

PAPI SEUDRE

Axe 1 « Amélioration de la connaissance et de la conscience du risque »

Action n°I.M.1 « Mise en place d'un marégraphe dans l'estuaire de la Seudre et numérisation des données marégraphiques de Bourcefranc-Le-Chapus »

Livrable n°3 : Exploitation et analyse des séries de données de hauteurs d'eau issues de la digitalisation de documents historiques marégraphiques. Synthèse et valorisation des résultats



Rédacteurs	Vérificateurs	Approbateur
<p>Anne-Marie Candès Technicienne en charge la reconstruction marégraphique de Bourcefranc-Le-Chapus</p> <p>Alexa Latapy Responsable de l'activité reconstruction marégraphique (26/01/2021)</p>	<p>Christophe Vrignaud Chargé de développement (28/01/2021)</p> <p>Nicolas Pouvreau Coordinateur REFMAR (03/02/2021)</p>	<p>Claire Fraboul Cheffe du département Marée - Courants (03/02/2021)</p>

SOMMAIRE :

1.	Préambule	1
2.	La mesure marégraphique à Bourcefranc-Le-Chapus	2
2.1.	Historique des mesures de hauteurs d'eau et du marégraphe	2
2.2.	Types de documents marégraphiques traités	4
2.3.	Synthèse des données marégraphiques à Bourcefranc-Le-Chapus.....	6
3.	Numérisation et digitalisation des données marégraphiques papiers	7
3.1.	Dématérialisation des documents	7
3.2.	Digitalisation des données marégraphiques	7
a.	Traitement des registres de marée	7
b.	Traitement des marégrammes	8
3.3.	Série temporelle brute de hauteurs d'eau.	10
3.4.	Anomalies observées.....	10
4.	Validation, exploitation et analyse des series de donnees	13
4.1.	Contrôle et validation de la serie temporelle de hauteur d'eau	13
a.	Cohérence en hauteur	13
b.	Corrections temporelles appliquées	14
c.	Nettoyage/Correction des données.....	15
4.2.	Exploitation de la série temporelle	18
a.	Détermination des niveaux moyens	18
b.	Caractérisation des évènements extrêmes	22
5.	Conclusions	25
6.	Références	26
7.	Liste des annexes.....	27

1. PREAMBULE

Dans le cadre du programme d'actions de prévention des inondations de la Seudre, le Shom est chargé d'assurer un suivi des niveaux d'eau historiques mesurés dans l'estuaire afin d'améliorer la connaissance et la conscience du risque, notamment en ce qui concerne les événements extrêmes et les phénomènes de submersion marine pouvant être associés (Axe 1, Action n°I.M.1 du PAPI). Cette action comprend l'accompagnement du service de prévention des crues lors de la mise en place d'un marégraphe dans l'estuaire, ainsi que la numérisation des données marégraphiques de Bourcefranc-Le-Chapus. Ce rapport porte uniquement sur ce dernier point.

Le travail de reconstruction de la série marégraphique historique se décompose en trois étapes :

- 1) la recherche des documents en lien avec les mesures de hauteurs d'eau ;
- 2) la numérisation et la digitalisation des documents marégraphiques historiques ;
- 3) la validation et la qualification des données nouvellement digitalisées.

L'ensemble de ces différentes étapes a été effectué par l'agent sous contrat (ASC) Anne-Marie Candès, sous la supervision de l'ASC Yann Ferret puis de l'ASC Alexa Latapy, responsables successifs de l'activité « reconstruction marégraphique historique » au Shom.

Ce travail consiste à pérenniser et à sauvegarder ce patrimoine scientifique non considéré jusqu'alors. Associées aux observations modernes, ces mesures historiques de hauteurs d'eau permettent d'avoir accès à l'évolution pluri-décennale du niveau de la mer. De plus, l'identification et la prise en compte des surcotes passées devrait également permettre d'améliorer les statistiques sur la tendance des niveaux marins extrêmes.

Ce rapport correspond au **livrable 3 de l'action n°I.M.1 de l'Axe 1**. Il accompagne la fourniture de l'ensemble des données de hauteurs d'eau validées issues de la digitalisation de ces documents. Ces données ont également été exploitées pour extraire de la série temporelle des niveaux moyens et des événements extrêmes notables qui accompagnent également ce rapport. Dans les chapitres 2 et 3, ce document reprend également le contenu actualisé des rapports précédents afin d'en faire un document décrivant l'étude dans son ensemble. Dans un premier temps, l'historique des mesures marégraphiques réalisées à la Pointe du Chapus et le type de documents à analyser sont brièvement rappelés. Dans un second temps seront mentionnés l'ensemble des actions réalisées afin de permettre la dématérialisation de ces documents et la digitalisation du signal marégraphique qu'ils contiennent. Dans un troisième temps, le travail de validation de la donnée brute numérique est détaillé, en recoupant les informations présentes dans les métadonnées, afin de rendre la série cohérente aussi bien en temps qu'en hauteur. Enfin, à partir de la série temporelle de hauteur validée, des tendances d'évolution sont calculées. De plus, pour l'étude d'événement extrêmes futurs, un jeu de donnée d'une dizaine de surcotes principales a été généré. En annexe, la série temporelle validée ainsi que l'exploitation de cette série sont fournies. Tous ces fichiers composent le livrable 3.

Par ailleurs, une page Internet a été créée sur le site de la coordination nationale de l'observation du niveau de la mer (REFMAR) afin de décrire de façon synthétique ce travail de reconstruction marégraphique de Bourcefranc-Le-Chapus¹.

Terminologie utilisée dans ce rapport :

Digitaliser (vectoriser) : produire une série temporelle de données/valeurs numériques (tableau numérique, fichier texte,...) à partir du contenu d'une image numérique (scans de tableaux, de courbes, ...)

Marégramme : graphique représentant une ou plusieurs courbes de hauteurs d'eau en fonction du temps sur feuille de papier. Les marégrammes sont obtenus par des marégraphes à flotteur.

Marégraphique (marégraphie) : tout ce qui se rapporte à la mesure et aux informations connexes sur les observations et la manière dont les mesures de hauteurs d'eau ont été réalisées

Numériser (scanner) : Produire une image numérique à partir d'un document papier.

2. LA MESURE MAREGRAPHIQUE A BOURCEFRANC-LE-CHAPUS

2.1.HISTORIQUE DES MESURES DE HAUTEURS D'EAU ET DU MAREGRAPHE

Au cours du 19^{ème} siècle, plusieurs missions hydrographiques ont été réalisées dans l'estuaire de la Seudre par le Service hydrographique de la Marine, ancêtre du Shom, afin de réaliser des levés bathymétriques du secteur pour sa cartographie. Les sondes bathymétriques devant être absolument réduites de la marée, des mesures marégraphiques ont été réalisées grâce à la lecture régulière de la hauteur d'eau sur une échelle de marée placée de façon temporaire au Fort-Louvois à la pointe du Chapus (localisation en Figure 1). Ces mesures permettaient d'ôter l'effet de la marée sur les profondeurs mesurées lors des sondages. Les campagnes identifiées dans le cadre de cette étude datent de 1878 et 1882 et ont duré 1 et 3 mois, respectivement.

Au cours du 20^{ème} siècle, des mesures de hauteurs d'eau ont également été réalisées très ponctuellement dans le cadre de campagnes hydrographiques en estuaire de Seudre, mais de façon plus anecdotiques et pas nécessairement localisées au Chapus (durée variant de quelques jours à 1 mois).

¹http://refmar.shom.fr/fr/applications_maregraphiques/programmes-projets/construction-analyse-series-coherentes-niveau-mer/estuaire-seudre-bourcefranc-le-chapus

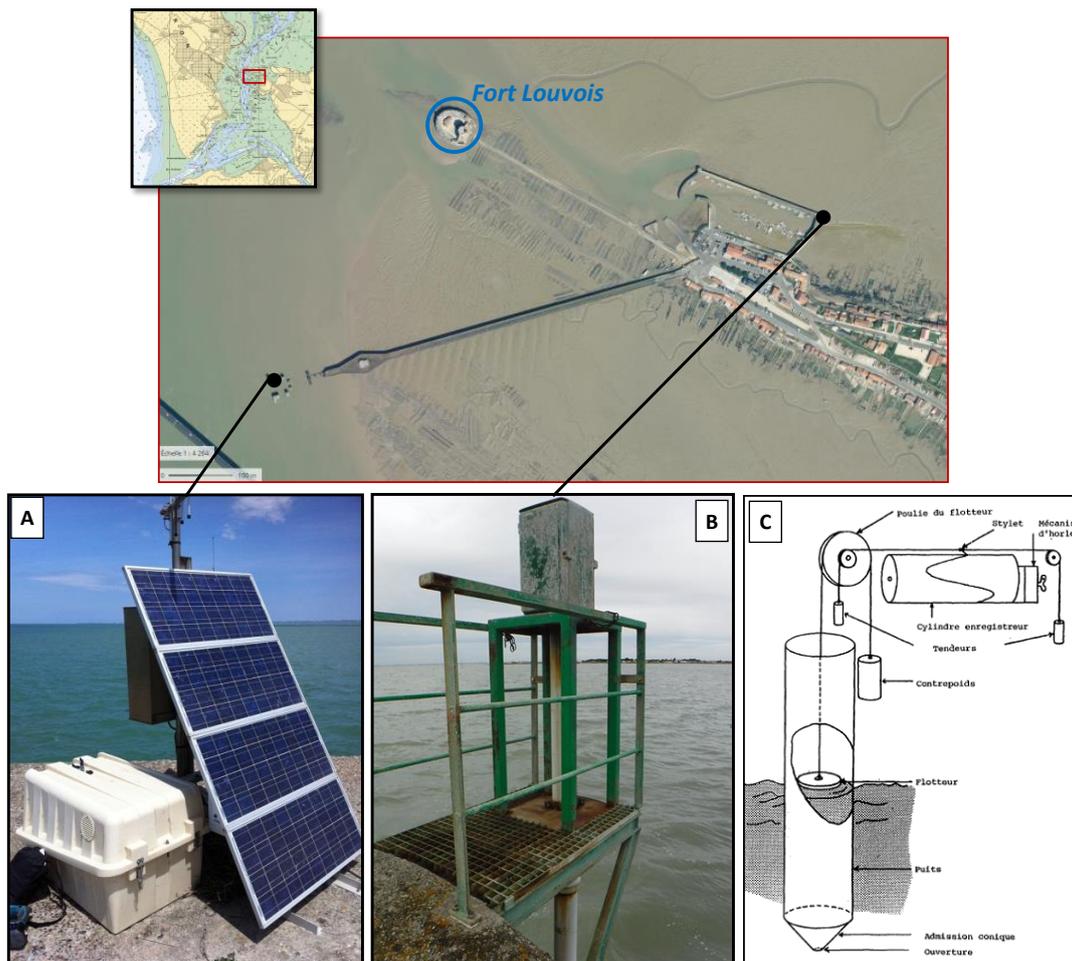


Figure 1 : Localisation actuelle, depuis 2011 (A), et ancienne (B) du marégraphe de Bourcefranc-Le-Chapus. C. Principe de fonctionnement d'un marégraphe mécanique à flotteur (UNESCO, 1985).

(Photo aérienne : géoportail.gouv.fr ; ancien marégraphe : photographie A-M Candès, Shom, Mai 2019 ; Nouveau marégraphe : Refmar, Shom)

La reconstitution de l'historique du marégraphe de Bourcefranc-Le-Chapus, bien que relativement récente, s'est révélée parfois compliquée à réaliser car plusieurs acteurs en charge du recueil et de la conservation des données marégraphiques se sont succédés au cours du temps.

Les premières mesures de hauteurs d'eau enregistrées sur des marégrammes datent de 1970, mais elles ne couvrent qu'une période relativement courte de quelques mois. Les enregistrements sont obtenus à l'aide d'un marégraphe mécanique à flotteur. Le principe de fonctionnement de ce type d'appareil est fourni en Figure 1. Ce n'est qu'à partir de l'année 1983 qu'un marégraphe est installé de façon permanente dans le port du Chapus (localisation en Figure 1). L'appareil alors utilisé est opéré par le Service Hydrographique de la DDE 17. La vocation initiale de ce marégraphe était opérationnelle : il était un moyen de fournir des informations utiles et en temps réel pour le dragage du port et des environs. Les mesures de hauteurs d'eau n'étaient pas acquises dans l'objectif d'étudier la marée pour en améliorer sa prédiction.

