lecture plus ou moins aisée suivant les observateurs. Il a donc fallu saisir manuellement les valeurs de hauteurs d'eau dans un tableur informatique (Figure 6).

Pour identifier plus facilement les erreurs ayant pu être faites par l'observateur, mais également les erreurs de saisie, deux méthodes de contrôle ont été appliquées en temps réel sur les données saisies :

1. En mettant en forme les cellules du tableur numérique, en leur assignant une couleur dépendante de la valeur de hauteur d'eau saisie, il est plus facile d'identifier visuellement des hauteurs « anormales » entre des valeurs voisines. Les nuances de couleurs permettent également d'identifier facilement les pleines et basses mers ainsi que les périodes de vives eaux et mortes eaux (Figure 6A).
2. En représentant graphiquement les hauteurs d'eau, les pics ou valeurs aberrantes sont facilement identifiables (Figure 6B).

| A  | Année | Mois | Jour | Jour 2 | 00.00 | 01.00 | 02.00 | 03.00 | 04.00 | 05.00 | 06.00 | 07.00 | 08.00 | 09.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 | 19.00 | 20.00 | 21.00 | 22.00 | 23.00 |
|----|-------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 67 | 1908  | 2    | 24   | 55     | 120   | 94    | 101   | 136   | 190   | 253   | 300   | 327   | 332   | 308   | 263   | 262   | 148   | 108   | 106   | 124   | 172   | 225   | 272   | 309   | 322   | 316   | 282   | 231   |
| 68 | 1908  | 2    | 25   | 56     | 182   | 136   | 110   | 118   | 155   | 199   | 250   | 290   | 316   | 317   | 300   | 260   | 209   | 160   | 130   | 122   | 137   | 172   | 216   | 261   | 296   | 316   | 317   | 291   |
| 58 | 1908  | 2    | 26   | 57     | 254   | 197   | 152   | 136   | 132   | 155   | 192   | 238   | 272   | 299   | 307   | 294   | 261   | 219   | 172   | 137   | 125   | 131   | 160   | 198   | 243   | 283   | 308   | 312   |
| 59 | 1908  | 2    | 27   | 58     | 296   | 252   | 201   | 157   | 129   | 123   | 137   | 168   | 213   | 258   | 291   | 311   | 312   | 290   | 246   | 195   | 154   | 127   | 124   | 145   | 186   | 240   | 287   | 322   |
| 60 | 1908  | 2    | 28   | 59     | 340   | 323   | 282   | 223   | 167   | 123   | 105   | 114   | 144   | 197   | 253   | 303   | 337   | 343   | 322   | 274   | 211   | 154   | 122   | 114   | 135   | 184   | 251   | 315   |
| 61 | 1908  | 2    | 29   | 60     | 388   | 385   | 372   | 326   | 254   | 178   | 119   | 93    | 98    | 138   | 204   | 279   | 341   | 377   | 389   | 357   | 295   | 217   | 144   | 97    | 89    | 120   | 184   | 266   |
| 62 | 1908  | 3    | 1    | 61     | 343   | 405   | 424   | 483   | 544   | 553   | 461   | 30    | 73    | 123   | 202   | 292   | 386   | 416   | 415   | 373   | 296   | 200   | 117   | 68    | 64    | 108   | 190   |       |
| 63 | 1908  | 3    | 2    | 62     | 290   | 378   | 426   | 464   | 425   | 345   | 243   | 135   | 53    | 77    | 123   | 225   | 324   | 388   | 435   | 426   | 369   | 275   | 166   | 88    | 34    | 45    | 197   |       |
| 64 | 1908  | 3    | 3    | 63     | 263   | 317   | 412   | 453   | 453   | 413   | 320   | 200   | 88    | 16    | 2     | 40    | 129   | 237   | 337   | 407   | 433   | 410   | 336   | 224   | 119   | 38    | 5     | 31    |
| 65 | 1908  | 3    | 4    | 64     | 106   | 219   | 333   | 414   | 451   | 434   | 390   | 284   | 160   | 54    | 8     | 54    | 152   | 262   | 356   | 418   | 425   | 385   | 303   | 190   | 87    | 16    | 0     |       |
| 66 | 1908  | 3    | 5    | 65     | 40    | 135   | 245   | 350   | 427   | 453   | 429   | 357   | 249   | 132   | 43    | 3     | 16    | 85    | 186   | 290   | 368   | 410   | 404   | 355   | 264   | 162   | 88    | 19    |
| 67 | 1908  | 3    | 6    | 66     | 18    | 76    | 168   | 271   | 365   | 422   | 433   | 480   | 526   | 524   | 421   | 51    | 30    | 67    | 137   | 230   | 318   | 389   | 396   | 381   | 325   | 242   | 145   | 72    |
| 68 | 1908  | 3    | 7    | 67     | 40    | 51    | 112   | 200   | 290   | 359   | 395   | 392   | 354   | 284   | 192   | 114   | 63    | 60    | 100   | 170   | 250   | 318   | 359   | 365   | 340   | 290   | 214   | 144   |
| 69 | 1908  | 3    | 8    | 68     | 92    | 73    | 97    | 152   | 225   | 295   | 343   | 365   | 353   | 315   | 255   | 181   | 123   | 96    | 100   | 144   | 201   | 264   | 311   | 336   | 332   | 309   | 262   | 206   |
| 70 | 1908  | 3    | 9    | 69     | 153   | 112   | 105   | 130   | 177   | 234   | 284   | 320   | 330   | 319   | 289   | 241   | 187   | 147   | 131   | 144   | 175   | 218   | 265   | 297   | 312   | 311   | 294   | 260   |
| 71 | 1908  | 3    | 10   | 70     | 219   | 174   | 147   | 142   | 158   | 192   | 234   | 270   | 295   | 305   | 300   | 276   | 242   | 202   | 174   | 160   | 165   | 187   | 221   | 254   | 282   | 296   | 300   | 291   |
| 72 | 1908  | 3    | 11   | 71     | 270   | 229   | 193   | 170   | 159   | 165   | 185   | 214   | 245   | 272   | 288   | 288   | 277   | 250   | 217   | 188   | 169   | 167   | 179   | 202   | 234   | 250   | 282   | 295   |
| 73 | 1908  | 3    | 12   | 72     | 294   | 272   | 240   | 203   | 173   | 154   | 150   | 164   | 193   | 226   | 260   | 284   | 294   | 297   | 262   | 228   | 192   | 166   | 159   | 168   | 190   | 225   | 262   | 291   |
| 74 | 1908  | 3    | 13   | 73     | 313   | 313   | 292   | 257   | 211   | 170   | 141   | 133   | 148   | 182   | 225   | 265   | 294   | 306   | 297   | 266   | 222   | 179   | 145   | 133   | 140   | 170   | 214   | 262   |
| 75 | 1908  | 3    | 14   | 74     | 300   | 322   | 317   | 290   | 245   | 190   | 142   | 111   | 108   | 133   | 179   | 233   | 281   | 314   | 320   | 303   | 260   | 204   | 152   | 115   | 109   | 129   | 174   | 233   |
| 76 | 1908  | 3    | 15   | 75     | 292   | 331   | 345   | 332   | 290   | 227   | 165   | 111   | 88    | 98    | 141   | 202   | 265   | 317   | 345   | 338   | 303   | 244   | 177   | 120   | 91    | 95    | 135   | 195   |
| 77 | 1908  | 3    | 16   | 76     | 268   | 322   | 357   | 387   | 327   | 258   | 191   | 121   | 74    | 64    | 94    | 152   | 226   | 298   | 344   | 355   | 334   | 281   | 202   | 131   | 77    | 66    | 88    | 148   |
| 78 | 1908  | 3    | 17   | 77     | 227   | 303   | 359   | 378   | 361   | 313   | 234   | 151   | 84    | 51    | 62    | 112   | 192   | 275   | 340   | 375   | 370   | 328   | 252   | 168   | 97    | 58    | 54    | 111   |
| 79 | 1908  | 3    | 18   | 78     | 192   | 280   | 353   | 393   | 387   | 359   | 291   | 200   | 114   | 58    | 46    | 80    | 152   | 243   | 324   | 379   | 395   | 369   | 303   | 216   | 128   | 70    | 48    | 77    |
| 80 | 1908  | 3    | 19   | 79     | 146   | 239   | 326   | 388   | 410   | 393   | 336   | 249   | 157   | 80    | 45    | 55    | 113   | 200   | 291   | 364   | 399   | 393   | 345   | 266   | 172   | 92    | 47    | 52    |
| 81 | 1908  | 3    | 20   | 80     | 102   | 188   | 280   | 357   | 402   | 405   | 368   | 293   | 203   | 114   | 56    | 40    | 76    | 151   | 241   | 324   | 379   | 396   | 366   | 304   | 215   | 127   | 61    | 37    |
| 82 | 1908  | 3    | 21   | 81     | 64    | 133   | 219   | 305   | 370   | 395   | 380   | 328   | 247   | 154   | 84    | 45    | 51    | 109   | 186   | 274   | 343   | 389   | 378   | 340   | 265   | 180   | 101   | 54    |
| 83 | 1908  | 3    | 22   | 82     | 55    | 96    | 173   | 257   | 334   | 380   | 389   | 361   | 302   | 221   | 145   | 86    | 70    | 97    | 158   | 239   | 305   | 305   | 384   | 372   | 320   | 247   | 164   | 103   |
| 84 | 1908  | 3    | 23   | 83     | 73    | 87    | 136   | 215   | 285   | 338   | 371   | 366   | 331   | 272   | 197   | 127   | 89    | 84    | 117   | 175   | 246   | 255   | 348   | 358   | 335   | 290   | 220   | 150   |
| 85 | 1908  | 3    | 24   | 84     | 103   | 85    | 102   | 156   | 219   | 279   | 324   | 344   | 340   | 305   | 251   | 187   | 135   | 110   | 113   | 147   | 196   | 191   | 306   | 334   | 335   | 310   | 271   | 213   |
| 86 | 1908  | 3    | 25   | 85     | 156   | 115   | 106   | 122   | 164   | 212   | 261   | 298   | 315   | 309   | 284   | 243   | 190   | 147   | 124   | 124   | 148   | 180   | 240   | 280   | 306   | 312   | 301   | 271   |
| 87 | 1908  | 3    | 26   | 86     | 228   | 170   | 132   | 117   | 129   | 157   | 198   | 242   | 279   | 300   | 308   | 294   | 262   | 217   | 174   | 146   | 138   | 124   | 181   | 222   | 264   | 296   | 312   | 316   |
| 88 | 1908  | 3    | 27   | 87     | 294   | 244   | 190   | 145   | 119   | 115   | 133   | 168   | 212   | 256   | 292   | 309   | 305   | 280   | 235   | 184   | 143   | 127   | 128   | 154   | 195   | 245   | 283   | 325   |
| 89 | 1908  | 3    | 28   | 88     | 336   | 313   | 265   | 205   | 144   | 104   | 88    | 102   | 136   | 191   | 249   | 300   | 327   | 330   | 301   | 247   | 180   | 167   | 98    | 91    | 120   | 170   | 239   | 302   |
| 90 | 1908  | 3    | 29   | 89     | 352   | 360   | 338   | 283   | 206   | 127   | 72    | 50    | 68    | 112   | 184   | 257   | 320   | 352   | 352   | 317   | 250   | 239   | 93    | 60    | 59    | 100   | 170   | 255   |
| 91 | 1908  | 3    | 30   | 90     | 333   | 383   | 393   | 367   | 290   | 195   | 103   | 40    | 19    | 44    | 105   | 192   | 280   | 352   | 384   | 375   | 323   | 244   | 138   | 66    | 27    | 8     | 93    | 183   |
| 92 | 1908  | 3    | 31   | 91     | 278   | 368   | 411   | 416   | 370   | 285   | 170   | 71    | 7     | 25    | 35    | 112   | 218   | 313   | 376   | 480   | 379   | 368   | 210   | 165   | 31    | 300   | 31    | 100   |
| 93 | 1908  | 4    | 1    | 92     | 200   | 313   | 352   | 432   | 434   | 365   | 171   | 50    | 0     | 2     | 55    | 150   | 256   | 344   | 398   | 488   | 367   | 286   | 178   | 75    | 58    | 0     | 41    |       |
| 94 | 1908  | 4    | 2    | 93     | 134   | 245   | 350   | 418   | 441   | 411   | 335   | 225   | 102   | 23    | 8     | 15    | 88    | 190   | 290   | 370   | 432   | 399   | 345   | 252   | 140   | 51    | 0     | 8     |
| 95 | 1908  | 4    | 3    | 94     | 68    | 170   | 280   | 368   | 421   | 425   | 379   | 298   | 184   | 81    | 17    | 6     | 48    | 130   | 233   | 322   | 384   | 400   | 372   | 308   | 210   | 112   | 35    | 10    |
| 96 | 1908  | 4    | 4    | 95     | 32    | 104   | 200   | 300   | 373   | 406   | 391   | 340   | 252   | 154   | 70    | 31    | 36    | 92    | 175   | 265   | 337   | 378   | 376   | 342   | 272   | 180   | 98    | 48    |

