

PAPI Saint Malo

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

Action 1. II « Numérisation des données du marégraphe de Saint-Malo »

Livrable n°3 : Fourniture de la série reconstruite des hauteurs d'eau à Saint-Malo après le contrôle, la validation et la mise en cohérence des données numériques



Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
Inge van den Beld et Romain Kermoal Technicien(ne) en charge la construction marégraphique de Saint-Malo	Alexa Latapy Responsable de l'activité reconstruction marégraphique Nicolas Pouvreau Expert niveau de la mer Héloïse Michaud Cheffe de projet PAPI St-Malo Christophe Vrignaud Chargé de développement	Claire Fraboul Cheffe du département Marée Courants

Table des matières

1. PRÉAMBULE.....	3
2. SYNTHÈSE DE LA NUMÉRISATION DES DONNÉES MARÉGRAPHIQUES (JALONS 1 ET 2).....	4
2.1. Archives	4
2.2. Documents et numérisation.....	4
2.3. Période de temps et lieux des mesures.....	4
2.4. Digitalisation/vectorisation des hauteurs d'eau	5
2.5. Série temporelle brute	6
3. NETTOYAGE/CORRECTION DES DONNÉES MARÉGRAPHIQUES DE SAINT-MALO	7
3.1. Le suivi du zéro hydrographique / zéro du marégraphe ou de l'échelle.....	7
3.1.1. Chronologie des références verticales	7
3.1.2. Homogénéisation verticale des hauteurs d'eau digitalisées	8
3.2. Les systèmes de temps utilisés.....	10
3.2.1. Chronologie des systèmes de temps	10
3.2.2. Homogénéisation en temps des hauteurs d'eau digitalisées.....	10
3.2.2.1. Conversion TSV en TSM : Équation du temps.....	10
3.2.2.2. Conversion TSM en TU : Correction en longitude	10
3.2.2.3. Conversion temps légal en TU	11
3.2.2.4. Corrections temporelles dues à des erreurs de mesures	11
3.3. Anomalies observées	11
3.3.1. Général.....	11
3.3.2. Le phénomène d'envasement	12
3.3.3. Anomalies secondaires	14
3.4. Qualité des mesures selon les métadonnées	15
3.4.1. La qualité des mesures liée à l'endroit de mesures, à la méthodologie ou aux observateurs	15
3.4.2. Influence du barrage de la Rance sur la marée de Saint-Malo	16
3.5. Etiquettes de qualité.....	19
4. LES MESURES MÉTÉOROLOGIQUES À SAINT-MALO	20
4.1. Les mesures à Saint-Malo	20
4.2. La numérisation de la pression atmosphérique.....	21
4.3. Le baromètre inverse	22
5. VALIDATION DES DONNÉES HISTORIQUES DE SAINT-MALO	23
5.1. Une série composée de deux sites de mesures	23

5.2.	Étude de résidus	24
5.2.1.	Les résidus en hauteur	24
5.2.2.	Les résidus en temps	26
5.3.	La série marégraphique historique finale et son utilisation	27
6.	EXPLOITATION / ANALYSE DE LA SÉRIE MARÉGRAPHIQUE RECONSTRuite DE SAINT-MALO	29
6.1.	Évolutions des caractéristiques des marées à Saint-Malo	29
6.1.1.	Évolution du niveau moyen des mers	29
6.1.2.	Évolution des composantes harmoniques.....	32
6.2.	Étude du marnage	33
6.3.	Les surcotes et les évènements extrêmes à Saint-Malo.....	36
7.	CONCLUSION	41
8.	RÉFÉRENCES.....	43
	ANNEXE I	45
	ANNEXE II	48
1.1.	Le zéro à Saint-Servan.....	48
1.2.	Le zéro à Saint-Malo	50
	ANNEXE III	51
	ANNEXE IV.....	58
	ANNEXE V	79

1. PRÉAMBULE

Dans le cadre du programme d'actions de prévention des inondations (PAPI) de Saint-Malo, le Shom est notamment chargé de numériser les données marégraphiques analogiques du marégraphe de Saint-Malo afin d'améliorer la connaissance du risque lié aux phénomènes de submersion marine (Axe 1, Action 1.II). Cette action a pour objectif la reconstitution de la série marégraphique historique de Saint-Malo : il s'agit de rechercher, collecter, numériser et valider les différents marégrammes analogiques disponibles depuis le 19^{ème} siècle dans les archives de différents établissements, afin d'aboutir à une série temporelle de hauteurs d'eau historique fiable.