A partir de 1990, du fait d'une restructuration des services, la gestion du marégraphe est transférée à la Division Hydrographie du Port de La Rochelle. En 1996, un nouvel appareil, du même type, est installé pour remplacer le marégraphe alors en place et dont les mesures étaient

de plus en plus entachées d'anomalies. En 2005, le service de prévention des crues (SPC) devient propriétaire du marégraphe et de fait, est en charge de sa bonne marche (changements réguliers des marégrammes, contrôles, réglages, ...). Des mesures continuent d'être réalisées dans le port au moins jusqu'en 2007, dernière année pour laquelle des documents papiers ont été retrouvés dans le cadre de cette étude (cf. livrable Jalon 1).

En 2011, l'observatoire marégraphe est délocalisé sur un pilier à l'extrémité de l'ancien embarcadère désaffecté du Chapus et l'appareil installé est d'abord un marégraphe numérique à pression avant d'être rapidement remplacé par un marégraphe côtier numérique radar (MCN). Depuis 2014 les mesures de hauteurs d'eau du marégraphe de Bourcefranc-Le-Chapus sont diffusées sur le portail de l'information géographique maritime et littorale de référence Data.Shom.fr.

Au cours de la période [1983 – 1999], des doutes subsistent quant à sa localisation exacte dans le port car les informations retrouvées sont parfois contradictoires : parfois l'emplacement mentionné, ou suspecté, est l'extrémité Est de la digue Nord du port et parfois, il semble que la localisation est la partie Sud du duc d'Albe Nord-Ouest de l'ancien embarcadère des bacs. A partir de 1999, il est quasiment certain que le site est localisé dans le port à l'endroit où il est encore possible d'observer l'ancien marégraphe (Figure 1). Cette incertitude sur la localisation est peu impactant pour la suite de l'étude car ces sites ne sont distants que de quelques centaines de mètres, et les caractéristiques de la marée peuvent être considérées comme similaires.

2.2.TYPES DE DOCUMENTS MAREGRAPHIQUES TRAITES

La quasi-totalité des documents relatifs aux mesures de hauteurs d'eau effectuées à Bourcefranc-Le-Chapus correspond à des marégrammes de format A3 (Figure 2-C). Ces documents papiers, représentant graphiquement l'évolution du niveau de la mer en fonction du temps, couvrent des périodes généralement comprises entre 1 et 2 semaines. Parfois, ces marégrammes sont associés à leur feuille de contrôle (Figure 2-D) sur lesquelles l'opérateur du marégraphe rendait compte des contrôles/réglages effectués. Ce type de document, qualifié de métadonnées contextuelles, apporte des informations essentielles lors d'un travail de reconstruction marégraphe pour pouvoir qualifier et valider les mesures réalisées à l'époque.

Les quelques mesures du 19^{ème} siècle identifiées dans le cadre de l'étude, réalisées grâce à la lecture des hauteurs d'eau sur des échelles de marée, se présentent sous deux formes :

- des registres de marée, dans lesquels les observations marégraphe sont notées toutes les 15 minutes dans un tableau (Figure 2-B) ;
- des graphiques (Figure 2-A) qui, à la différence d'un marégramme produit par un marégraphe, ne rend compte de l'évolution du niveau de l'eau que toutes les 15 minutes et seulement pendant la journée (à l'époque, la lecture à l'échelle ne pouvait être réalisée de nuit).

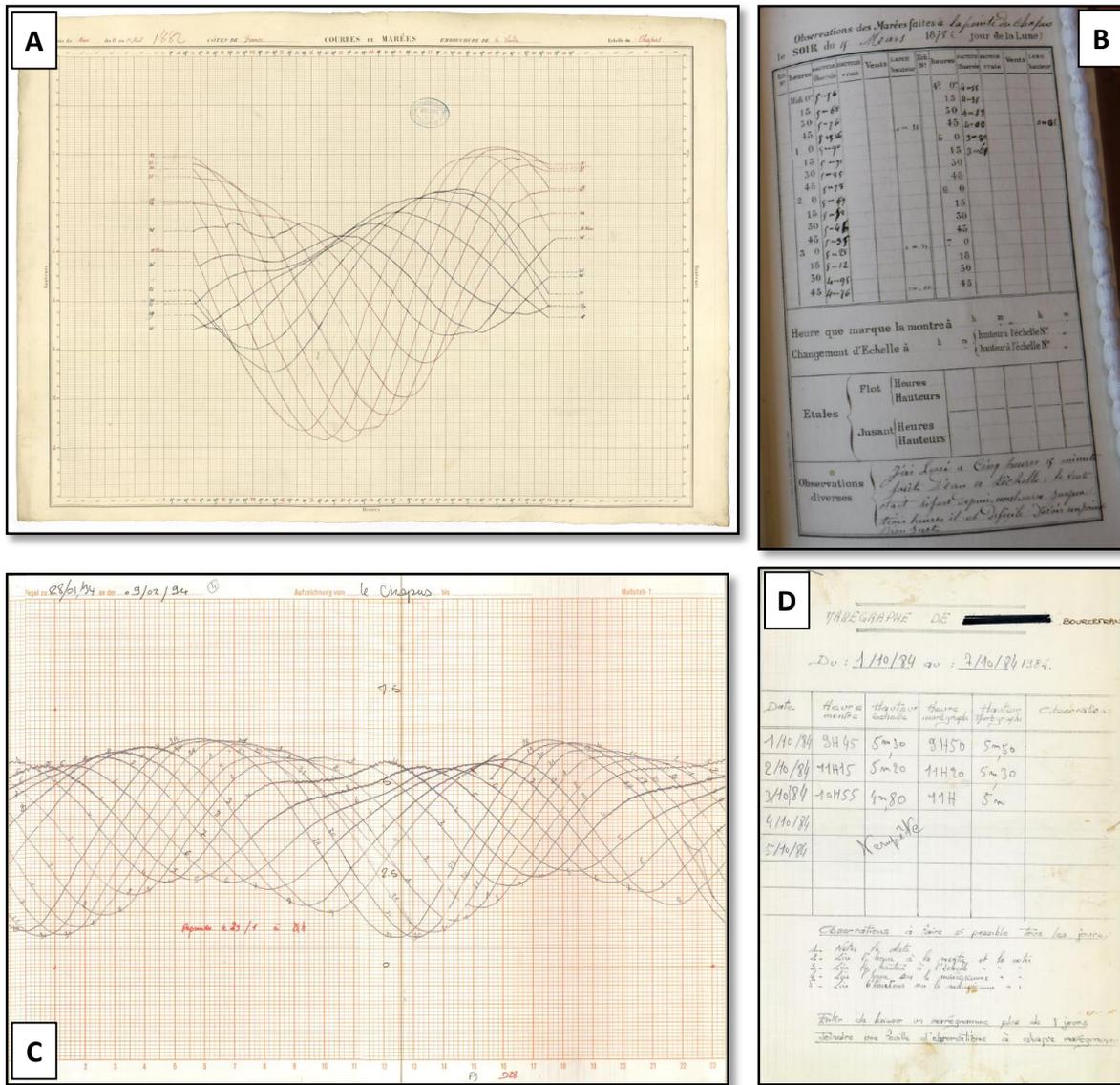


Figure 2 : Exemples de documents relatifs aux mesures marégraphiques à Bourcefranc-Le-Chapus.

A. Marégramme de 1882, correspondant à la retranscription graphique de lecture à l'échelle de marée (Archive Shom) ; B. Extrait de registre de marée : observations de hauteurs d'eau relevées en mars 1878 par l'opérateur sur une échelle de marée toutes les 15 minutes (cote : 7JJ1434, SHD Rochefort) ; C. Exemple du marégramme du 28/01 au 09/02/1994, document typique de la période [1970 - 2007] (Archives SPC 17/Shom - sans cotation) ; D. Exemple de feuille de contrôle parfois associée au marégramme.

2.3.SYNTHESE DES DONNEES MAREGRAPHIQUES A BOURCEFRANC-LE-CHAPUS

Lors des investigations menées pour inventorier les mesures et documents relatifs à la mesure, un dizaine de centres d'archives, d'associations et d'organismes ont été consultés². Ajouté à cela, des témoignages oraux de locaux sur les sites d'implantation des mesures ont également été recueillis. Une synthèse des documents retrouvés et traités dans le cadre de cette reconstruction marégraphiques est disponible dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Synthèse des documents identifiés et traités dans le cadre de la reconstruction marégraphique de Bourcefranc-Le-Chapus.

(N.D. : Non Déterminé ; TSM : Temps Solaire Moyen ; UTC : Temps universel coordonné ; Heure légale : UTC + 1/ +2 ; la ligne grisée correspond à un site de moindre intérêt pour l'étude)

Période	Durée effective	Instrument	Localisation des mesures	Système de temps	Type de document	pas de temps	Nombre de documents	Lieu d'archive
1878	2 mois	Echelles de marée	Pointe du Chapus (Fort-Louvois)	TSM	Registre	15 minutes / diurnes	180 pages	SHD Rochefort (7J)1343)
1882	1 mois	Echelle de marée	Pointe du Chapus (Fort-Louvois)	TSM	Marégramme	15 minutes / diurnes	3	Shom
1946	1.5 mois	Echelle de marée	N.D.	heure légale	Marégramme	15 minutes / diurnes	6	Shom
1948	15 jours	Echelle de marée	N.D.	heure légale	Marégramme	15 minutes / diurnes	1	Shom
1962	3 jours	N.D.	Pile n°6 du pont d'Oléron	-	Registre	15 minutes	3	AD 17
1971	2,5 mois	Marégraphe à flotteur (OTT R16)	Ancien embarcadère du Chapus	heure légale	Marégramme	Continu	13	Shom
1983 - 1999	11 années	Marégraphe à flotteur	Port du Chapus (extrémité est de la digue Nord et/ou ancien embarcadère)	heure légale	Marégramme	Continu	451	Shom / SPC 17
1999 - 2007	6 années	Marégraphe à flotteur	Pointe du Chapus, ancien embarcadère des bacs	heure légale	Marégramme	Continu	260	Shom / SPC 17
2014 - ...	7 années	MCN	Ancien embarcadère du Chapus	UTC	Numérique	5 minutes	-	data.shom.fr

La totalité des documents marégraphiques papiers retrouvés et traités permet de reconstruire environ **18 ans de mesures** relativement continues du niveau marin au niveau de Bourcefranc-Le-Chapus.

² Archives départementales 14, Archives du Service Historique de la Défense (Rochefort), Archives du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (Brest), Société d'Histoire et d'Archéologie en Saintonge Maritime, Société Géographique (Rochefort), Société d'Histoire du Canton de Marennes, Association Pêche, Carrelets et Moulinets, IGN, Mairie de Bourcefranc-Le-Chapus.

3. NUMERISATION ET DIGITALISATION DES DONNEES MAREGRAPHIQUES PAPIERS

Une fois les documents marégraphiques inventoriés et récupérés (livrable 1), la deuxième étape de ce travail de reconstruction consiste à numériser ces documents, puis à digitaliser les mesures de hauteurs d'eau matérialisées afin de les rendre disponibles et exploitables au format numérique.

3.1. DEMATERIALISATION DES DOCUMENTS

Sur les 716 marégrammes identifiés, ceux archivés au Shom étaient déjà scannés. Ainsi, seuls les **345 documents** provenant des archives du SPC **ont dû être numérisés afin d'en obtenir une image numérique**. Pour cela, les marégrammes ont été exploités un par un grâce à l'utilisation d'un scanner à plat, en veillant à amoindrir au maximum les effets d'un stockage qui n'a pas toujours été idéal (trace de pliure, bordures abîmées, ...). Les fichiers numériques issus de ce processus de numérisation sont en format « TIF », avec des résolutions comprises entre 200 et 350 dpi et une taille d'environ 35 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.

Lorsque le scannage n'était pas possible, des photographies ont été faites pour permettre de garder une trace des documents en questions. Cela a été le cas, par exemple, pour les registres de marées du 19^{ème} siècle car ces documents étaient trop fragiles, ou pour les documents consultés aux archives départementales 17, car seul la reproduction des feuillets avec un appareil photo y est autorisé.

Dès qu'un document présentait un intérêt permettant la reconstruction de la série marégraphique (feuille de contrôle, courrier d'un ingénieur, annotations au dos de documents, ...) il a été photographié. Ces métadonnées contextuelles apportent de nombreux renseignements tels que le type d'appareil utilisé (et par conséquent, la précision à associer aux mesures), les niveaux de référence utilisés (exemple : altitude du zéro d'une échelle de marée ou d'un marégraphe), le système horaire utilisé, ...