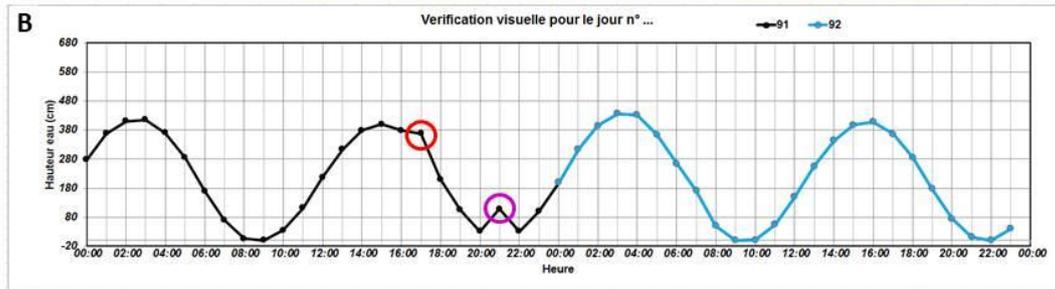


Figure 6 : Contrôles mis en place en temps réel pour détecter les erreurs de saisie ou les erreurs de l'observateur. A) le tableau de digitalisation des hauteurs d'eau de mars 1908 pour chaque heure. Les nuances de couleurs montrent bien les pleines mers (rouge) et basse mers (bleu) ainsi que les vives eaux (rouge/bleu foncé) et les mortes eaux (vert/jaune) ; et B) une représentation schématique de la courbe de 31 mars 1908 (en noir) et le jour suivant (en bleu). Les indications en rouge et violet montrent deux anomalies sur le tableau (carré) et sur le graphique (cercle). Il ne s'agit pas d'erreurs de saisie, mais d'erreurs de l'observateur de l'époque (rouge : erreur du jour, violet : une erreur en mètres). Les erreurs de saisie sont immédiatement corrigées. Les autres erreurs ont été marquées par un remplissage de cellule (rayure diagonale) pour indiquer que cette erreur a été vérifiée dans les documents papiers ; il est, par conséquence, plus facile de voir si une erreur, identifiée à une phase ultérieure de la reconstruction, était déjà vérifiée ou non.

Ces méthodes de contrôle permettent surtout d'identifier les erreurs de saisie et de les corriger immédiatement. Les erreurs de l'observateur ou d'autres anomalies ne sont corrigées que lors de la dernière phase de la reconstruction (voir chapitre 4). Néanmoins, il est recommandé de noter ces erreurs/anomalies afin de gagner du temps lors du contrôle de la série et d'éviter de vérifier une deuxième fois l'anomalie.

### 3.2.2. Traitement des marégrammes

Avec la réinstallation d'un marégraphe en 1950 par le Service Maritime des Pont et Chaussées de Bayonne, les mesures marégraphiques ont repris de façon continue et quasi permanente à Socoa. Une partie des données de hauteurs d'eau existait déjà en format numérique dans la base de données

du Shom (1942-1944 et 1964-1996). Dans le cadre de cette étude, environ 17 années de mesures inédites, car uniquement sous format papier (1950-1963, 1997-1999 et 2001), ont été ajoutées, ce qui correspond à la vectorisation de 777 marégrammes.

Après avoir été scannés, les marégrammes sont vectorisés (digitalisés) afin d'extraire les données de hauteurs d'eau en fonction du temps. Pour cela, le logiciel NUNIEAU<sup>1</sup> (Numérisation des Niveaux d'EAU), développé par le CEREMA et libre d'accès, a été utilisé. Ce programme se base sur un algorithme de reconnaissance de couleurs, ce qui permet de dissocier le signal de marée à extraire du fond de plan dès lors que les couleurs diffèrent.