Ce travail a permis de pérenniser et de sauvegarder ce patrimoine scientifique unique non considéré jusqu'à nos jours. Associées aux observations modernes, ces mesures historiques de hauteurs d'eau permettent d'avoir accès à l'évolution pluri-décennale à séculaire du niveau de la mer. L'identification et la prise en compte des surcotes historiques devrait également permettre d'améliorer les statistiques sur la tendance des niveaux marins extrêmes pour la zone d'intérêt.

L'une des originalités de cette étude repose sur l'utilisation des données issues de 2 observatoires marégraphiques pluri-décennales. Le plus ancien est déployé à **Saint-Servan** depuis 1850 au prolongement de la Pointe Bécard à proximité de la Tour Solidor à l'intérieur de la rade de Dinard tandis que le second se trouve en aval au terminal de Naye à **Saint-Malo**. Par la suite, lorsqu'il sera fait mention de Saint-Servan, il s'agira des mesures produites uniquement pour ce site. La mention de Saint-Malo comprendra à la fois les mesures réalisées à Saint-Malo ou l'ensemble de la série composite Saint-Malo/Saint-Servan.

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

- La recherche des documents en lien avec les mesures de hauteurs d'eau ;
- La numérisation de ces dernières ;
- La digitalisation des données de hauteurs d'eau ;
- La validation et la qualification des données nouvellement digitalisées.

L'ensemble de ces différentes étapes ont été effectué successivement par Romain Kermoal et Inge van den Beld. Ce travail a été réalisé sous la supervision d'Alexa Latapy, responsable de l'activité « reconstruction marégraphique historique », ainsi que par Nicolas Pouvreau (expert niveau de la mer).

Ce rapport correspond au **livrable 3 de l'action n°1.II de l'étude n°1** dont la finalité est de fournir l'ensemble de la série reconstruite des hauteurs d'eau à Saint-Malo contrôlée et validée. Ce rapport détaille la mise en cohérence et la validation de la série brute (cf. section 3) pour aboutir à la série finale validée (cf. section 5), ainsi que l'exploitation et l'analyse de la série validée (cf. section 6).

2. SYNTHÈSE DE LA NUMÉRISATION DES DONNÉES MARÉGRAPHIQUES (JALONS 1 ET 2)

2.1. ARCHIVES

Plusieurs documents en lien avec les mesures de hauteurs d'eau prises à Saint-Servan et/ou Saint-Malo ont été identifiés dans différents centres d'archivage et exploités :

- Archives départementales d'Ille-et-Vilaine (AD35) ;
- Archives municipales de Saint-Malo ;
- Archives du Shom ;
- Archives des Services Historiques de la Défense (SHD) de Rochefort et Vincennes ;
- Archives d'IGN à Saint-Mandé ;
- Archives de l'usine marémotrice d'EDF ;
- Archives Nationales (AN).

Un inventaire avec les mesures de hauteurs d'eau retrouvées pour cette étude est disponible en ANNEXE I.

2.2. DOCUMENTS ET NUMERISATION

Les documents trouvés aux centres d'archives se présentent sous trois formes : (i) des registres de marée, (ii) des marégrammes, et (iii) des métadonnées (des documents tels que des lettres de correspondance, des rapports, des photos et des plans/dessins contenant des informations sur l'observatoire, sur le zéro de la mesure, le système de temps utilisé, etc.). Tous les documents identifiés au cours de ce travail d'inventaire ont été scannés ou photographiés afin de conserver une version numérique du document, dans le but de l'archiver ainsi que pour faciliter la digitalisation des données.