Au final, **l'ensemble des documents numérisés correspond à environ 25 Go d'images traitées** (cf. livrable 2).

3.2. DIGITALISATION DES DONNEES MAREGRAPHIQUES

A. TRAITEMENT DES REGISTRES DE MAREE

Seules les mesures réalisées en 1878 sont conservées sous forme de registres. L'écriture des observateurs des marées étant plus ou moins lisible (Figure 2-B), la digitalisation n'a pas pu être effectuée en utilisant un logiciel de reconnaissance automatique de caractères. Cette tâche a dû être réalisée manuellement : les valeurs de hauteurs d'eau ont été saisies dans un tableur.

Des procédures de vérifications sont utilisées afin d'identifier les erreurs liées à la saisie et/ou les erreurs faites par l'observateur de l'époque. Ces contrôles, présentés en Figure 3, consistent surtout à :

- la mise en forme, en temps réel, des cellules du tableau numérique, permettant de visualiser les valeurs « anormales » lors de la saisie. ;
- tracer les courbes marégraphiques afin d'identifier graphiquement les anomalies.

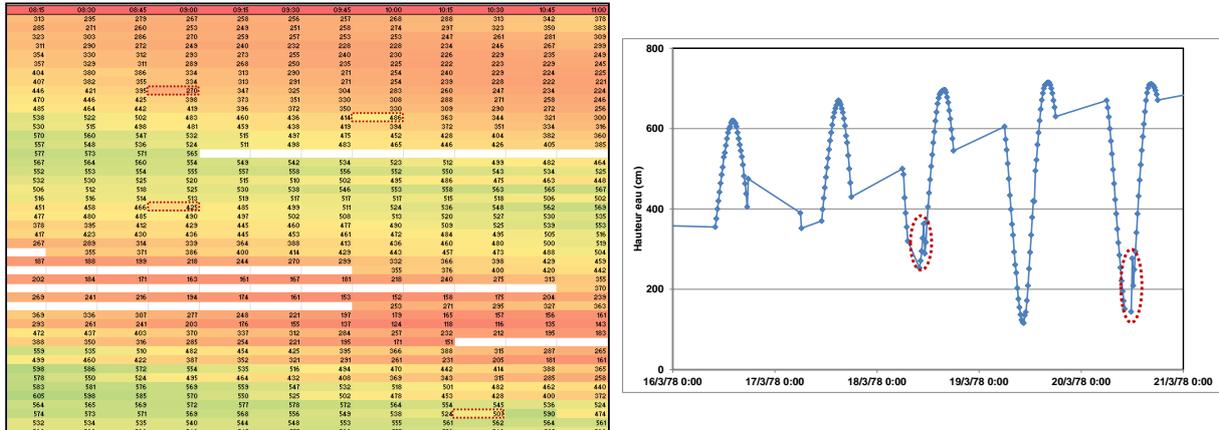


Figure 3 : Illustration des procédures de contrôles utilisées lors de la digitalisation des registres de marée.

Des exemples d'anomalies identifiées grâce à ces contrôles sont entourés en rouge pointillé.

Cette phase de contrôle a surtout pour but d'éviter des erreurs de saisie lors de la retranscription. Certaines anomalies sont conformes aux valeurs notées sur le registre, et ne seront corrigées, ou supprimées, qu'ultérieurement lors de la validation des données.

Quatre échelles de marées distinctes, positionnées à des profondeurs différentes, ont été utilisées pour effectuer ces mesures. En fonction de la hauteur d'eau certaines échelles étaient à sec ou au contraire immergées, rendant leur utilisation impossible. Pour rendre cohérent l'ensemble des mesures, toutes les hauteurs ont alors dû être rapportées au même référentiel vertical. Par ailleurs, l'échelle utilisée pour la mesure n'est pas toujours identifiée de manière claire dans le carnet de terrain. Malgré cela, la qualité des données récupérées semble globalement bonne.

B. TRAITEMENT DES MAREGRAMMES

Après avoir été numérisés, les marégrammes sont digitalisés afin d'extraire les données de hauteurs d'eau en fonction du temps. Pour cela, le logiciel NUNIEAU³ (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 du Chapus ont malheureusement rendu cette automatisation impossible. En effet, ces documents comportent des courbes multiples qui se superposent très régulièrement : il est alors délicat, voire impossible de définir automatiquement des « masques d'analyse » pour distinguer chaque courbe. Pour pallier à ce souci, 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

³ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/logiciel-numerisation-enregistrements-graphiques-niveaux-eau>

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 (Figure 4) :

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

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

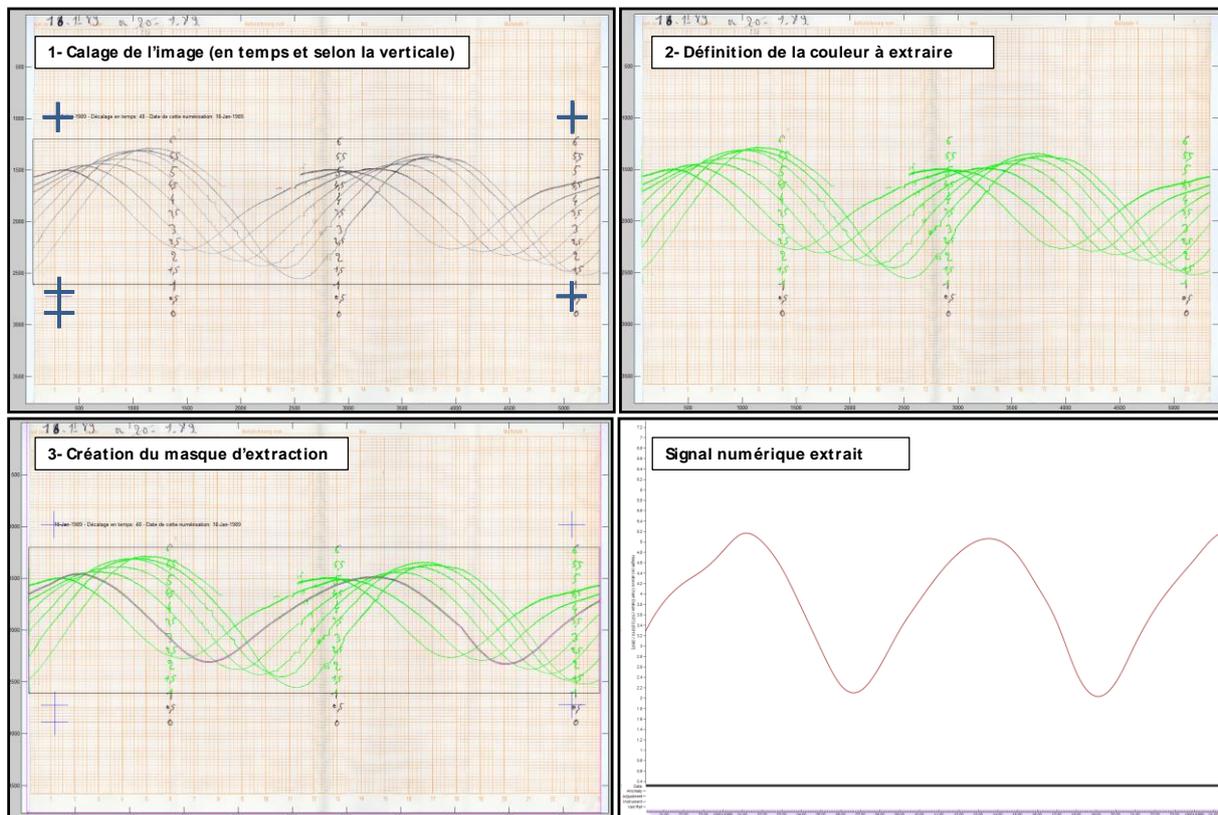


Figure 4 : Illustration des étapes à suivre pour digitaliser une courbe de marée avec le logiciel NUNIEAU.

Pour ce travail de reconstruction marégraphique, l'ensemble des marégrammes inédits a été digitalisé grâce à NUNIEAU, représentant près de 4000 courbes journalières et plus de 9 mois de travail à temps plein.

3.3. SERIE TEMPORELLE BRUTE DE HAUTEURS D'EAU.

Le travail de digitalisation des courbes marégraphiques est finalisé. La série temporelle (l'image exacte des registres/marégrammes papiers) issue de ce traitement a été rendu disponible lors du livrable 2. L'étendue de cette série nouvellement digitalisée est présentée en Figure 5.

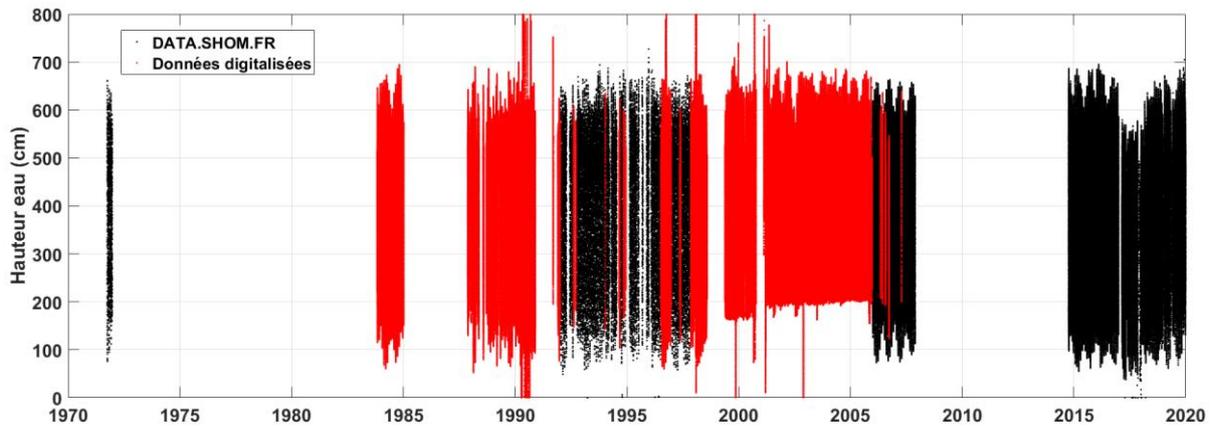


Figure 5 : Série temporelle marégraphique brute de Bourcefranc-Le-Chapus

(Rouge : données de hauteurs d'eau nouvellement numérisées ; Noir : données déjà disponibles sur DATA.SHOM.FR). Nota : Les mesures du 19ème siècle ne sont pas représentées ici pour plus de lisibilité.

3.4. ANOMALIES OBSERVEES

La majorité des marégrammes traités présente des caractéristiques adéquates pour être exploités, avec des courbes lisibles et discernables. Néanmoins, certains documents se sont révélés plus complexes à digitaliser. Voici les quelques cas problématiques rencontrés :

- Un marégramme a parfois enregistré plus de 2 semaines de mesures de hauteurs d'eau. Dès lors, les courbes journalières de marée deviennent difficiles à « démêler » car elles peuvent se confondre entre elles (Figure 6-A). Dans ce cas, un déchiffrage sur le papier est souvent nécessaire avant de commencer le travail de digitalisation. Cette approche a dû être appliquée à environ une quarantaine de marégrammes comportant plus de 20 jours soit plus de 20 courbes (le maximum traité étant de 32 jours), ce qui représente environ 4700 jours de mesures récupérés. Malheureusement, il a été impossible de procéder à l'exploitation d'une dizaine de marégrammes couvrant les périodes les plus longues car les courbes étaient trop inextricables.
- Parfois, les courbes marégraphiques sont trop illisibles pour être suivies facilement (courbes effacées au cours du temps, trop peu d'encre lors des mesures, ...). Dans ce cas, des traitements d'images sont réalisés en amont du processus de vectorisation (Figure 6-B).
- Régulièrement, le signal à extraire est très bruité, soit du fait d'oscillations à haute-fréquence du plan d'eau (clapot, houle), soit à cause du stylet qui avait trop d'encre (Figure 6-C). Dans ce cas, une attention particulière doit être apportée lors de la création des masques d'extraction afin d'extraire l'ensemble du signal.