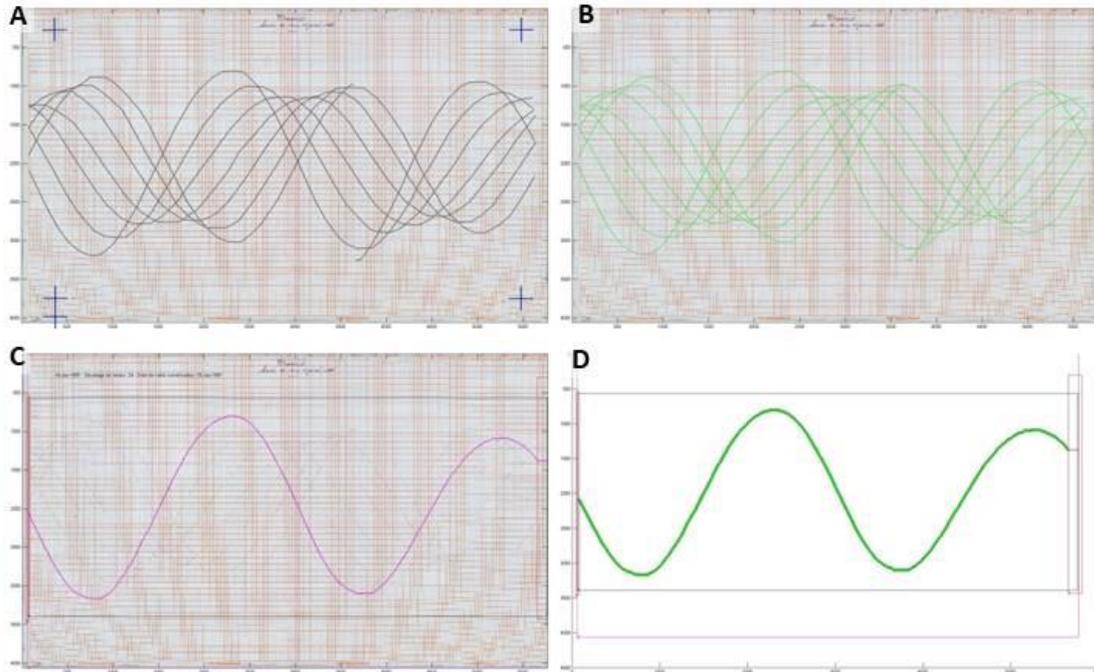
Bien que le logiciel ait initialement été développé pour effectuer un travail quasi-automatique, les caractéristiques des marégrammes de Socoa ont malheureusement rendu cette automatisation impossible. En effet, chaque document se compose de plusieurs jours d'enregistrement entraînant la superposition de courbes multiples (Figure 7). Il est alors délicat, voire impossible, de définir automatiquement des « masques d'analyse » pour distinguer chaque courbe. Pour pallier à ce problème, des masques d'extraction ont été définis manuellement, ce qui consiste à suivre à l'écran les courbes une à une. Une fois ceci fait, le signal présent à l'intérieur de ce masque d'extraction est récupéré et les hauteurs d'eau sont estimées selon le pas de temps définies au préalable (toutes les 5 minutes pour cette étude). La mise en place de ces masques d'extraction, courbe par courbe, jour après jour, est donc long, fastidieux et répétitif, mais il est primordial car aucun autre outil ne permet à l'heure actuelle de faire ce travail de façon plus efficace. La digitalisation des marégrammes avec le logiciel NUNIEAU nécessite plusieurs étapes, synthétisées en Figure 7 :

- le calage du marégramme, à la fois en hauteur et en temps, grâce à la définition de points de calage dont les hauteurs et les heures sont connues (Figure 7A) ;
- la définition de la couleur à extraire d'après ses composantes de Rouge, Vert et Bleu (valeurs RVB) (Figure 7B) ;
- le nettoyage de l'image au cours après avoir définies les zones à garder/exclure, et dessinés les masques d'extraction (Figure 7C).

Ce n'est qu'à l'issue de cette procédure que l'image peut être traitée et le signal marégraphique extrait (Figure 7D).

---

<sup>1</sup> <https://www.cerema.fr/fr/actualites/logiciel-numerisation-enregistrements-graphiques-niveaux-eau>



**Figure 7 : Illustration des étapes à suivre pour digitaliser une courbe de marée avec le logiciel NUNIEAU. A) Calage de l'image (en temps et selon la verticale), B) Définition de la couleur à extraire, C) Création du masque d'extraction, et D) Signal marégraphique extrait. (14 – 21 janvier 1997 ; Source : AD64 – 2003W-47).**

En général, 4 types de marégrammes entre 1950 et 2001 ont été identifiés et la méthode pour extraire les hauteurs d'eau numériques diffère légèrement suivant leur état de conservation (Figure 8) :

1. Les 142 marégrammes de **type 1** (Figure 8A), soit 18,3% des marégrammes à digitaliser, sont dans un **bon état**, les courbes sont bien visibles et NUNIEAU pourrait faire la discrimination des couleurs des mesures et du fond.
2. Les 50 marégrammes de **type 2** (Figure 8B), soit 6,4% des marégrammes à digitaliser, sont **un peu noircis** à cause des traces de moisissure, mais NUNIEAU est encore capable de discriminer des couleurs de mesures et du fond pour la plupart des courbes.
3. Les 32 marégrammes de **type 3** (Figure 8C), soit 4,1% des marégrammes à digitaliser, sont très impactés par la moisissure et **très noircis**. Les courbes ne sont pas complètement visibles, ce qui peut causer une perte de données. De plus, il n'est plus possible de discriminer les courbes du fond et le suivi des courbes est entièrement réalisé manuellement.
4. La plupart de marégrammes, 553 en total, sont de **type 4** (Figure 8D), soit 71,2% des marégrammes à digitaliser, et sont dans un état considérablement détérioré. Le signal d'enregistrement des hauteurs d'eau s'est **effacé partiellement ou complètement** au cours du temps (ou lors de la mesure, le stylet pouvait ne pas avoir beaucoup d'encre). Souvent les pleines mers et basses mers, et parfois toutes les courbes, sont retracées par l'observateur avec un crayon ou un stylo.

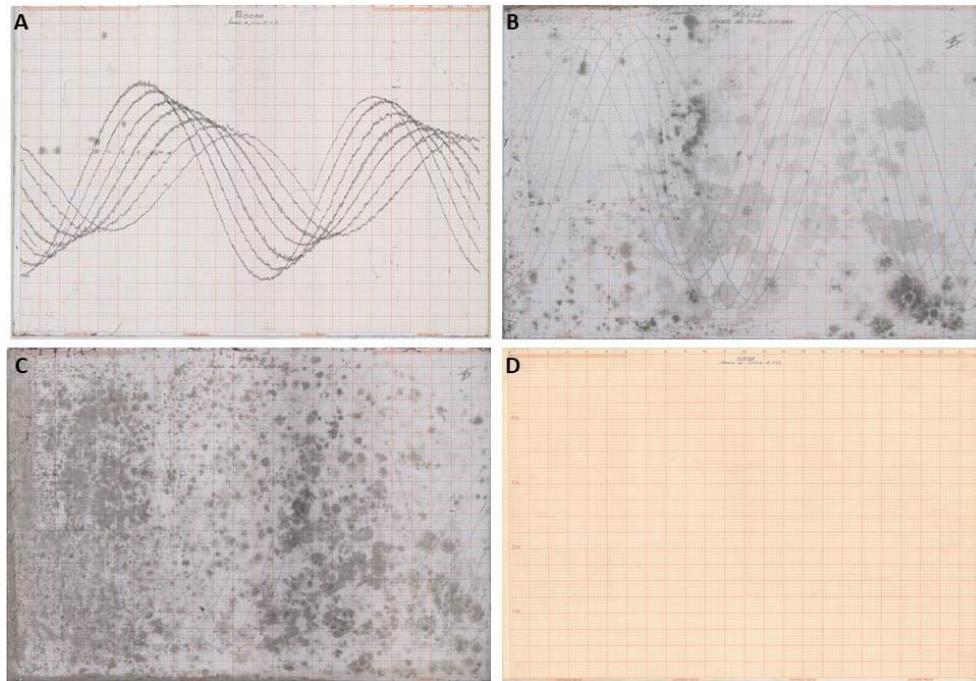


Figure 8 : Les différents types des marégrammes à digitaliser pendant la reconstruction des données marégraphiques historiques de Socoa. A) type 1, 142 marégrammes soit 18,3% (ex. 15-22 déc. 1970 ; AD64 – 2003W-20) ; B) type 2, 50 marégrammes soit 6,4% (ex. 29 oct. – 5 nov. 1963 ; AD64 – 2003W-13) ; C) type 3, 32 marégrammes soit 4,1% (ex. 25 nov. – 2 déc. 1963 ; AD64 – 2003W-20) ; et D) type 1, 553 marégrammes soit 71,2% (ex. 28 oct. – 4 nov. 1957 ; AD64 – 2003W-20).