Au total, **14 000 registres de marée et 2 000 marégrammes** ont été numérisés soient environ **300 Go d'images numériques traitées** dans le cadre de cette étude. Par ailleurs, plus de **160 documents qualifiés de métadonnées** ont été identifiés. L'ensemble a été transmis dans le livrable 2.

2.3. PERIODE DE TEMPS ET LIEUX DES MESURES

La série de **Saint-Servan/Saint-Malo** couvre une grande période de temps. Les premières mesures de hauteurs d'eau datent de **1734-1735**, mais sont très ponctuelles. Dans l'ensemble, la série couvre **une période d'environ 180 ans, de 1835 jusqu'à aujourd'hui** avec environ **125 ans de mesures continues de niveau marin numérisées** contenant parfois des lacunes.

Au fil du temps, les mesures ont été effectuées à plusieurs endroits et par différents organismes. Les toutes premières mesures sont relevées au fort de la Conchée, au large de Saint-Malo. Par la suite, les observations étaient effectuées à l'aide d'une échelle de marée à Saint-Servan (endroit précis inconnu) par le Bureau des Longitudes. En 1850, sous la direction de l'ingénieur hydrographe Chazallon responsable du service des marées au Dépôt des Cartes et Plans de la Marine (ancêtre du Shom), un marégraphe est installé à Saint-Servan. L'observatoire fonctionnera jusqu'en 1917. L'appareil est installé dans une tour octogonale construite spécialement pour cet usage et **proche de la Tour Solidor à Saint-Servan**. Le même observatoire est réarmé dans les années 1950 avec l'installation d'un nouveau marégraphe à flotteur, modernisé depuis par un capteur radar moderne. Depuis 2003, un marégraphe

numérique radar est déployé sur **le port de Saint-Malo**, au terminal de Naye. Ce marégraphe appartient au réseau RONIM¹ géré par le Shom. En parallèle, des relevés de pleines mers sont effectués à la capitainerie de Saint-Malo entre 1946 et 1997 sur une échelle de marée positionnée dans l'écluse.

Cette reconstruction marégraphique est une série composite car les observations du niveau de la mer ont été effectuées sur deux sites de mesures : Saint-Servan et Saint-Malo, deux sites distants à vol d'oiseau d'environ 800 mètres (Figure 1). Une étude réalisée par Bernard Simon (1986) ainsi qu'une comparaison entre les mesures prises à Saint-Servan et à Saint-Malo dans les années 1990 ont révélé peu d'écarts dans les observations et donc sur la cohérence de la série (voir section 5.1).



Figure 1: Localisation des marégraphes de Saint-Malo et de Saint-Servan. (Photographie aérienne géoportail, 2019). Le marégraphe utilisé par EDF se trouve à l'intérieur de la tour hexagonale dans l'anse de Solidor à Saint-Servan et le marégraphe du Shom est situé au terminal du Naye à Saint-Malo

Le tableau en ANNEXE I montre les données inclues dans ce projet avec les périodes de mesure ainsi que le type de document.

2.4. DIGITALISATION/VECTORISATION DES HAUTEURS D'EAU

Après avoir numérisé les documents originaux, il est nécessaire d'extraire le signal de marée. Les données sont disponibles soit sous forme de tableur (registre de marée) soit sous forme de courbes (marégramme). Deux procédures de vectorisations sont donc nécessaires pour extraire le signal de marée. :

- Dû à l'état de conservation des registres et à l'écriture des observateurs de marée plus ou moins lisible, une numérisation « automatique » à l'aide d'un logiciel de reconnaissance de caractères n'est pas possible. Les observations conservées dans

¹ Réseau d'Observation du Niveau de la Mer opéré et maintenu par le Shom.

les **registres de marée** sont donc saisis manuellement dans un tableur numérique. Les hauteurs d'eau étaient initialement relevées toutes les 15 minutes, néanmoins il a été décidé de ne numériser que les données horaires : c'est un compromis entre le nombre des hauteurs d'eau nécessaire à l'exploitation de la série et le temps disponible pour la vectorisation des hauteurs d'eau. Les hauteurs d'eau inédites subissent par la suite une première phase de contrôle pour vérifier la qualité de la donnée.