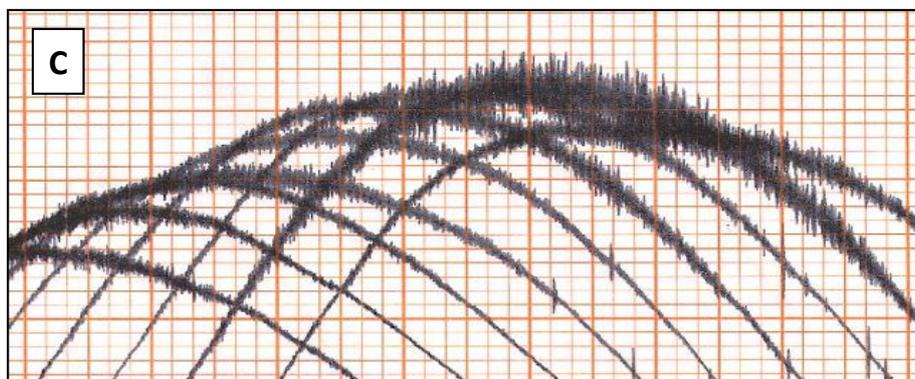
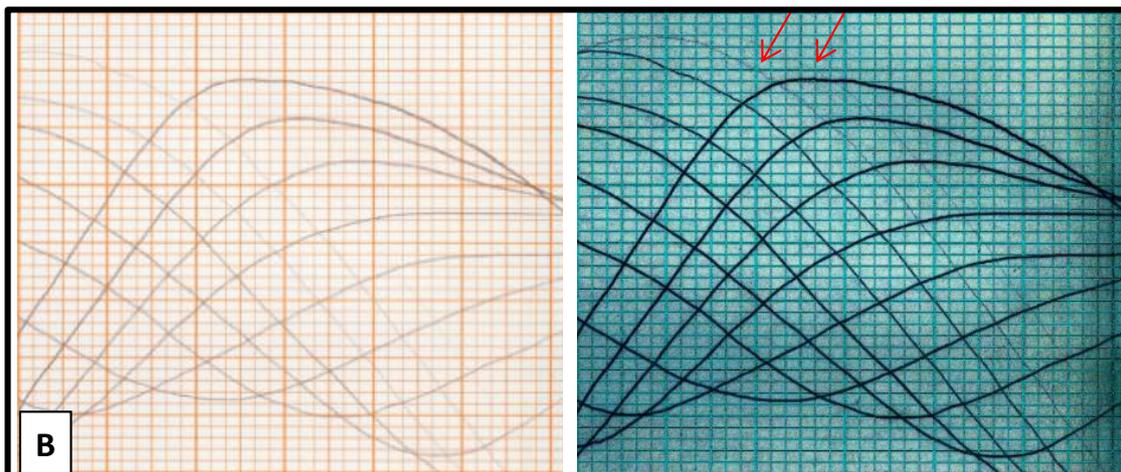
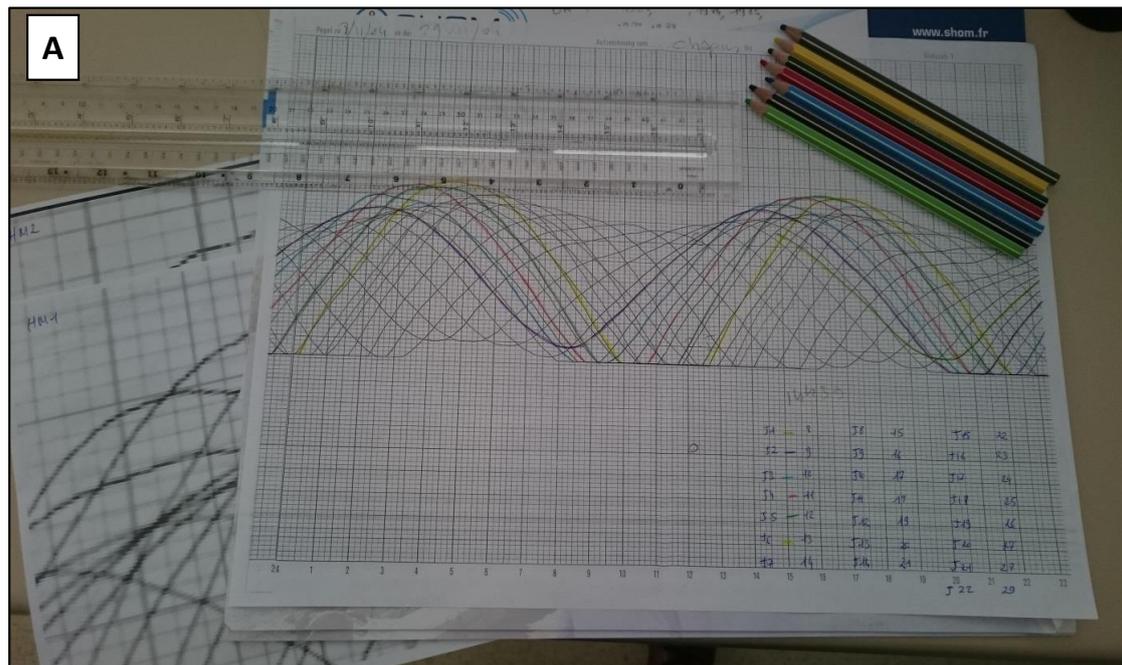
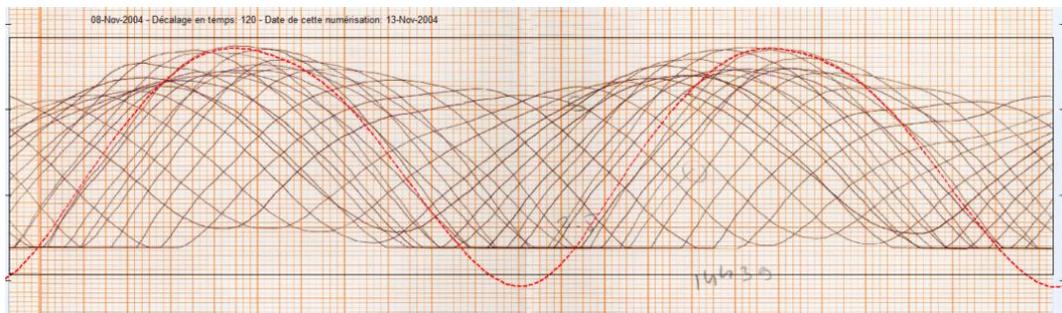


Figure 6 : Exemple de marégrammes délicats à digitaliser.

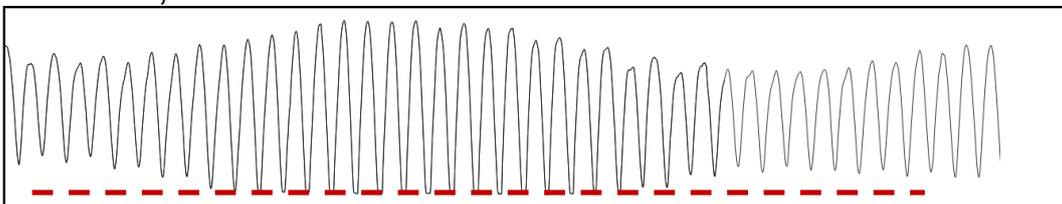
A. Marégramme présentant un nombre important de courbes ; B. Courbes très peu visible par manque d'encre dans le stylet ; C. Signal très bruité du fait d'oscillations à haute-fréquence et/ou car trop d'encre dans le stylet.

De plus, lors de certaines périodes, les mesures sont entachées d'anomalies récurrentes qui ont inmanquablement un impact sur la donnée marégraphique reconstruite finale :

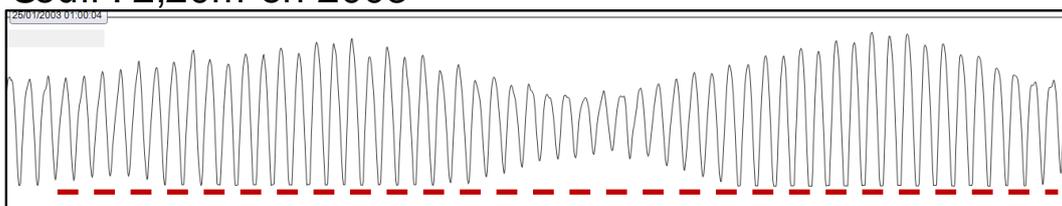
- les mesures peuvent présenter de nombreux blocages de l'horloge (le cylindre sur lequel est positionné le marégramme ne tourne plus) et/ou saut verticaux (blocages du flotteur dans le puits de tranquillisation) qu'il sera parfois difficile, voire impossible à corriger (exemple en Figure 9, Zoom 2) ;
- à partir de 1999, le marégraphe est à sec lors des marées basses de Vive-Eau. Cette situation tend à s'aggraver avec le temps, jusqu'à ce qu'en 2007, seules les basses mers de Morte-Eau soient mesurées (Figure 7).



Seuil : 1,66m en 1999



Seuil : 2,20m en 2003



Seuil: 2,90m en 2007

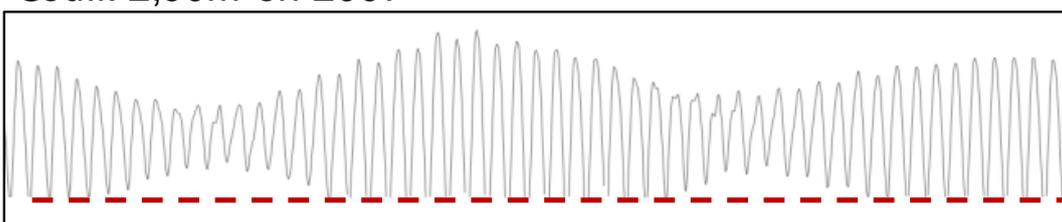


Figure 7 : Aggravation du phénomène d'assèchement lors BM de Vive-Eau à Bourcefranc-Le-Chapus

Comme le marégraphe servait principalement aux gestionnaires pour les opérations de dragages, la maintenance de l'appareil n'était pas une priorité (surtout que les gestionnaires devaient gérer plusieurs appareils dans le département). Néanmoins, les pleines mers ne sont que peu impactées par ces problèmes de mesures, et dans un contexte de risque submersion, la reconstruction a permis l'inventaire et l'étude des occurrences sur les niveaux extrêmes.

4. VALIDATION, EXPLOITATION ET ANALYSE DES SERIES DE DONNEES

4.1. CONTROLE ET VALIDATION DE LA SERIE TEMPORELLE DE HAUTEUR D'EAU

A. COHERENCE EN HAUTEUR

Il est important de reconstituer et recalculer nos différents lots de mesures en prenant une même référence verticale. A partir des métadonnées récoltées lors des investigations menées dans les archives, les informations contextuelles relevées ont été utilisées pour harmoniser en hauteur nos différents lots de données.

Les techniques de nivellement ont existé dès la plus haute antiquité mais les premiers traités de nivellement en langue française datent seulement du 17^{ème} siècle⁴. Il était nécessaire pour les premières cartographies des territoires d'utiliser les mêmes référentiels verticaux. De 1857 à nos jours, trois réseaux de grande ampleur se sont succédés sur le sol de la métropole :

- le réseau de nivellement établi par Paul Adrien Bourdalouë de 1857 à 1864
- le réseau établi par Charles Lallemand à partir des années 1880
- le réseau établi par l'IGN à partir de 1962 (NGF/IGN69).

Les mesures de hauteur d'eau étaient rattachées à un zéro de la mesure, qui lui-même était rattaché autant que possible au nivellement de l'époque (Figure 8).

Les enregistrements de 1878 et 1882 ont été réalisés dans le cadre de campagnes hydrographiques. Plusieurs échelles de marée ont été utilisées⁵ afin de permettre d'enregistrer le signal de marée dans sa globalité (cycles de vive-eau et morte-eau). Ces différentes échelles étaient par la suite rattachées au zéro de réduction des sondes (*i.e.* zéro des cartes marines). Pour rattacher les mesures de l'échelle de marée au zéro des cartes marines, il faut ainsi retrancher 0,716 m aux données brutes (Figure 8).

Lors de la mission hydrographique de 1946, les ingénieurs hydrographes devaient lever la région comprise entre l'île d'Oléron et le continent. Une échelle de marée a été encore une fois placée au Chapus. Les ingénieurs ont adopté comme leurs prédécesseurs en 1878 et 1882 le niveau des plus basses mers pour la réduction des sondes⁶ qui est situé 0,17 m au-dessus du zéro de l'échelle utilisé pour les mesures de la campagne (Figure 8). Pour rattacher les mesures de

⁴ Source : https://geodesie.ign.fr/index.php?page=histoire_du_nivellement

⁵ Campagne Hydrographique 1878 Hanusse - SHD,Rochefort (7JJ1434)

⁶ Annales Hydrographiques 1949 - Shom, Brest

l'échelle de marée au zéro des cartes marines, il faut donc corriger les données brutes de 0,17 m. Lors d'une nouvelle mission en 1948 (mission *Chatel*), quelques mesures ont été réalisées au Chapus en utilisant les mêmes échelles que celles utilisées en 1946⁷.