Au préalable, une phase de traitement d'image est indispensable pour les marégrammes de type 4 (Figure 8D et Figure 9). Ce traitement d'image a été réalisé à l'aide du logiciel GIMP (libre d'accès). Il consiste à réaliser une égalisation des histogrammes de couleurs (= ajustement du contraste), par la suite, une réduction de la teinte et de la saturation en couleur rouge est appliquée. Enfin, la dernière phase de traitement consiste à réduire la luminosité de l'image pour faciliter la détection de la courbe. Après traitement, les courbes deviennent visibles (Figure 9B) et peuvent être vectorisées. A noter que l'observateur n'a pas toujours bien suivi le signal original quand il a retracé les pleines/basses mers avec le crayon. Parfois, cette erreur est assez importante et correspond à une différence de quelques minutes ou centimètres.

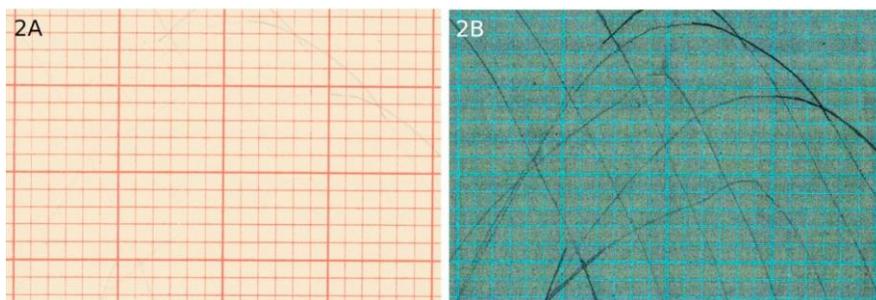
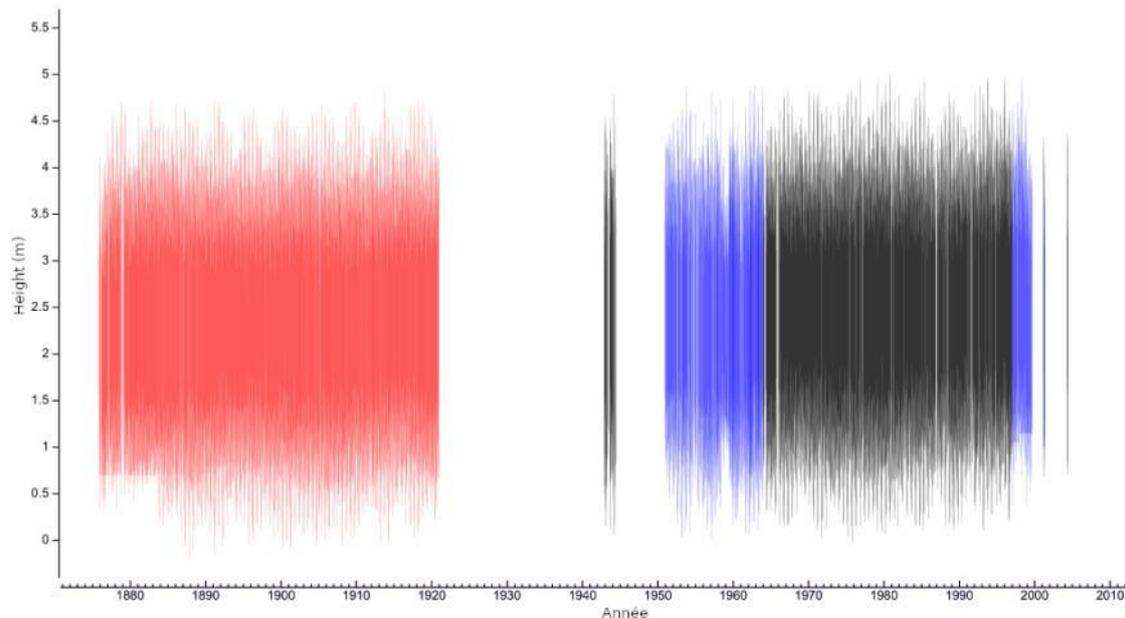


Figure 9 : Une illustration d'un extrait d'un marégramme (28 oct. – 4 nov. 1957 ; Source : AD64 – 2003W-07) avant (2A ; l'image originale) et après un traitement d'image (2B).

Finalement, 777 marégrammes inédits ont été digitalisés à l'aide du logiciel NUNIEAU, ce qui représente plus de **6000 courbes journalières**.

### 3.3. Série temporelle brute de hauteurs d'eau

Le travail de digitalisation des courbes marégraphiques est finalisé. La série temporelle est l'image exacte des registres/marégrammes papiers et elle est représentée en Figure 10. Au total, il y a trois grands jeux de données : 1) les données de registres nouvellement digitalisées entre 1875 et 1920 (Figure 10 : rouge) ; 2) les données de marégrammes qui sont nouvellement digitalisées des années 1950 au 1963 et 1997 au 2001 (Figure 10 : bleu) ; et 3) les données de marégrammes déjà présentes dans la base de données du Shom pour les années 1942-1944 et 1964-1996 (Figure 10 : noir).



**Figure 10 :** La série temporelle marégraphique brute de Socoa (St-Jean-de-Luz). Rouge : données de hauteurs d'eau de registres ; bleu : données de hauteurs d'eau de marégrammes nouvellement digitalisées ; noir = données déjà disponibles dans la base de données.

### 3.4. Anomalies observées

La série brute nouvellement digitalisée est par la suite analysée pour identifier des éventuelles anomalies. Dès qu'une anomalie est identifiée, une vérification dans le registre ou sur le marégramme est réalisée afin de confirmer que l'anomalie n'est pas liée à une erreur de saisie. Dans le cas contraire, il est crucial de comprendre la cause de l'erreur afin de pouvoir corriger cette anomalie. Souvent, les documents contextuels, ou la comparaison de plusieurs courbes entre elles permettent d'identifier et de corriger l'erreur. Cependant, il est parfois impossible d'identifier la cause de l'anomalie et, par

conséquence, de la corriger. Plusieurs anomalies ont été observées lors de la reconstruction de la série marégraphique de Socoa, dont les causes ne sont pas toujours évidentes :

- **L'envasement** (registres et marégrammes). Une obstruction du canal de communication par un dépôt du sable et gravier arrivait régulièrement. Souvent, il y avait des interruptions de l'enregistrement des hauteurs d'eau afin de creuser le puits. Sur certaines périodes, les basses mers n'étaient pas correctes ou approximatives liées à l'envasement du puits. Cet envasement est visible sur deux périodes : 1) entre le début de mesures de hauteurs d'eau en 1875 jusqu'aux travaux réalisés en 1883/1884, et 2) sur une période plus récente entre juin 1995 et 2001. Ces anomalies ne concernent que les valeurs des basses mers (en particulier lors des marées de vive-eau), il arrive que les courbes aient été interpolées lors des basses mers par l'observateur. Pour s'affranchir de ces approximations, les hauteurs en-dessous d'un certain seuil sont supprimées de la série (voir section 4.3). Il est très probable que l'envasement ait impacté également les basses mers des autres années, néanmoins nous n'avons pas trouvé de preuves évidentes dans l'analyse du signal marégraphique.
- **Les erreurs de jour** (registres). L'observateur de l'époque se trompait de jour pendant l'extraction des hauteurs d'eau du marégramme. L'application d'une correction est possible.
- **Les erreurs en mètres** (registres). L'observateur de l'époque se trompait dans la lecture de la hauteur d'eau et rajoutait 1 ou 2 mètres à la valeur réelle. Par exemple pour une hauteur de 1m40, il retranscrit 2m40. L'application d'une correction est possible.
- Les anomalies liées à des **problèmes matériels** (surtout registres) : la casse de fils (de cuivre), une panne d'horloge, casse de la corde du contrepoids du flotteur, etc. Souvent, les hauteurs d'eau ne sont pas enregistrées pendant ce type d'anomalie.
- **Le montant et la pleine mer sont retardés** (registres, et surtout marégrammes) (Figure 11). Parfois, mais pas de façon systématique, le montant et la basse mer sont impactés également. La cause de cette anomalie reste inconnue, donc une correction est difficile à appliquer. Cette anomalie semble se produire d'une façon aléatoire. Parfois seulement un montant et une pleine mer sur un jour sont concernés, mais il est également possible que plusieurs jours (qui se suivent ou non) du même marégrammes sont concernés (Figure 11). Vu les caractéristiques de cette anomalie, et vues que les basses mers ne sont pas (toujours) impactées, il est peu probable que ce ne soit pas lié à l'envasement.
- **Erreurs avec une cause inconnue** (surtout registres). Ces erreurs peuvent être liées à une mauvaise lecture de l'observateur de l'époque, une mauvaise échelle du marégramme, une erreur dans le suivi de la courbe. Comme il est très difficile d'identifier la cause de l'erreur, il est souvent impossible de la corriger avec certitude, donc ces valeurs sont supprimées de la série.