- Les marégraphes mécaniques permettent de retranscrire le signal de marée sous forme de courbes sur les **marégrammes**. Les marégrammes sont vectorisés à l'aide du logiciel NUNIEAU² (Numérisation des Niveaux d'EAU). Ce logiciel traite les images afin d'extraire le signal analogique étudié en se basant sur un algorithme de reconnaissance des couleurs. Les données sont extraites à un pas de temps de 5 minutes et ont également subi une première phase de contrôle.

Au total, **527 000 hauteurs ont été saisies** depuis les registres et **715 000 mesures ont été vectorisées** à partir des marégrammes soit plus de **1,2 million de valeurs** inédites ont été numérisées durant la reconstruction de cette série Saint-Servan/Saint-Malo.

2.5. SERIE TEMPORELLE BRUTE

L'étendue de cette série inédite est présentée en Figure 2. Il s'agit de la **série temporelle brute** correspondant à l'image exacte des registres/marégrammes papiers après numérisation mais sans correction ni validation des données).

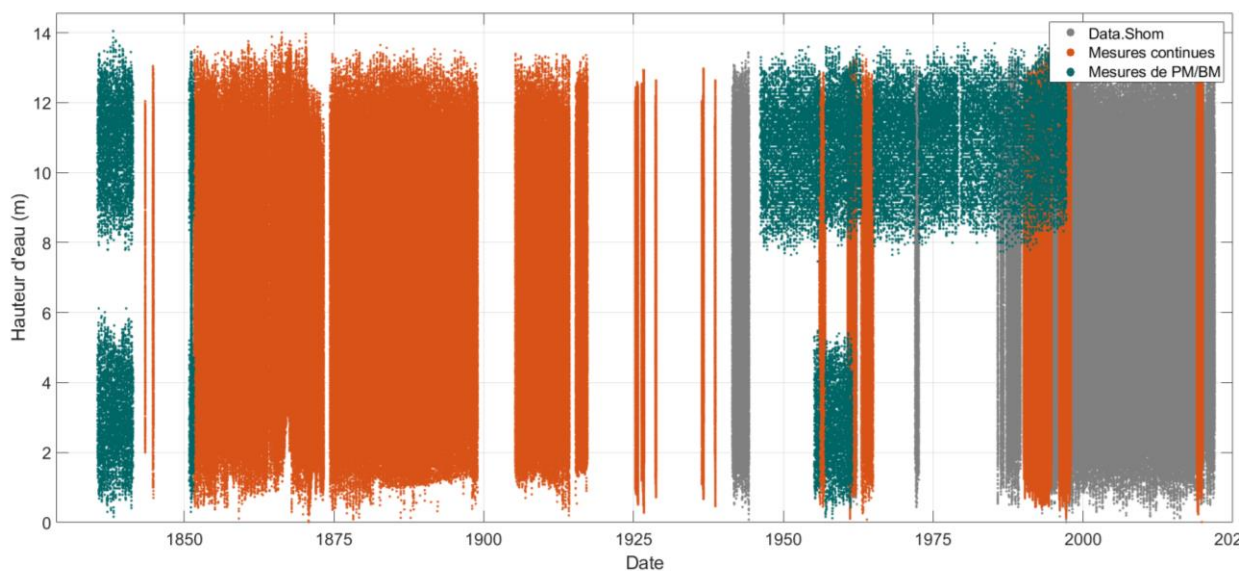


Figure 2 : Série temporelle marégraphique composite de Saint-Servan et Saint-Malo.

Orange : mesures de hauteurs d'eau continues (horaires ou 5 min) nouvellement numérisées ; Turquoise : mesures de pleines mers et basses mers nouvellement numérisées ; Gris : données déjà disponibles sur data.shom.fr. Nota : les mesures de 18^{ème} siècle ne sont pas représentées ici pour plus de lisibilité.