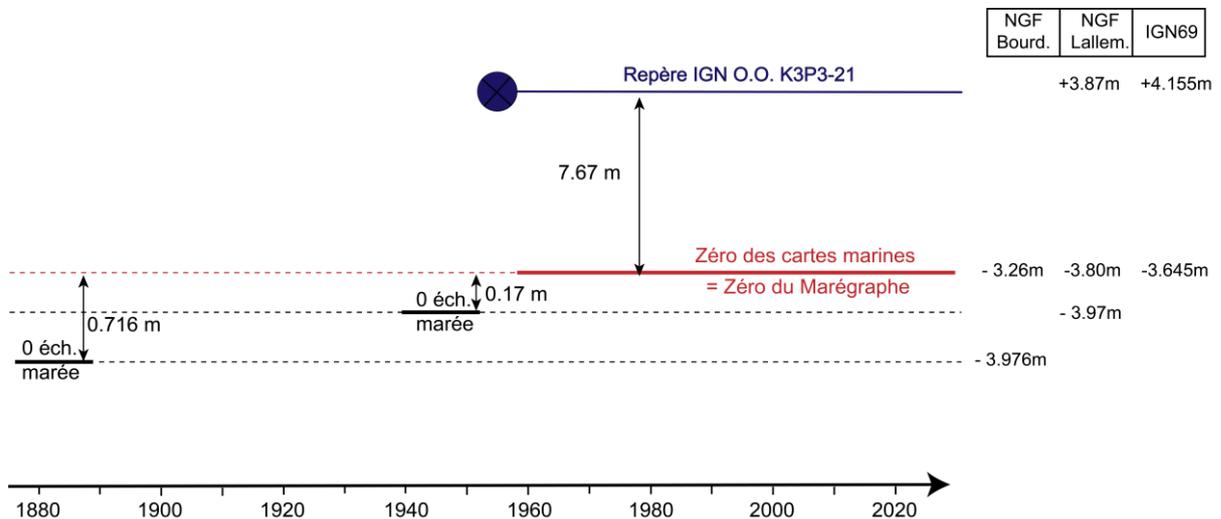


Figure 8 : Schéma synthétisant les relations entre les différentes références verticales utilisées à Bourcefranc-Le-Chapus depuis le 19ème siècle. Les 0 des mesures sont rapportés au Nivellement Général de la France de l'époque : Bourdaloué, Lallemand et IGN69 (Shom, 2020)

En 1972, le zéro du marégraphe installé est 3.80m au-dessous du zéro du nivellement général de la France (NGF Lallemand à cette période-ci) (Figure 8). Sur la fiche descriptive d'observatoire de marée⁸, il est indiqué que le zéro de la mesure correspond au zéro hydrographique.

En 1985, lors d'un levé bathymétrique réalisé par la DDE⁹, les cotes sont de nouveau exprimées par rapport au zéro des cartes marines avec de nombreux rattachements au système géodésique de l'époque et à des repères fixés sur les quais. Entre autres, le repère IGN O.O.K3P3-21 (ancien repère Bourdaloué) est généralement rattaché au zéro de la mesure, ce qui permet de confirmer la stabilité du zéro utilisé au cours du temps.

De 1985 à 2021, les appareils et les sites de mesure ont évolué mais le zéro de la mesure est resté le même.

B. CORRECTIONS TEMPORELLES APPLIQUEES

Les systèmes temporels utilisés pour dater les mesures ont évolué au cours du temps : du Temps Solaire Vrai (TSV) au Temps Solaire Moyen (TSM), GMT puis TU. Les différents systèmes sont présentés dans le Tableau 1. Après avoir identifié l'ensemble des corrections temporelles à effectuer, ces dernières ont été appliquées pour permettre l'homogénéisation en temps des mesures selon le système TU. Les données les plus anciennes (1878, 1882) étaient en TSM, il est

⁷ Annales Hydrographiques 1950 - Shom, Brest

⁸ Ponts et Chaussées - Subdivision Maritime, Rochefort-sur-Mer

⁹ Levé Bathymétrique de 1985 - DDE Charente Maritime (E.86.44.2)

nécessaire d'appliquer une correction en longitude afin de rapporter en TU. Pour les mesures en heures légales, les mesures sont en TU+1, il faut donc retrancher 1h aux enregistrements.

C. NETTOYAGE/CORRECTION DES DONNEES

L'ensemble des informations contenues sur les feuilles de contrôle associées aux marégrammes (Figure 2-D) a été retranscrit. Ces éléments sont complémentaires aux mesures de hauteurs d'eau, ils fournissent des informations contextuelles relatives au contenu des données (exemple : matériel utilisé pour faire les mesures, qualité des mesures, sources des potentielles lacunes de mesures, anomalies dans les mesures, réglages effectués, etc.). De plus, ces documents contiennent régulièrement des mesures d'eau obtenues grâce à la lecture d'une échelle de marée située à proximité du marégraphe et destinée à vérifier la bonne marche de ce dernier. La comparaison de ces valeurs avec les données issues du marégraphe peut permettre de corriger les mesures lorsque nécessaire et/ou de les valider/supprimer (Figure 9).

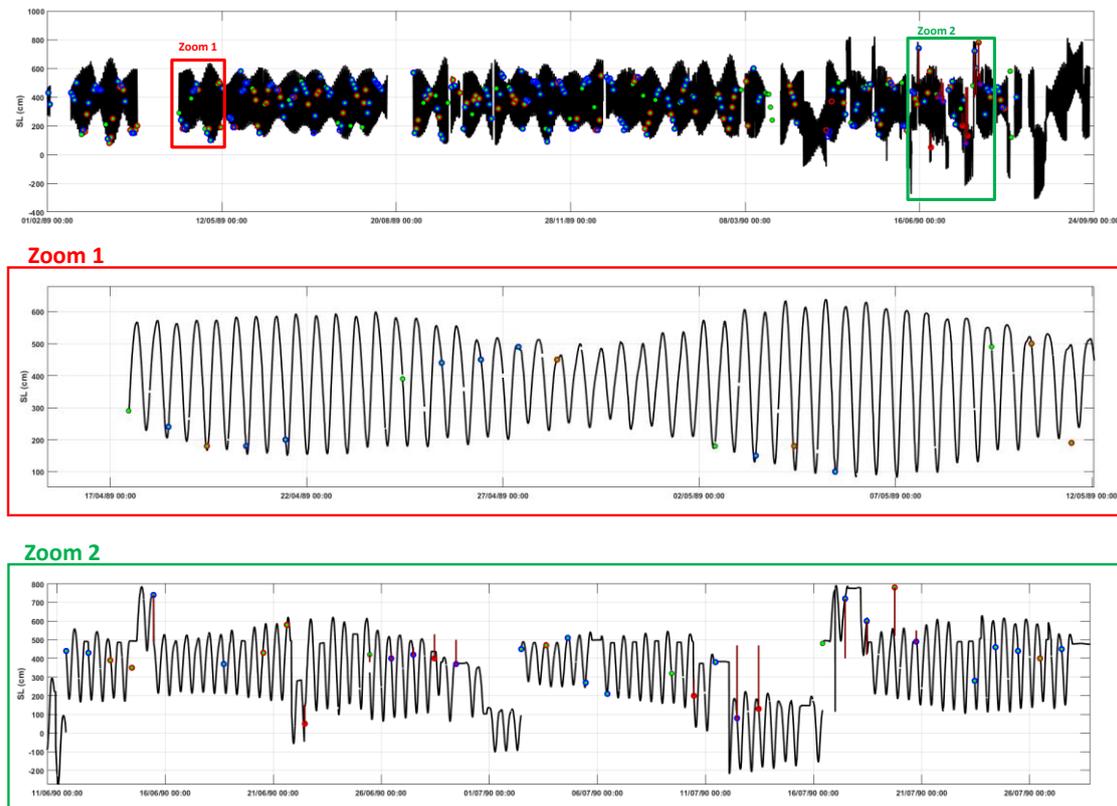


Figure 9: Exemple de l'utilisation de mesures issues des feuilles de contrôle lors du processus de validation de la donnée marégraphique reconstruite.

Les points représentent les mesures de contrôle réalisées ponctuellement grâce à la lecture sur une échelle de marée. Le Zoom 1 est représentatif d'une période avec des mesures de qualité (hauteur marégraphe = hauteur échelle). Le Zoom 2 illustre une période au cours de laquelle de nombreuses anomalies sont observées (blocage du flotteur, ... : hauteur marégraphe ≠ hauteur échelle).

Une fois les premières corrections temporelles et verticales appliquées, la série de donnée est comparée avec les prédictions de marée calculées sur les mêmes périodes. En confrontant

observations et prédictions, il est plus facile d'identifier certaines anomalies (pics dans le signal de marée, sauts verticaux, plateaux).

Les résidus en hauteur des pleines mers et des basses mers permettent également de détecter des éventuelles anomalies verticales. Sur l'ensemble de la série, après corrections, les résidus en hauteur montrent une variabilité relativement importantes (± 1 m) (Figure 10) mais ces valeurs sont cohérentes avec celles obtenues dans le cadre d'autres reconstructions (Ferret, 2016; Gouriou, 2012; Latapy, 2020; Pouvreau, 2008). A noter que les prédictions de marée ne prennent pas en compte les phénomènes météorologiques, ce qui peut expliquer les écarts observés. Les moyennes mensuelles représentées sur la Figure 10 sont majoritairement centrées sur zéro ce qui permet de valider les corrections réalisées et donc la production d'une série de donnée homogène.

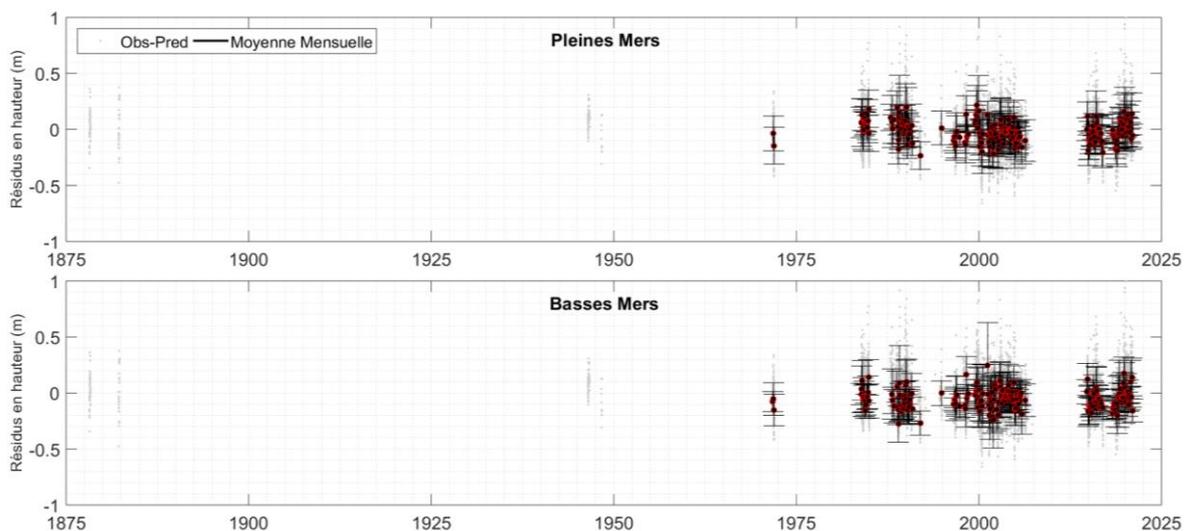


Figure 10: Résidus sur les hauteurs de PM (en haut) et BM (en bas) sur la série de hauteur d'eau de Bourcefranc-Le-Chapus.

Les points en gris correspondent à la différence entre les observations et les prédictions. En noir et rouge, les moyennes mensuelles de ces résidus ont été calculées lorsque le nombre de données disponibles était suffisamment important. N.B. : Les nombreuses lacunes du 19^{ème} siècle et des années 1940 ne permettaient pas de calculer des moyennes de résidus, néanmoins, la majorité des résidus sont localisés autour de 0 ce qui valide les corrections appliquées.

La série temporelle nettoyée issue des divers traitements réalisés accompagne ce rapport (Annexe 1). Les hauteurs d'eau ont été rapportées au **zéro hydrographique** et au **zéro IGN69**. De plus, des «étiquettes» ont été attribuées lors de la phase de correction permettant de qualifier la qualité de la mesure (Tableau 2) et ont été ajoutées à la série temporelle.