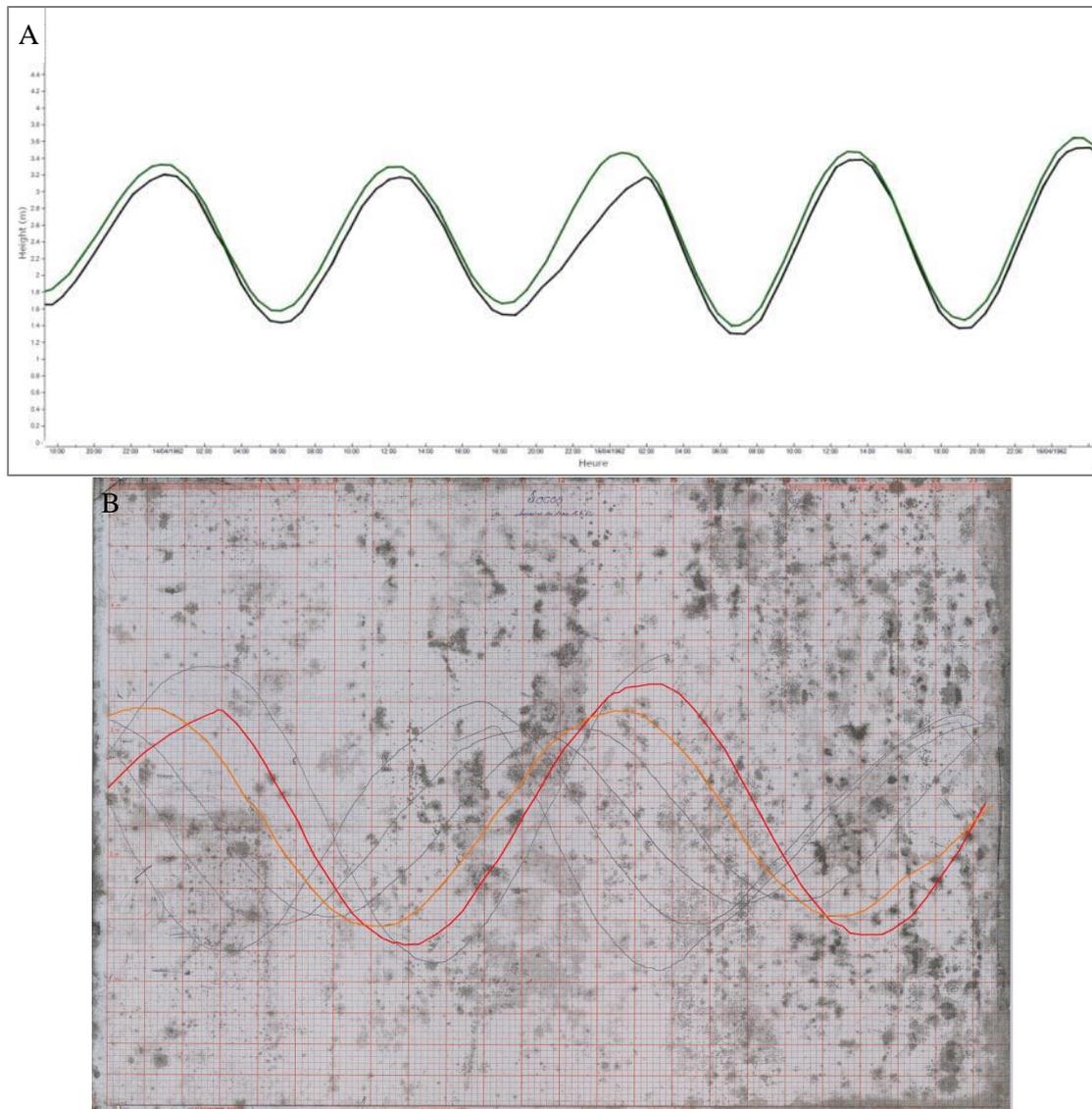


Figure 11. Un exemple d'un montant et la pleine mer qui sont retardés. A) Cet exemple concerne le montant et la pleine mer du matin de 15 octobre 1962. En noir l'observation et en vert la prédiction de marée pour la même période. B) le marégramme correspondant. Les courbes de 14 octobre 1962 (orange) et de 15 octobre 1962 (rouge) sont marquées. Le montant retardé commence vers 21 h le 14 octobre et reviens aux hauteurs normale vers 03 h le 15 octobre et ne monte pas jusqu'à la pleine mer.

## 4. CONTROLE ET VALIDATION DE LA SERIE DE DONNEES

### 4.1. Cohérence en hauteur

Le zéro hydrographique, ou le zéro des cartes marines, est le niveau de référence pour les mesures de profondeur en mer sur une carte marine ainsi que pour les prédictions de marée. En France, le zéro hydrographique est le niveau théorique des plus basses mers astronomiques.

Il est essentiel que les mesures de hauteur d'eau soient calées à la même référence verticale pour que les données des différentes périodes de mesures puissent être utilisées comme un seul jeu de données. À partir des documents contextuels aux archives, il est possible de recalibrer les données sur une même référence.

Les techniques de nivellement sont très anciennes, en France la première mention de nivellement date du 17<sup>e</sup> siècle (IGN, 2012). Depuis 1857, trois grands réseaux de nivellement se sont succédé en France :

- Le réseau de Nivellement Général de la France établi par Paul Adrien Bourdaloue de 1857 à 1864 (= NGF Bourdaloue) ;
- Le réseau de Nivellement Général de la France établi par Charles Lallemand à partir des années 1880 (= NGF Lallemand) ;
- Le réseau de Nivellement Général de la France établi par l'IGN (Institut National de l'information géographique et forestière) à partir de 1962 (= IGN69). Ce réseau est utilisé actuellement.

A partir des documents contextuels retrouvés, il est possible de suivre le zéro du marégraphe au cours du temps qui correspond également sur ce site au zéro hydrographique (= zéro des cartes marines) (Figure 12). Ce zéro a été rattaché au cours du temps à l'échelle de marée installée à proximité et aux différents réseaux de nivellement par le biais de repères posés au sol (Figure 12). De plus, l'altitude de ces repères était connue avec précision, cette précision est primordiale pour le nivellement de ce marégraphe. Un des repères fondamentaux (OaK3L3 sur la Figure 12) est situé à proximité du marégraphe et fixé dans le socle de la croix à proximité de l'appareil.

Pendant une mission hydrographique en 1873, le zéro du marégraphe est établi par l'Ingénieur hydrographe Bouquet de la Grye. Ce zéro est situé 0,20 m au-dessous du zéro de l'échelle et 7,50 m au-dessous du quai de jetée Est (sources : AD64 – 4S 33 (Pau) ; SHD Vincennes – DD2-2053).

En 1900, le zéro du marégraphe de Socoa est rapporté au zéro du réseau de nivellement de l'époque, soit -1,903 mètres NGF Bourdaloue (Figure 12). Le zéro du marégraphe est resté 20 cm au-dessous du zéro de l'échelle (source : annuaire de marées de 1900 ; Archives Shom). La différence entre le zéro NGF Bourdaloue et celui de NGF Lallemand est de 0,27 mètres (Brie, 1961), ainsi le zéro du marégraphe de Socoa peut également être rapporté au zéro NGF Lallemand (Figure 12).