² <https://www.cerema.fr/fr/actualites/logiciel-numerisation-enregistrements-graphiques-niveaux-eau>

3. NETTOYAGE/CORRECTION DES DONNÉES MARÉGRAPHIQUES DE SAINT-MALO

Une des étapes importantes de la reconstruction d'une série marégraphique consiste à nettoyer, harmoniser et corriger les données nouvellement numérisées. Cette étape inclut l'homogénéisation verticale (calage au même zéro hydrographique ; cf. section 3.1) et temporelle (cf. section 3.2), ainsi que la correction (ou suppression) des anomalies observées (cf. section 3.3) et l'attribution des étiquettes qualité (cf. section 3.5).

3.1. LE SUIVI DU ZÉRO HYDROGRAPHIQUE / ZÉRO DU MAREGRAPHE OU DE L'ECHELLE

3.1.1. Chronologie des références verticales

Deux des systèmes de référence verticale français sont utilisés ici suivant que l'on s'intéresse aux profondeurs en zone maritime ou aux altitudes en zone terrestre.

Le zéro hydrographique (ZH), ou 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 ZH correspond approximativement au 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 recalculer les données sur une même référence.

Les techniques de nivellement terrestre sont très anciennes, en France, la première mention de nivellement date du 17^e siècle³. Depuis 1857, trois grands réseaux de nivellement se sont succédés en France :

- Le réseau de Nivellement Général de la France établi par Paul Adrien Bourdalouë de 1857 à 1864 (NGF Bourdalouë) ;
- 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 encore utilisé actuellement.

Connaître précisément le plan horizontal de référence utilisé lors de l'acquisition des mesures historiques de hauteurs d'eau est essentiel afin de **pouvoir rapporter toutes les mesures au même zéro, et ainsi construire une série cohérente dans le temps** (Ferret, 2016). Ce travail réalisé à partir de nombreux documents d'archives (notes des observateurs des marées,

³ IGN, 2012. https://geodesie.ign.fr/index.php?page=histoire_du_nivellement. Consultation : 16 février 2021.

rapports d'ingénieurs...), s'est révélé être assez complexe car il implique la considération de nombreuses informations parfois incohérentes. Il est nécessaire, autant que possible, d'avoir le plus de sources afin de les recouper entre-elles pour dresser l'historique le plus exact afin de suivre l'évolution du ZH. Avec les documents contextuels retrouvés, il est possible de suivre le zéro du marégraphe de Saint-Servan au cours du temps (cf. Figure 3 ; ANNEXE II). Le suivi du zéro hydrographique à Saint-Malo est plus difficile, car il y a peu d'informations disponible (cf. ANNEXE II).

3.1.2. Homogénéisation verticale des hauteurs d'eau digitalisées

Grâce à l'analyse documentaire de l'observatoire des marées de Saint-Servan et Saint-Malo, il a été possible de suivre l'évolution, à Saint-Servan, du zéro de l'échelle de marée jusqu'en 1849 et du marégraphe de 1850 à aujourd'hui, et à Saint-Malo du zéro de l'échelle de la Capitainerie et du marégraphe du Shom.