Sur l'ensemble de la série de hauteur d'eau, 50% des données sont considérées très satisfaisantes car de bonne qualité (1), 42% ont subi de légères corrections mais sont globalement de bonne qualité (2) contre 5% de probablement mauvaise qualité (3) et 3% de données supprimées (4).

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

Etiquette	Description
1	Bonne qualité
2	Probablement de bonne qualité <i>la donnée a 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 <i>la correction donne un résultat moyen ou est trop importante / l'anomalie est importante sans éléments pour la corriger</i>
4	Mauvaise qualité <i>mesure supprimée</i>

Une part importante des hauteurs d'eau qualifiées de mauvaise qualité concerne les mesures à partir de 1999 pendant lesquelles le marégraphe est à sec lors des marées basses de Vive-Eau. Comme présenté ci-dessus (Section 3.4), cette situation s'aggrave avec le temps, jusqu'à ce qu'en 2007, le marégraphe soit presque à sec lors des basses-mets de Morte-Eau. Sur des périodes plus courtes, le stylet du marégraphe se bloquait ou l'horloge se déréglait entraînant des anomalies de mesures qui étaient facilement identifiable en comparant avec les prédictions. Ces dernières étaient par la suite supprimées. Un exemple de ce travail de qualification de la donnée est présenté en Figure 11.

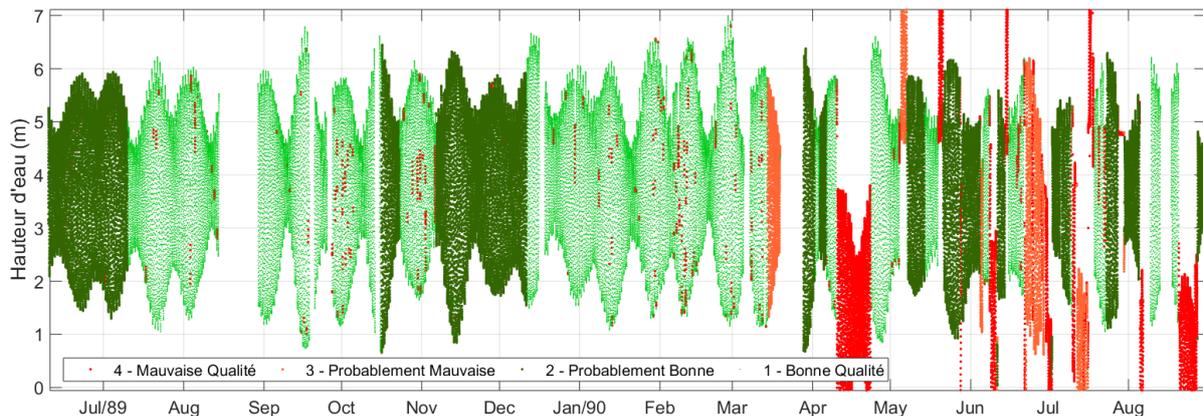


Figure 11: Synthèse du travail de validation des données : attribution d'étiquettes qualité aux données de hauteur d'eau

Nota : Pour plus de lisibilité, un zoom sur la période 1989-1990 est donné à titre d'exemple pour illustrer le travail de contrôle de la série

4.2. EXPLOITATION DE LA SÉRIE TEMPORELLE

A. DETERMINATION DES NIVEAUX MOYENS

Dans le but de suivre l'évolution du niveau marin sur le site étudié, un filtrage sur les données permet de s'affranchir de certaines oscillations hautes-fréquences (Simon, 2007). Afin de moyenniser les hauteurs d'eau à l'échelle d'une journée lunaire, il faut donc utiliser des filtres passe-bas : W25, Doodson, Munk, Godin ou Demerliac. Le calcul des **niveaux moyens journaliers** (NMj) a ici été réalisé en utilisant le filtre de Demerliac (utilisé communément par le Shom). Ce filtre moyenne la hauteur d'eau en prenant les mesures disponibles sur 3 jours (soit 72h) et en les pondérant d'un coefficient (Demerliac, 1973).

Pour calculer les **niveaux moyens mensuels** (NMm), une simple moyenne arithmétique des NMj avec minimum 15 jours complets de disponibles est effectuée.

De la même manière, les **niveaux moyens annuels** (NMa) sont obtenus en moyennant les NMm, pondérés par le nombre de jours pour lesquels des mesures ont été faites (11 NMm minimum par an).

L'ensemble des différents niveaux moyens ont été calculés pour Bourcefranc-Le-Chapus et accompagne ce rapport (Figure 12 & Annexe 1). Comme dit précédemment, le marégraphe servait principalement aux gestionnaires pour les opérations de dragages, et historiquement, les mesures étaient diurnes afin de corriger les sondes lors des campagnes hydrographiques. Ces enregistrements diurnes de la fin du 19^{ème} siècle ne permettent pas de calculer des niveaux moyens (moins de 72h cumulés disponibles) et les problèmes de maintenance de l'appareil sur la fin du 20^{ème} siècle ont ainsi entraîné de nombreuses lacunes dans la série temporelle. Sur certaines périodes les NM mensuels n'ont pas pu être calculés liées à ces lacunes et lorsqu'ils étaient calculés, leurs nombres ne permettaient souvent pas de déduire des niveaux moyens annuels, d'où le faible nombre de NMa représentés sur la Figure 12.

Lorsque l'ensemble de la série temporelle est considérée (1878-2021), la tendance d'évolution du niveau marin obtenue à Bourcefranc-Le-Chapus est de **+1,24 ±0,21 mm/an**. Sur des périodes plus réduites, les tendances fluctuent entre +1,04 ±0,30 mm/an (1974-2021) et +1,39 ±0,28 mm/an (1946-2021). Afin de limiter au maximum les fluctuations dans les tendances d'évolution, il est nécessaire de considérer minimum 30 ans de mesures continues. A partir de plus de 30 ans de mesures, les tendances se stabilisent bien qu'une certaine variabilité interannuelle peut persister.

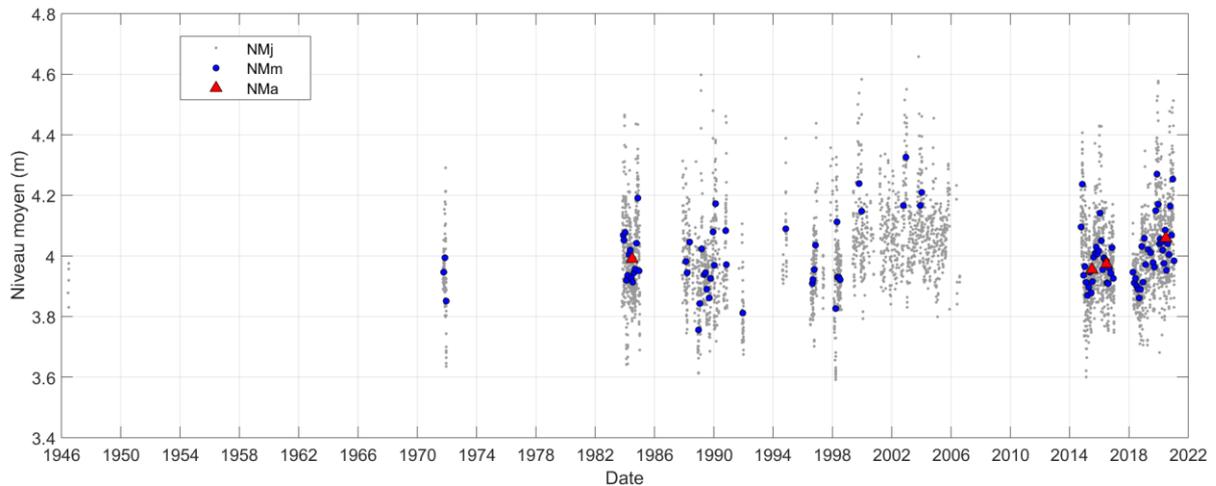


Figure 12 : Niveaux marins moyens à Bourcefranc-Le-Chapus

(Abréviations : NMj : Niveaux Moyens Journaliers ; NMm : Niveaux Moyens Mensuels ; NMa : Niveaux Moyens Annuels)

Les valeurs obtenues pour le 20^{ème} et début 21^{ème} siècle sont cohérentes avec celles observées sur d'autres sites à proximité. A titre d'exemple, pour le Pertuis d'Antioche, Saint-Nazaire et Brest, entre 1860 et 2010, les tendances sont respectivement de $+1,38 \pm 0,07$ mm/an, $+1,03 \pm 0,05$ mm/an et $+1,32 \pm 0,07$ mm/an (Ferret, 2016; Gouriou, 2012; Pouvreau, 2008).

Dans le but de vérifier la cohérence de l'ensemble de ces résultats, les niveaux moyens obtenus pour Bourcefranc-Le-Chapus sont comparés à ceux issus de l'analyse des séries de la Rochelle, de l'île d'Aix et de Port-Bloc stations situées à moins d'une cinquantaine de kilomètres de Bourcefranc-le Chapus sur la façade Atlantique (Figure 13). Visuellement il est déjà possible de noter la bonne corrélation de ces séries qui sont pour la plupart du temps caractérisées par des variations similaires et coïncidentes.

En comparant la série de Bourcefranc-le Chapus avec les trois autres sites à proximité, les coefficients de corrélation obtenus sont statistiquement significatifs pour les trois quarts des données : plus de 78% des indicateurs ont un coefficient supérieur à 0.85 entre Bourcefranc-Le-Chapus et l'île d'Aix contre plus de 86% entre Bourcefranc-Le-Chapus et la Rochelle et 94% entre le Chapus et Port-Bloc. Sur le quart restant, 12%, 5% et 5% des mois présentent une mauvaise corrélation (<0.7) pour l'île d'Aix, la Rochelle et Port-Bloc respectivement.

Pour la Rochelle, série présentant le plus d'enregistrements concordants avec Bourcefranc-Le-Chapus, les périodes de mauvaise corrélation sont centrées :

- sur la fin du 20^{ème} siècle : où le marégraphe était à sec lors des basses mers de Vive-Eau ;

- entre 2016 et 2019 : période où beaucoup d'anomalies ont été identifiées et supprimées dans la phase de traitement¹⁰. A partir des données brutes, SONEL a calculé des niveaux moyens ¹¹qui semblent singuliers sur la période citée précédemment Des dysfonctionnements d'appareils ont pu avoir lieu ce qui a perturbé la mesure.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus tendent à montrer une grande interdépendance entre les séries et permettent encore une fois de confirmer la bonne qualité sur la majeure partie de la série reconstruite de Bourcefranc-Le-Chapus.

¹⁰ Les données de 2014 à 2021 étant déjà numériques ne faisaient pas réellement parties des mesures à corriger et vérifier dans le cadre de ce travail de reconstruction. Elles ont toutefois été ajoutées pour obtenir la série temporelle la plus exhaustive possible.