Dans le rapport d'une mission hydrographique en 1961, il est indiqué que le zéro hydrographique à Socoa est 0,18 m plus bas que dans le passé, donc à -1,99 NGF au lieu de -2,17 NGF Lallemand (Brie, 1961). Pendant une autre mission hydrographique en 1963, il apparaît que le conduit de communication entre le puits et la mer est sévèrement obstrué (Roubertou, 1963). Le chef de mission Roubertou explique que le marégraphe était certainement déjà défectueux en 1961, et cette occlusion a causé un retard de la courbe enregistrée sur la marée réelle. Ceci expliquait les divergences qui étaient observées entre les résultats de 1963 et 1961 (Roubertou, 1963). Ils ont également rétabli le zéro du

marégraphe à -2,17 NGF (Lallemand) (Roubertou, 1963). Il est donc probable que le zéro hydrographique à Socoa de -1,99 NGF est un résultat des enregistrements erronés de la marée en 1961.

Le zéro de l'échelle de marée qui se trouve dans le puits du marégraphe est établi à -1,93 NGF pendant la Mission Hydrographique de Dragage (MHD) en 1963 (Roubertou, 1963). Cela signifie que le zéro du marégraphe est 24 cm au-dessous le zéro de l'échelle au lieu de 20 cm (Figure 12).

Dans une lettre adressée à l'Ingénieur Hydrographe Général Grousson du Shom, datée du 9 octobre 1968, il est mentionné que le zéro de l'échelle de Socoa est coté -2,178 m NGF et le cote du repère fondamental la croix sur la digue de Socoa) est + 5,822 m NGF (source : SHD Brest – MB3W) (note : NGF = NGF Lallemand). Il est fort possible que l'auteur de cette lettre se soit trompé et que ce ne soit pas le zéro de l'échelle, mais le zéro du marégraphe qui est à -2,178 m NGF (similaire au -2,17 m NGF trouvés dans d'autres sources, par ex. Roubertou (1963) et des notes d'un hydrographe au Shom sur le zéro du marégraphe).

En 2007, pendant un contrôle du marégraphe radar installé à 2004, des mesures de nivellement sont effectuées. Le repère fondamental (OaK3L3) est coté +5,804 m par rapport au zéro IGN. Il est donc à 7,975 m par rapport au zéro hydrographique. Le zéro du marégraphe/zéro hydrographique de Socoa est donc à -2,171 mètres par rapport au zéro IGN (la différence entre ces deux valeurs) (Tiphaneau *et al.*, 2007).

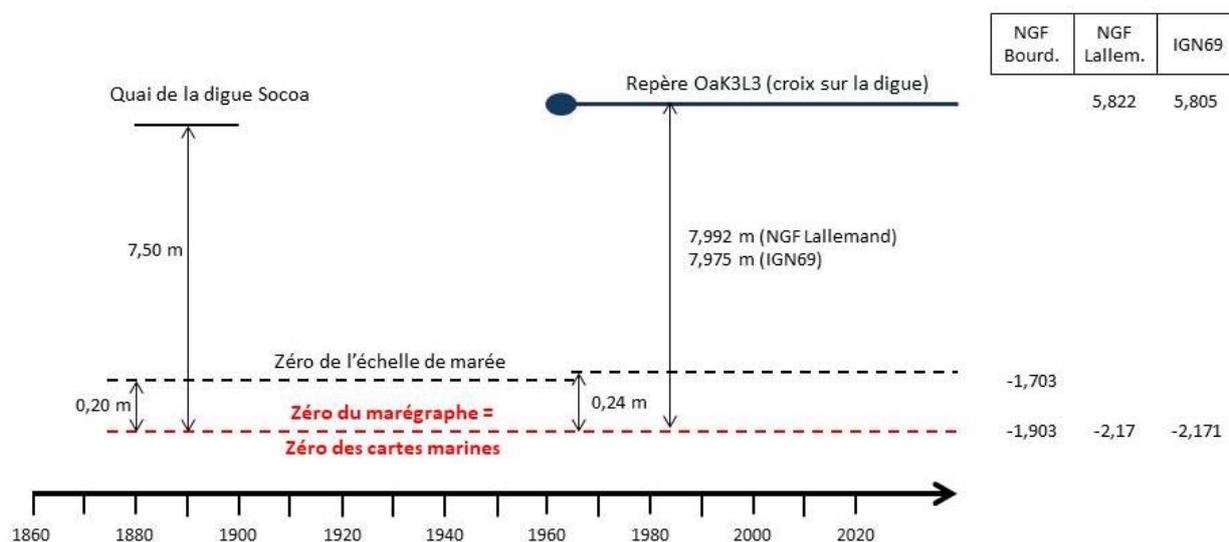


Figure 12 : Schéma synthétisant les relations entre les différentes références verticales utilisées à Socoa depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle. NGF = Nivellement Général de la France ; Bourd. = Bourdaloue ; Lallemand. = Lallemand.

## 4.2. Corrections temporelles appliquées

Les systèmes temporels utilisés pour dater les mesures ont évolué au cours du temps : du Temps Solaire Vrai (TSV) au Temps Solaire Moyen (TSM), puis au Temps Universel Coordonné (UTC). En France, les mesures étaient réalisées jusqu'en 1976 en heures légales (soit UTC+1h), l'introduction de l'heure d'été en 1976 implique que les hauteurs d'eau sont mesurées avec une alternance de l'heure d'hiver (UTC+1) et l'heure d'été (UTC+2) de fin mars à fin octobre depuis cette année. Les différents systèmes temporels sont présentés dans le Tableau 1.

Une conversion dans le système UTC pour les systèmes TSV et TSM est possible en appliquant « l'équation du temps » qui prend en compte les mouvements apparents relatifs du soleil et la longitude où le marégraphe est installé.

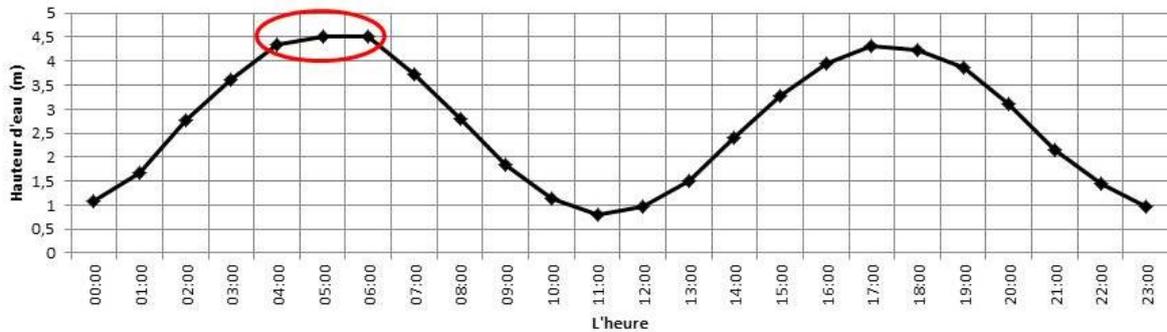
### 4.3. Nettoyage/correction des données

Une fois les premières corrections temporelles et verticales appliquées, la série de données est vérifiée et comparée avec les prédictions de marée calculées sur les mêmes périodes. Ces prédictions aident à identifier les anomalies plus facilement. Pour Socoa, elles ont notamment servi à identifier les anomalies des montants et des pleines mers retardés ainsi que les erreurs de temps qui ne concernent qu'une seule courbe ou un seul marégramme (par exemple à cause d'une feuille qui était mal installée par l'observateur de l'époque).

Les corrections les plus fréquentes sont listées ci-dessous :

1. **Suppression des données en-dessous d'un seuil** dans les périodes d'envasement. Le seuil pour la période de 1875 à 1883 a été fixé à 70 cm et le seuil de la période plus récente (1997-2001) a été estimé à 1,05 m pour l'année 1997 et 1,15 m pour les autres années. Les hauteurs des basses mers dans les années 1995 et 1996 sont approximativement en-dessous de 1 m.
2. **Suppression du montant et des pleines mers retardées.** Parfois, toute la courbe est supprimée si le perdant et la basse mer sont impactés également (Figure 11).
3. **Correction en hauteur de 1 (parfois 2) mètres** dans le cas d'une erreur de lecture de l'observateur. Cette correction peut être négative ou positive.
4. **Correction de l'ordre du centimètre** pour les cas suivants : 1) une inversion entre deux jours consécutifs, l'observateur a interverti deux courbes lors de la retranscription. La correction appliquée est équivalente à la différence entre la hauteur fautive notée et la hauteur correcte du jour précédent ou suivant), et 2) les hauteurs d'eau autour de la pleine mer et/ou basse mer écrit sur les registres ne correspondent pas avec la hauteur de la pleine mer/basse mer écrit dans les journaux des marées (Figure 13). Souvent une correction de 10 ou 20 centimètres (en négatif ou positif) est appliquée.