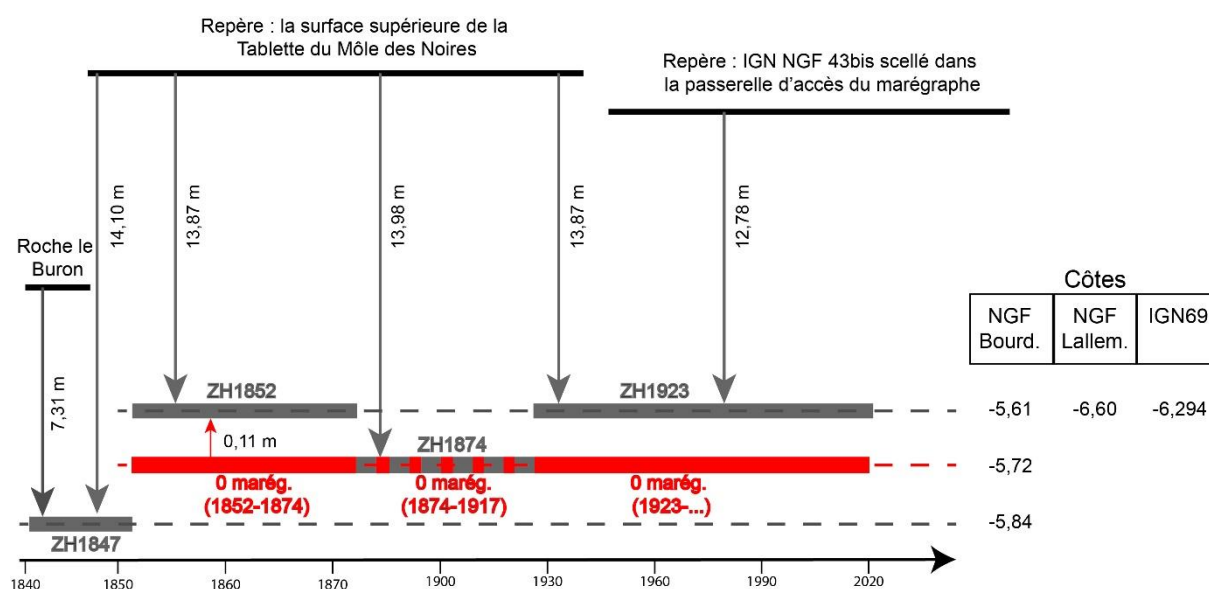


Figure 3 : L'historique de la référence du zéro hydrographique et du zéro instrumental (0 marég.) ayant servi pour les mesures de marée à Saint-Servan.

A Saint-Servan, trois zéros hydrographiques sont considérés : (i) le ZH de 1847 au 1851 (ZH1847), (ii) le ZH à partir de 1852, confirmé par l'ingénieur hydrographe Courtier en 1923 (ZH1923) valable entre 1852-1873 et 1923 jusqu'à aujourd'hui, et (iii) le ZH du Pont et Chaussées valable entre 1874 et 1923. Pour plus d'informations sur le zéro instrumental, le ZH et les rattachements verticaux à Saint-Servan, se référer à ANNEXE II.

Le ZH entre 1835 et 1845 est inconnu, donc une correction n'est pas possible. Les hauteurs d'eau de 1850 et 1851 sont corrigées de +0,23 m, car le ZH de 1847 était 23 cm plus bas que celui de 1852 (Tableau 1 ; cf. ANNEXE II). Sur la période 1874-1917, les documents contextuels retrouvés nous amènent à considérer que le zéro de la mesure correspondait bien au zéro hydrographique. Aucune correction verticale n'a donc été réalisée sur cette période. Par la suite, le marégraphe a été repris par les Ponts et Chaussées, une correction de 0,11 m est appliquée

pour les données de 1925 à 1938, car le zéro du marégraphe ($0_{\text{marég}}$) était 11 cm au-dessous du ZH1923 (Tableau 1). Les hauteurs d'eau déjà présentes en format numérique au Shom (1941-1944, 1972 et 1985-1989) ainsi que les hauteurs d'eau mesurées par EDF (1955 jusqu'à aujourd'hui) sont déjà rapportées au ZH1923 (Tableau 1).

Les mesures actuelles réalisées au port de Saint-Malo (Shom) sont exprimées par rapport au ZH. Celles des PM prises par la Capitainerie sont rapportées au zéro de la DDE et une correction de - 0,20 m est fait pour les recalcr au ZH1923 (Tableau 1). Pour plus d'informations sur le zéro instrumental, le ZH et les rattachements verticaux à Saint-Malo, se référer à ANNEXE II.