¹¹ <https://www.sonel.org/?page=maregraphe&idStation=3495>

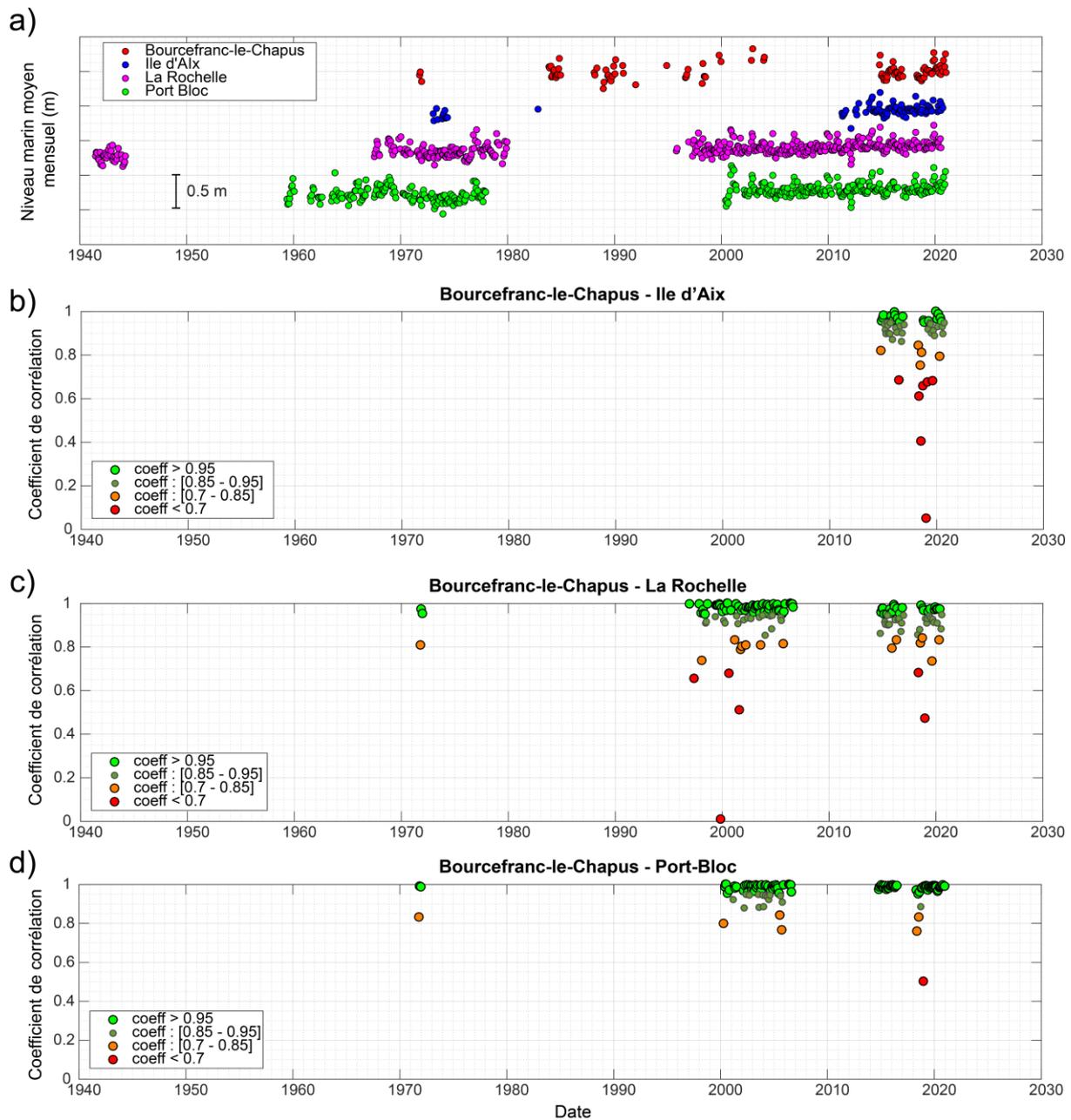


Figure 13 : Evolution des niveaux moyens mensuels de Bourcefranc-le Chapus, de l'île d'Aix et de la Rochelle (Source : SONEL) (a) ; corrélation des niveaux moyens obtenus pour les deux sites témoins : l'île d'Aix (b), la Rochelle (c) et Port-Bloc (d)

N.B. : les séries de niveaux moyens (a) ont été tracées les unes sous les autres avec un écart arbitraire de 50cm pour une meilleure lisibilité

B. CARACTERISATION DES EVENEMENTS EXTREMES

Malgré les disfonctionnement des appareils de mesure, la série temporelle reconstruite de hauteur d'eau de Bourcefranc-Le-Chapus permet l'inventaire et l'étude des occurrences sur les niveaux extrêmes.

L'étude des niveaux extrêmes se fait à travers l'analyse de plusieurs indices. La **surcote / décote instantanée** est la différence, à un instant t , entre la hauteur d'eau observée et la hauteur d'eau prédite. On parle de surcote quand cette différence est positive, décote quand elle est négative. La surcote / décote a principalement une origine météorologique : elle est générée par les variations de pression atmosphérique et par les vents, lors du passage de dépressions ou d'anticyclones. La **surcote de pleine mer** est la différence entre la hauteur de pleine mer observée et la hauteur de pleine mer prédite (marée astronomique), les instants d'occurrence de ces deux niveaux pouvant être décalés dans le temps.

A partir des observations et prédictions de marée obtenues, une base de donnée de surcotes a été calculée et est disponible en annexe de ce rapport (Annexe 1 et 3). Les observations (échantillonnées à 15 min) et les prédictions de marée correspondantes ont été analysées pour extraire les hauteurs et heures de pleines mers. Lorsque les dates et heures des PM étaient « proches » (< 3 h), les pleines mers étaient considérées comme analogues et donc comparables. Les surcotes ont été par la suite déduites de cette base de donnée de pleines mers. Sur l'ensemble de la série, 10 surcotes principales ont été identifiées (Figure 14). L'absence d'évènements extrêmes avant 1971 est probablement liée aux périodes de mesures des enregistrements antérieurs : en effet, les observations de 1878, 1888, 1946 et 1948 ont essentiellement couvert les périodes estivales (printemps-été), moins sujettes aux tempêtes et conditions météorologiques dépressionnaires.

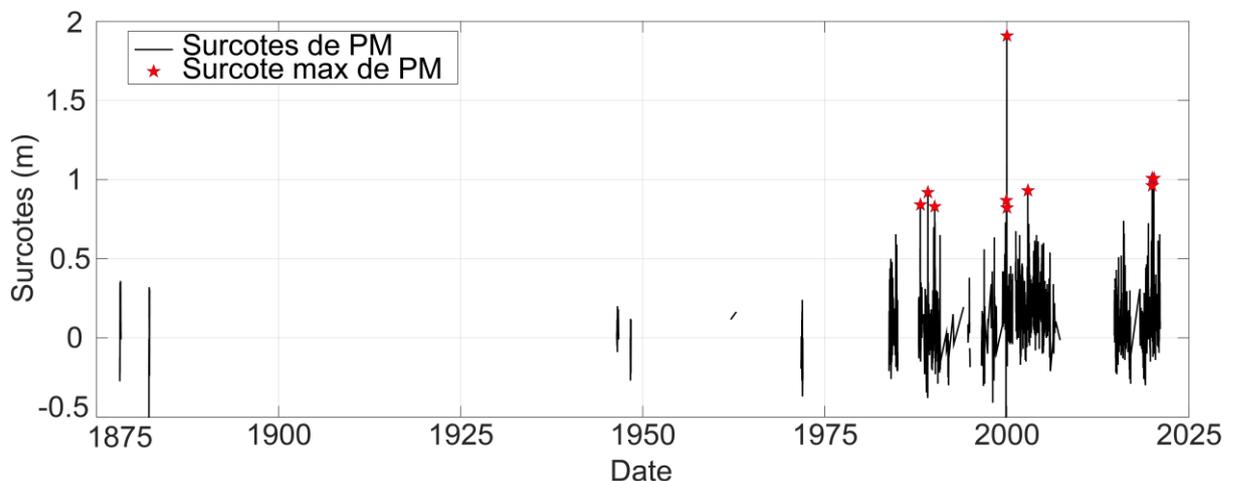


Figure 14 : Surcotes des Pleines Mers à Bourcefranc-Le-Chapus (en noir) et identification de 10 évènements extrêmes principaux (en rouge)

Pour chaque évènement de tempête, les paramètres suivants ont été examinés/calculés :

- date et hauteur de la surcote de PM maximale observée ;
- surcote instantanée maximale observée, date et hauteur d'eau associée ;
- coefficient de marée.

L'ensemble de ces paramètres permet de décrire l'événement et de fournir une carte d'identité de la tempête (Tableau 3). En termes de submersion éventuelle, la hauteur maximale observée est le paramètre caractéristique le plus représentatif. La surcote de pleine mer (PM) associée permet de quantifier la contribution de la météorologie dans le niveau atteint. La surcote maximale instantanée est en revanche plutôt un indicateur de la force ou de l'intensité de la tempête.

Sur les 10 événements identifiés, trois ont occasionné des hauteurs d'eau dépassant le niveau des Plus Hautes Mers Astronomiques (> 6,67 m (Shom, 2020)). Pour ces 3 événements (lignes grisées dans le Tableau 3), les surcotes associées sont notables (> 0,8 m). La surcote instantanée maximale de la tempête Atiyah (13/12/2019) est concomitante avec la surcote de PM tandis que pour les tempêtes Lothar et Martin les pics de surcotes ont lieu avant la pleine mer.

La surcote et la hauteur d'eau les plus importantes ont été enregistrées lors de la tempête Martin en décembre 1999. Cette tempête, tristement célèbre, a touché l'ensemble des côtes françaises, entraînant des surcotes remarquables sur de nombreux sites côtiers. A titre d'exemple, sur deux sites à proximité, à Royan et à Saint Nazaire les surcotes de PM du 27 décembre ont été évaluées à 1,87 m et 0,98 m respectivement (Daubord et al., 2015).

Pour les autres événements, les pics de surcote instantanée sont notables mais la conjonction avec la marée n'est pas toujours favorable à produire des hauteurs d'eau de PM exceptionnelles. En effet, les pics de surcote peuvent être non concomitants avec une pleine mer (Tempête n°2) ou concomitants avec une pleine mer lors des marées moyennes ou de morte-eau (Tempêtes n°1 & 5).

Tableau 3: Tableau de synthèse des 10 événements extrêmes identifiés à Bourcefranc-Le-Chapus

Les lignes grisées correspondent aux événements qui présentent des hauteurs d'eau maximales supérieures à la PHMA (Plus Haute Mer Astronomique)

Id.	Date	Heure PM (TU)	Surcote de PM (m)	Hauteur de PM (m)	Heure pic max (TU)	Surcote instantanée max (m)	Hauteur associée (m)	Coef.
1	11/02/1988	23h21	0,830	5,66	19h45	1,13	5,75	40
2	25/02/1989	18h58	0,850	6,50	23h00	1,27	4,05	73
3	03/02/1990	11h02	0,800	6,04	11h25	1,06	5,93	57
4	12/12/1999	06h36	0,880	6,55	05h45	0,83	6,55	68
Lothar	26/12/1999	07h40	0,810	6,93	06h00	0,83	6,93	94
Martin	27/12/1999	21h14	1,900	7,40	19h00	1,97	7,40	77
5	14/11/2002	01h32	0,930	6,01	22h45 (13/11)	1,14	5,98	41
Atiyah	13/12/2019	04h42	0,930	7,05	04h00	0,91	7,05	86
Fabien	22/12/2019	01h43	0,980	6,63	23h30 (21/12)	1,20	6,63	64
Noberto	05/03/2020	13h42	0,990	6,12	13h00	1,01	6,12	41

Au final, les hauteurs d'eau exceptionnelles (>PHMA) estimées dans cette étude sont peu nombreuses : les plus extrêmes mises en évidence correspondent à des évènements précédemment étudiés (Lothar-Martin) ou à des évènements récents (décembre 2019, Atiyah).

Il est néanmoins important de noter que les évènements identifiés sont dans l'ensemble marqués par des pics de surcote d'intensité notable (> 0,8 m). Ils appartiennent donc bien à la population de tempêtes météorologiques mais pour lesquelles la conjonction avec la marée a rarement été favorable à provoquer des niveaux d'eau extrêmes au niveau des observatoires marégraphiques. Ces évènements marquants et leurs surcotes associées peuvent servir de base pour paramétrer des modélisations hydrodynamiques et proposer des scénarios fictifs plus pénalisants.

A noter également que les résultats sont basés sur l'analyse des hauteurs d'eau mesurées au niveau des observatoires de marée, situés dans des ports. L'impact d'un évènement peut s'avérer plus sévère en dehors des ports, notamment au vu de phénomènes additionnels non pris en compte au niveau des observatoires (e.g. déferlement de la houle).

5. CONCLUSIONS

Dans le cadre du programme d'actions de prévention des inondations de la Seudre, le Shom est chargé d'assurer un suivi des niveaux d'eaux historiques mesurés dans l'estuaire afin d'améliorer la connaissance et la conscience des risques côtiers (Axe 1, Action n°I.M.1 du PAPI). Cette action comprend l'accompagnement du service de prévention des crues lors de la mise en place d'un marégraphe dans l'estuaire, ainsi que la numérisation des données marégraphiques de Bourcefranc-Le-Chapus. Ce rapport s'est uniquement concentré sur ce dernier point.

La première étape de ce projet a consisté à rechercher et inventorier l'ensemble des données et/ou documents en lien avec la mesure marégraphique à Bourcefranc-Le-Chapus (livrable n°1). L'ensemble des données inédites a été numérisé, ce qui correspond à environ **3300 valeurs de hauteurs d'eau horaires** à partir des registres de marée (1878) et plus de **4700 courbes journalières** extraites à partir des marégrammes (livrable n°2). La totalité des mesures de hauteur d'eaux retrouvées a permis de recouvrir une période d'environ **18 ans de mesures** relativement continues du niveau marin. La cohérence et la qualité de la série finale a pu être vérifiée grâce à l'analyse des métadonnées. A l'aide des informations contextuelles concomitantes aux mesures, il a ainsi été possible de rendre la série reconstruite cohérente en temps (TU) et en hauteur (selon le zéro hydrographique) (livrable n°3).