A La courbe de marée de 11 octobre 1885



| B   | A     | B    | C    | D      | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L     |
|-----|-------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1   | Année | Mois | Jour | Jour 2 | 00:00 | 01:00 | 02:00 | 03:00 | 04:00 | 05:00 | 06:00 | 07:00 |
| 285 | 1885  | 10   | 11   | 284    | 108   | 166   | 277   | 362   | 434   | 450   | 450   | 373   |
| 286 | 1885  | 10   | 12   | 285    | 96    | 144   | 245   | 306   | 377   | 443   | 450   | 383   |

11. .... 4.50 4.22 4.05 3.77 3.73

| MATIN.   |                     |                     |                             |  |                                     |                     |                             |                 |                 |             |
|----------|---------------------|---------------------|-----------------------------|--|-------------------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| DATES.   | HEURE<br>—<br>T. M. | AU MARÉGRAPHE.      |                             |  | A L'ÉCHELLE.                        |                     |                             | VENT.           |                 |             |
|          |                     | HEURE<br>—<br>T. V. | HAU-<br>TEUR.<br>—<br>P. M. | CORREC-<br>TION<br>de la<br>pression<br>baromé-<br>trique. | HAU-<br>TEUR<br>—<br>COR-<br>rigée. | HEURE<br>—<br>T. V. | HAU-<br>TEUR.<br>—<br>T. V. | AGI-<br>TATION. | DIREC-<br>TION. | FORCE.      |
|          |                     | h. m.               | h. m.                       | centim.  | centim.                             | h. m.               | centim.                     | centim.         |                 |             |
| 11. .... | 4.50                | "                   | 5.03                        | 4.80   | 0.91                                | 5.51                | "                           | "               | "               | N.O. C.deS. |

Figure 13 : Exemple de la correction d'une pleine mer avec l'aide de valeurs de pleines mers relevées dans les cahiers qui accompagnent les registres de marée pour la pleine mer de 11 octobre 1885. A) la courbe des hauteurs brutes (non-corrigée) par heure (TSV). Le cercle rouge indique une pleine mer qui est potentiellement incorrecte ; B) la comparaison entre les valeurs saisies et les hauteurs dans le registres qui montre qu'il ne s'agit pas d'une erreur de saisie ; C) un extrait du tableau des horaires et hauteurs de pleine mer pour le 11 octobre 1885. D'après ce relevé, la pleine mer de 05h03 (TSV) est levée à 4,60 m. Il est donc très probable que la hauteur à 05h00 soit 4,60 m à lieu de 4,50, donc une correction de 0,10 m est appliquée.

- Des **anomalies temporelles** ont pu être observées sur certains marégrammes lorsque la dernière heure de mesure sur la courbe est différente de celle indiquée sur la feuille de contrôle. En effet, dans ces cas-ci, l'observateur a pu mal placer la feuille lors du changement de marégramme entraînant donc un décalage temporelle pour toute la période de mesure. La feuille de contrôle permet de quantifier ce décalage et de corriger l'erreur. Parfois, l'échelle de quadrillage des heures a été corrigée par l'observateur sur le marégramme. Il a finalement été décidé de faire ces corrections en amont, lors de la digitalisation des données en modifiant les paramètres du marégramme dans NUNIEAU. Ceci dans le but d'éviter que les données « en double » (les données de deux marégrammes consécutifs se superposent pendant une heure (ou plus), à cause de cette anomalie) soient supprimées par le logiciel.

Pour certains cas néanmoins, les corrections n'étaient pas possibles. Les données ne sont toutefois pas supprimées de la série, car il est peu probable que ces anomalies aient un impact sur la valorisation des données marégraphiques historiques :

- Un avancement ou un retard du stylet (une différence entre l'heure exacte et l'heure indiqué par le stylet ; similaire au point 5 ci-dessus). La différence ici réside dans le fait que ce décalage n'est pas avéré à la pose du marégramme mais n'apparaît qu'à l'enlèvement du feuillet. Il s'agit souvent d'une différence de 1 à 10 minutes. Une correction de cette anomalie ne semble pas possible, car il est difficile de savoir si cet avancement ou ce retard se produit de manière linéaire, ou si un ou plusieurs sauts ont eu lieu pendant l'enregistrement. Ces anomalies sont observées entre avril 1955 et 1957, et de janvier 1966 à 1985. A noter que ces décalages ne concernent pas chaque marégramme entre ces dates.
- Une différence entre la hauteur de la mesure du marégraphe et la hauteur relevée à l'échelle de marée est parfois observée pour plusieurs marégrammes à partir de septembre 1998. Comme l'avancement/retard du stylet, cette différence n'est observée qu'à l'enlèvement (la fin) de la feuille. Parfois la différence pendant la mise-en-place de la feuille n'est pas égale à la différence à l'enlèvement de la feuille (Figure 14). Il est impossible de savoir si cette différence se produit linéairement ou si des sauts ont eu lieu pendant l'enregistrement ou si elle résulte d'une erreur de l'observateur lors de la levée de l'échelle (peu probable).

| MAREGRAPHE DE SOCOA                             |       |   |
|---|-------|---|
| Semaine du 21/03/99 au 10/03/99                 |       |   |
| <u>Mise en place de la feuille</u> : 21/03/99   |       |   |
| Heure exacte .....                              | 14h10 | L'heure exacte =<br>l'heure stylet            |
| Heure de l'horloge du marégraphe .....          | 14h08 |   |
| Heure indiquée par le stylet (1) .....          | 14h10 |   |
| Côte de départ lue à l'échelle .....            | 1,80m | $\Delta$ côte l'échelle et<br>stylet = 0,15 m |
| Côte de départ indiquée par le stylet (2) ..... | 1,95m |   |
| <u>Enlèvement de la feuille</u> : ---/---/---   |       |   |
| Heure exacte .....                              | 8H01  | L'heure exacte =<br>l'heure stylet + 11 min   |
| Heure de l'horloge du marégraphe .....          | 9H    |   |
| Heure indiquée par le stylet (3) .....          | 2H50  |   |
| Côte de départ lue à l'échelle .....            | 2,81  | $\Delta$ côte l'échelle et<br>stylet = 0,11 m |
| Côte de départ indiquée par le stylet (2) ..... | 2,92m |   |

Figure 14 : Exemple d'une feuille de contrôle qui montre les deux anomalies qui n'ont pas été corrigées : 1) un retard du stylet de 11 minutes à l'enlèvement de la feuille ; et 2) une différence en hauteur pendant la mise-en-place de la feuille (= 0,15 m) qui n'est pas égale à la différence en hauteur pendant l'enlèvement de la feuille (= 0,11 m). Source : AD64 ; 2003W-49.

Lors de cette phase de correction, des « étiquettes » ont été attribuées aux données permettant de qualifier la qualité de la mesure (Tableau 2).

Tableau 2 : Etiquettes qualités définies pour caractériser les données de hauteur d'eau.

| Etiquette | Description  |
|-----------|--|
| 1         | Bonne qualité  |
| 2         | Probablement de bonne qualité<br><i>Les données ont subi une correction ou si elle présente par exemple une suspicion de légère anomalie sans éléments pour une correction</i> |
| 3         | Probablement de mauvaise qualité<br><i>La correction donne un résultat moyen / l'anomalie est importante sans éléments pour la corriger</i>                                    |
| 4         | Mauvais qualité<br><i>Mesure supprimée</i>   |

Les données brutes sont fournies avec les étiquettes (Figure 15). Les données de une mauvaise qualité (4) ont été directement supprimées de la série validée ; les données dans la série validée qui ne sont pas supprimées ni étiquetées par « 2 » ou « 3 », sont considérés comme des données avec une bonne qualité (= étiquette « 1 »).