Date début	Date fin	Site	Correction verticale (m)	Commentaires
01/11/1734	31/10/1735	Saint-Servan	-	ZH inconnu
15/07/1835	30/11/1844	Saint-Servan	-	ZH inconnu
04/11/1850	31/12/1851	Saint-Servan	+ 0,23	ZH1847 → ZH1923
01/01/1852	31/12/1873	Saint-Servan	+ 0,11	$0_{\text{marég}}$ → ZH1923
01/01/1874	30/07/1887	Saint-Servan	0	$0_{\text{marég}}$ = ZH1874
31/07/1887	01/05/1917	Saint-Servan	0	$0_{\text{marég}}$ = ZH1874
20/04/1925	07/10/1925	Saint-Servan	+ 0,11	$0_{\text{marég}}$ → ZH1923
03/05/1926	11/10/1926	Saint-Servan	+ 0,11	$0_{\text{marég}}$ → ZH1923
27/08/1928	13/10/1928	Saint-Servan	+ 0,11	$0_{\text{marég}}$ → ZH1923
22/05/1936	23/09/1936	Saint-Servan	+ 0,11	$0_{\text{marég}}$ → ZH1923
01/08/1938	01/09/1938	Saint-Servan	+ 0,11	$0_{\text{marég}}$ → ZH1923
22/06/1941	20/04/1944	Saint-Servan	0	Données déjà rapportées au ZH1923
17/02/1955	31/12/1964	Saint-Servan	0	Données déjà rapportées au ZH1923
02/01/1972	15/08/1972	Saint-Servan	0	Données déjà rapportées au ZH1923
01/10/1985	07/08/1989	Saint-Servan	0	Données déjà rapportées au ZH1923
30/10/1990	30/12/1997	Saint-Servan	0	Données déjà rapportées au ZH1923
07/02/1946	31/03/1997	Saint-Malo	- 0,2	0_{DDE} → ZH1923
01/01/1998	31/12/2021	Saint-Malo	0	Données déjà rapportées au ZH1923

Tableau 1 : Détails des corrections verticales appliquées pour rapporter les mesures des hauteurs d'eau au Zéro Hydrographique (ZH) actuel de Saint-Servan et Saint-Malo. ZH1847 = zéro hydrographique de 1847 au 1851 ; ZH1874 = zéro hydrographique du Pont et Chaussées de 1874 au 1917 ; ZH1923 = zéro hydrographique de Courtier de 1923 à l'aujourd'hui (= ZH de Chazallon en 1852 de 1852-1873) ; $0_{\text{marég}}$ = zéro du marégraphe de Saint-Servan ; 0_{DDE} = zéro de l'échelle de Saint-Malo selon le DDE.

Le jeu de données final est rapporté au ZH le plus récent défini par Courtier en 1923 et correspondant au ZH actuel pour Saint-Servan et Saint-Malo.

3.2. LES SYSTEMES DE TEMPS UTILISES

3.2.1. Chronologie des systèmes de temps

Comme le zéro hydrographique, le système de temps a évolué au cours de l'histoire : du Temps Solaire Vraie (TSV) au Temps Solaire Moyen (TSM) au Temps Universel (TU) ou GMT/UTC.

Le TSV est une mesure du temps basée sur le déplacement apparent du soleil au cours de la journée pour un endroit donné (angle horaire du Soleil), ce qui correspond donc aux heures que donnerait un cadran solaire. Les premières mesures en 1734-1735 et également sur une grande partie du 19^{ème} siècle étaient réalisées en TSV.

À partir de 1894, le TSM a été introduit comme système de temps officiel. Le TSM est une mesure du temps basée sur un soleil moyen fictif qui se déplacerait sur l'équateur à vitesse constante (1 jour = 24h) tout au long de l'année. De 1894 jusqu'à 1917, les mesures étaient réalisées en TSM.

Les mesures à partir de 1925 jusqu'à 1997 sont prises en heure locale : (i) TU+1 de 1925 à 1975, et (ii) en heures d'hiver (TU+1) et d'été (TU+2) dès 1976. Les données mesurées par le marégraphe radar du Shom sont en TU (= UTC).

3.2.2. Homogénéisation en temps des hauteurs d'eau digitalisées

Dans le but d'assurer une continuité temporelle, il est nécessaire de connaître le système de temps dans lequel les mesures de hauteur d'eau sont effectuées. **Il est décidé de rapporter toutes les mesures en TU.** Plusieurs conversions sont donc appliquées sur les jeux de données bruts.

3.2.2.1. Conversion TSV en TSM : Équation du temps

Lorsque les données sont en TSV, il est nécessaire d'appliquer l'équation du temps afin de les convertir en TSM du lieu.