Bien que les mesures de hauteurs d'eau n'étaient pas acquises dans l'objectif d'étudier la marée, la série temporelle rigoureusement reconstruite a été comparée à des séries de stations à proximité et a révélé dans l'ensemble une bonne cohérence. Des niveaux moyens (journaliers, mensuels et annuels) ont été calculés. Les nombreuses lacunes de la série marégraphique n'ont pas toujours permis de calculer les niveaux moyens mensuels ou annuels, néanmoins, les tendances sont majoritairement à la hausse avec une élévation moyenne de **+1,24 ± 0,21 mm/an** sur la période 1878-2021.

De plus, il a été possible d'extraire de la série temporelle une **dizaine d'évènements extrêmes principaux** (avec des surcotes supérieures à 0,8 m). Il est apparu que lors de la tempête Martin en décembre 1999, la surcote la plus importante a été enregistrée (1,91 m). Parmi cette base de données inédite, aucun évènement exceptionnel n'a été identifié avant les années 1950. Ceci est essentiellement dû au fait que les mesures marégraphiques à la fin du 19^{ème} et la première moitié du 20^{ème} siècle se sont déroulées au printemps et en été. Des enregistrements continus ont été mis en place dès 1971, toutefois, les tempêtes majeures identifiées sur cette série datent d'après 1988 suggérant ici des évènements plus intenses à la fin du 20^{ème} siècle.

Dans l'ensemble, le travail réalisé a permis d'obtenir une série temporelle la plus qualitative possible. Il a été possible d'extraire de cette dernière de nouveaux paramètres permettant d'améliorer la connaissance et la conscience du risque côtier ; particulièrement en ce qui concerne les évènements extrêmes et les phénomènes de submersion marine pouvant être associés.

6. REFERENCES

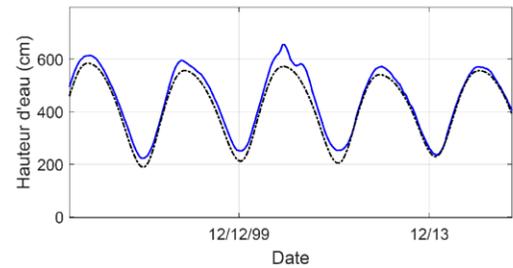
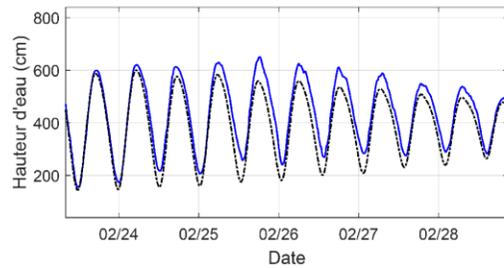
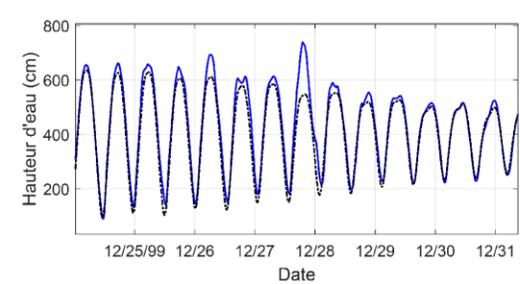
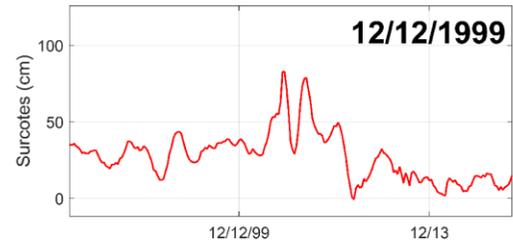
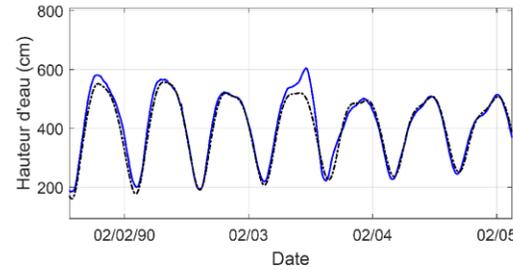
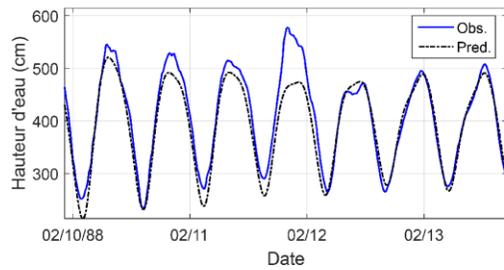
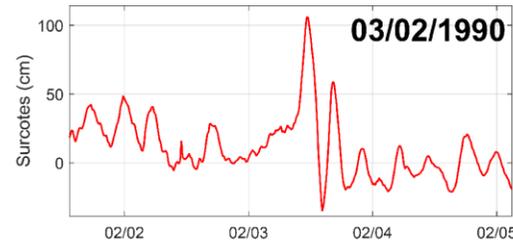
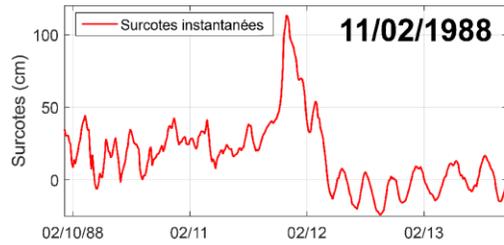
- Daubord, C., André, G., Goirand, V., Kerneis, M., 2015. Rapport technique final NIVEXT : NIVEaux marins EXTrêmes. Shom.
- Demerliac, A., 1973. Le niveau moyen de la mer, calcul du niveau journalier. Shom.
- Ferret, Y., 2016. Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire (No. 27 SHOM/DOPS/HOM/MAC/NP). Shom.
- 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 (PhD thesis). La Rochelle.
- Latapy, A., 2020. Influence des modifications morphologiques de l'avant-côte sur l'hydrodynamisme et l'évolution du littoral des Hauts-de-France depuis le XIXe siècle (These de doctorat). Littoral.
- 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.
- Shom, 2020. Références altimétriques maritimes 2020 (RAM).
- Simon, B., 2007. La marée océanique côtière, Institut Oceanographique. ed, Synthèses.

7. LISTE DES ANNEXES

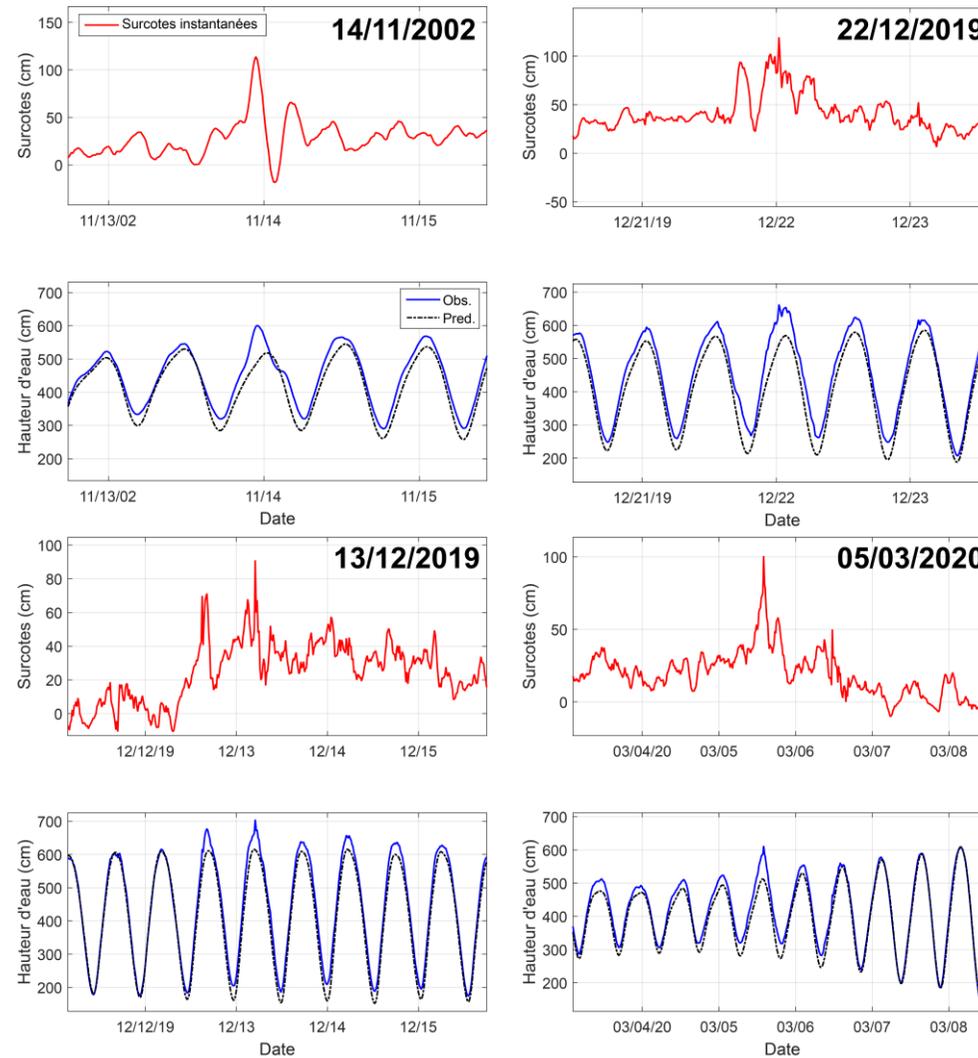
ANNEXE 1 : Evènements extrêmes identifiés à partir de la série temporelle du niveau de la mer à Bourcefranc-Le-Chapus reconstruite dans le cadre du livrable 3 de l'action n°I.M.1 de l'Axe 1 du PAPI SEUDRE

ANNEXE 2 : Liste des fichiers ascii fournis dans le cadre du livrable 3 de l'action n°I.M.1 de l'Axe 1 du PAPI SEUDRE

ANNEXE 1 : Evènements extrêmes identifiés à partir de la série temporelle du niveau de la mer à Bourcefranc-Le-Chapus reconstruite dans le cadre du livrable 3 de l'action n°I.M.1 de l'Axe 1 du PAPI SEUDRE



ANNEXE 1 : Evènements extrêmes identifiés à partir de la série temporelle du niveau de la mer à Bourcefranc-Le-Chapus reconstruite dans le cadre du livrable 3 de l'action n°I.M.1 de l'Axe 1 du PAPI SEUDRE



Annexe 1 : 10 évènements extrêmes identifiés dans cette étude : en rouge les surcotes instantanées, en bleu les hauteurs d'eau observés et en noir celles prédites

ANNEXE 2 : Liste des fichiers ascii fournis dans le cadre du livrable 3 de l'action n°I.M.1 de l'Axe 1 du PAPI SEUDRE

Liste des fichiers ascii issus du processus de validation et de traitement de la série marégraphique de Bourcefranc-Le-Chapus :

Serie_temporelle_CHAPUS_1878-2021.txt

Fusion de l'ensemble des données de hauteurs d'eau validées enregistrée à Bourcefranc-Le-Chapus depuis le 19^{ème} siècle. Les hauteurs d'eau sont données avec un pas de temps de 15 min en fonction du zéro hydrographique (ZH) (colonne 2) et en fonction du zéro IGN69 (colonne 3). En colonne 4, des étiquettes permettant de qualifier la qualité de la donnée ont été attribuées (1 : bonne qualité ; 2 : probablement bonne qualité ; 3 : probablement mauvaise qualité ; 4 : mauvaise qualité).

NMj_LE_CHAPUS.txt

NMmens_LE_CHAPUS.txt

NMa_LE_CHAPUS.txt

Séries temporelles des niveaux moyens journaliers (NMj), mensuels (NMmens) et annuels (NMa) calculés à partir de la série marégraphique validée de Bourcefranc-Le-Chapus.

10surcotes_LE_CHAPUS_1878-2021.txt

Liste des 10 évènements extrêmes identifiés à partir de la série marégraphique validée de Bourcefranc-Le-Chapus. Pour chaque évènement, la hauteur maximale observée est indiquée, ainsi que les paramètres associés : date, surcote de PM associée, surcote instantanée associée.