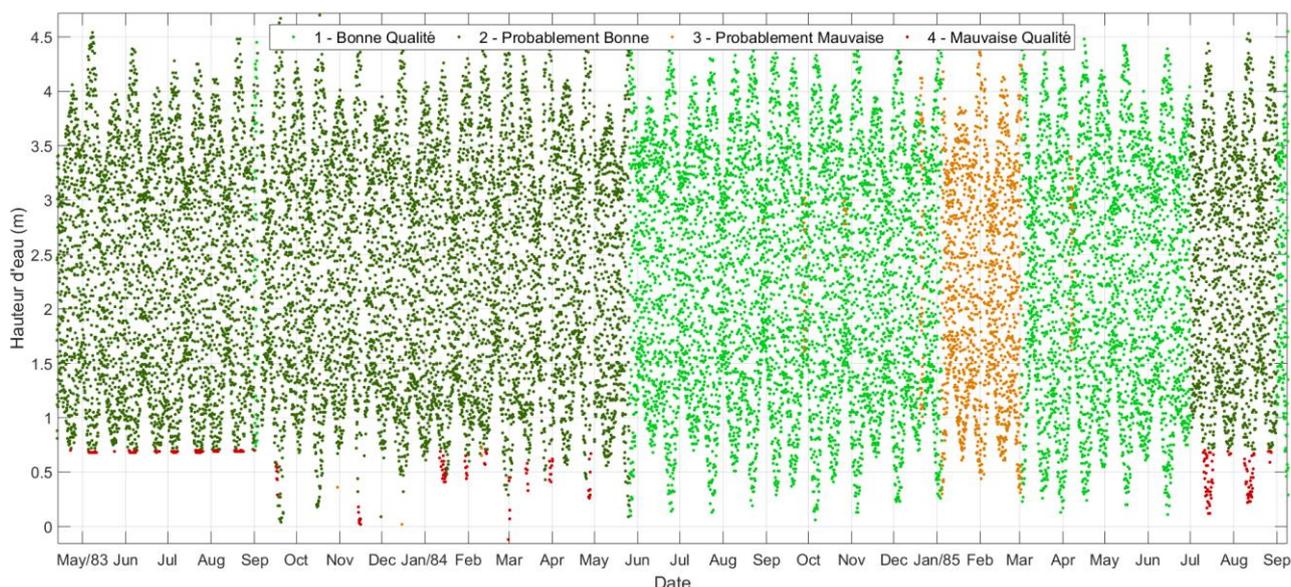
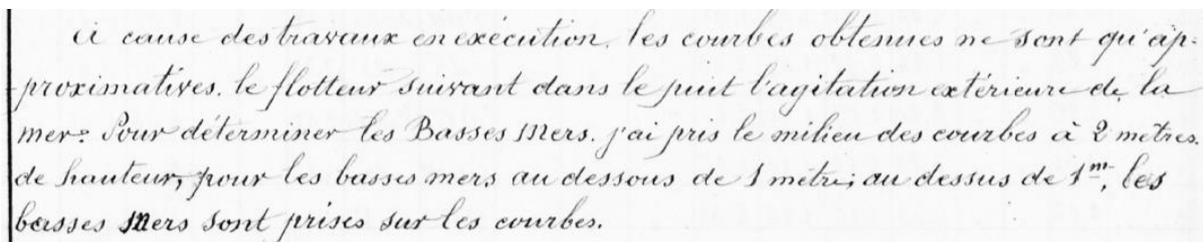


Figure 15 : Exemple du travail de validation des données : attribution d'étiquettes qualité aux données de hauteur d'eau. Zoom sur la période entre avril 1883 et septembre 1885. Vert clair = données de bonne qualité, vert foncé = données qui sont probablement bonnes, marron = données qui sont probablement mauvaises et rouge = données de mauvaise qualité.

#### 4.4. Conseil d'utilisation de la série validée

Bien que la série reconstruite des hauteurs d'eau de Socoa soit validée, la série doit être utilisée avec précaution. En fonction de l'utilisation de cette série (identification des événements extrêmes, étude de l'évolution de niveau marin, etc.), il est possible qu'une partie des données aient une qualité suffisante pour être exploitée et ajoutée à la série temporelle. De plus, il est important de prendre en compte les points suivants :

1. Les anomalies d'avancement/retard du stylet ou la différence en hauteur ne se produisant qu'à l'enlèvement de la feuille ne sont pas corrigées. Les données concernées ont été commentées avec l'étiquette de qualité « 2 » si l'avancement/retard est de moins de 10 minutes et l'étiquette « 3 » si l'écart est de 10 minutes ou plus.
2. Pour plusieurs raisons, mais majoritairement liées à l'envasement, il y a des hauteurs d'eau qui sont « approximatives » ; c'est-à-dire les hauteurs d'eau ont été redessinées par l'observateur ou par des hydrographes qui ont travaillé sur les données avant cette reconstruction. Ces valeurs « approximatives » sont souvent mentionnées dans les notes des registres, sur la feuille de contrôle des marégrammes ou dans des documents contextuels (Figure 16). Parfois, le calcul de ces valeurs est indiqué. Ces données ont été munies d'un étiquette de qualité « 3 » et commentées.



*à cause des travaux en exécution, les courbes obtenues ne sont qu'approximatives. Le flotteur suivant dans le puits l'agitation extérieure de la mer. Pour déterminer les Basses Mers, j'ai pris le milieu des courbes à 2 mètres de hauteur, pour les basses mers au-dessous de 1 mètre; au-dessus de 1<sup>m</sup>, les basses Mers sont prises sur les courbes.*

Figure 16 : Extrait des notes écrit par l'observateur dans le cahier de PM/BM/météo pour le mois janvier 1884 concernant les valeurs « approximatives ». Transcription : « à cause de travaux en exécution les courbes obtenues ne sont qu'approximatives. Le flotteur suivant dans le puits l'agitation extérieure de la mer. Pour déterminer les basses mers, j'ai pris le milieu des courbes à 2 mètres de hauteur, pour les basses mers au-dessous de 1 mètre ; au-dessus de 1 m, les basses mers sont prises sur les courbes. ».

3. Les données des années 1958, 1959, 1960 1961, 1999 et 2001 sont très suspectes. Les données sont sujettes aux problèmes décrits ci-dessus (points 1 et 2) ainsi qu'à des périodes d'envasement ayant un impact sur les pleines mers. A cause de l'ensemble de ces problèmes, ces données sont étiquetées « 3 » et sont à utiliser avec précaution.

## 5. CONCLUSION

La reconstruction de la série marégraphique historique de Socoa (Saint-Jean-de-Luz) comprend 4 étapes : i) la recherche et l'inventaire des documents liés aux mesures des hauteurs d'eau, ii) la dématérialisation des documents, iii) la digitalisation des données, et iv) la validation de la série digitalisée.

La série de Socoa s'étend entre 1875 et 2001 (environ 97 ans de données) et a été reconstruite à partir des données contenues dans 541 registres de marée et 2521 marégrammes. L'ensemble des registres et 777 marégrammes ont été digitalisés lors de cette étude.

Plusieurs problèmes ont été rencontrés pendant la reconstruction, par exemple, une phase supplémentaire de traitement d'image des marégrammes a été nécessaire pour permettre de visualiser certaines courbes effacées. De plus, malgré les corrections réalisées, 6 années de mesures restent très suspectes (pour des raisons diverses) et seront à utiliser avec précaution.

En complément de cette reconstruction de hauteurs d'eau, les mesures météorologiques de Socoa réalisées entre 1875 et 1920 seront digitalisées par le Shom cet été, en dehors du cadre EZPONDA, et permettront de compléter les analyses sur la série de données au profit de la communauté.

## 6. REFERENCES

- Brie. (1961). *Rapport no. 158. Mission Hydrographique de France et d'Algerie (MHCFA)*. Cherbourg.
- Communauté d'Agglomération du Pays Basque. (2019). Littoral – Mis en œuvre de la stratégie de gestion des risques littoraux de la Communauté d'Agglomération Pays Basque. Projet partenarial de recherche EZPONDA. Accord consortium signé. OJ N°63, 68 p.
- Ferret, Y. (2016). Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire (No. 27 SHOM/DOPS/HOM/MAC/NP). 122 p.
- IGN. (2012). Consulté le Février 16, 2021, sur site web IGN:  
[https://geodesie.ign.fr/index.php?page=histoire\\_du\\_nivellement](https://geodesie.ign.fr/index.php?page=histoire_du_nivellement)
- 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 (PhD thesis). Université de La Rochelle.
- Roubertou. (1963). *Rapport no. 272. Mission Hydrographique de Dragage (MHD)*. Bordeaux.
- Tiphaneau, P., Breilh, J.-F., & Wöppelmann, G. (2007). *Rapport 002/07. Contrôle des performances du marégraphe radar BM70A de Socoa (Saint Jean-de-Luz) - le 17 mai 2007*. La Rochelle: Centre littoral de Géophysique - Université de la Rochelle.