Cette équation rend compte de la variation annuelle de vitesse de rotation apparente du Soleil qui provient de l'obliquité, ou l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'écliptique et de l'ellipticité de l'orbite de la Terre. Les corrections à apporter varient entre +23 minutes en février et -9 minutes en novembre. La formule utilisée pour effectuer ce calcul est celle fournie par le Bureau des Longitudes, valable de 1900 à 2100, et classiquement utilisée dans ce type d'étude (Gouriou, 2012; Pouvreau, 2008).

3.2.2.2. Conversion TSM en TU : Correction en longitude

Lorsque les mesures sont rapportées selon le TSM du lieu, il est nécessaire d'appliquer une correction de longitude par rapport au méridien de Greenwich pour les convertir en TU. Cette correction a pour but d'homogénéiser l'heure sur une région donnée et de rendre comparable des mesures réalisées en différents lieux de cette région. La Terre tourne autour de son axe en 24 heures, soit une vitesse de rotation de 15°/heure, ce qui induit de connaître l'écart de longitude entre le lieu de l'observation et le méridien de Greenwich pour pouvoir corriger les

données et passer de TSM à TU. La correction à appliquer est négative lorsque l'observatoire est à l'Est du méridien et positive lorsqu'il est à l'Ouest.

La longitude de l'observatoire marégraphique de Saint-Malo est $-2,028^\circ$ ce qui implique une correction de +8,10 minutes. La même correction est appliquée pour les mesures faites à Saint-Servan.

3.2.2.3. Conversion temps légal en TU

Lorsque les mesures sont exprimées selon le temps légal en France, il faut enlever 1 heure lors de l'heure d'hiver (TU+1) ou 2 heures lors de l'heure d'été (TU+2). Si les changements d'heure ne sont pas mentionnés dans les registres ou sur les marégrammes, ni dans les métadonnées, l'heure est corrigée en appliquant les règles en place à l'époque (par exemple l'introduction de l'heure d'été en France durant l'année 1976).

3.2.2.4. Corrections temporelles dues à des erreurs de mesures

En plus de l'homogénéisation temporelle en TU, plusieurs autres corrections temporelles « instrumentales » ou « humaines » ont dû être réalisées. Pour la série de Saint-Servan/Saint-Malo, une telle correction est souvent le résultat de :

- Un dérèglement de l'horloge ou de la pendule du marégraphe. Le tambour fait une rotation chaque jour (24 heures) grâce à un horloge associée. Durant le 19^{ème} siècle, l'horloge dérivait très souvent de quelques secondes à 10 minutes (parfois plus mais très rarement). Souvent, l'observateur réglait ce problème en avançant ou retardant la pendule du marégraphe. Un suivi de ces réglages est possible, car l'observateur notait dans le registre ou le journal de marée, la date, l'heure et la correction en secondes ou minutes appliquée.
- Erreur de l'observateur en heure. Parfois, c'est l'observateur qui était la cause d'erreur en se trompant d'heure lors du réglage de l'appareil ou lors de la retranscription. Il convient alors d'ajouter ou soustraire une ou plusieurs heures.

3.3. ANOMALIES OBSERVEES

3.3.1. Général

Hormis les corrections appliquées pour l'homogénéisation verticale et temporelle, il arrive aussi que les données brutes doivent être corrigées ponctuellement suite à des problèmes/anomalies variés. Pour les identifier, l'ensemble des mesures de hauteur d'eau ont été inspectée visuellement à l'aide d'un logiciel d'expertise interne au Shom (TDB : Tidal Data Base). Il permet de visualiser les données numérisées, de les corriger (suppression de valeur, corrections temporelles ou verticales, ...) et d'y adjoindre des commentaires. Les hauteurs d'eau peuvent également être comparées à d'autres séries de données, telles que les prédictions de marée ce qui permet d'identifier plus facilement les décalages verticaux ou les déphasages temporels.

Cette phase de contrôle est très longue et fastidieuse car chaque hauteur doit être inspectée en détail et comparée avec les prédictions afin d'identifier les erreurs et les problèmes des données (par ex. les données aberrantes ; Figure 4) avant de les corriger/supprimer.

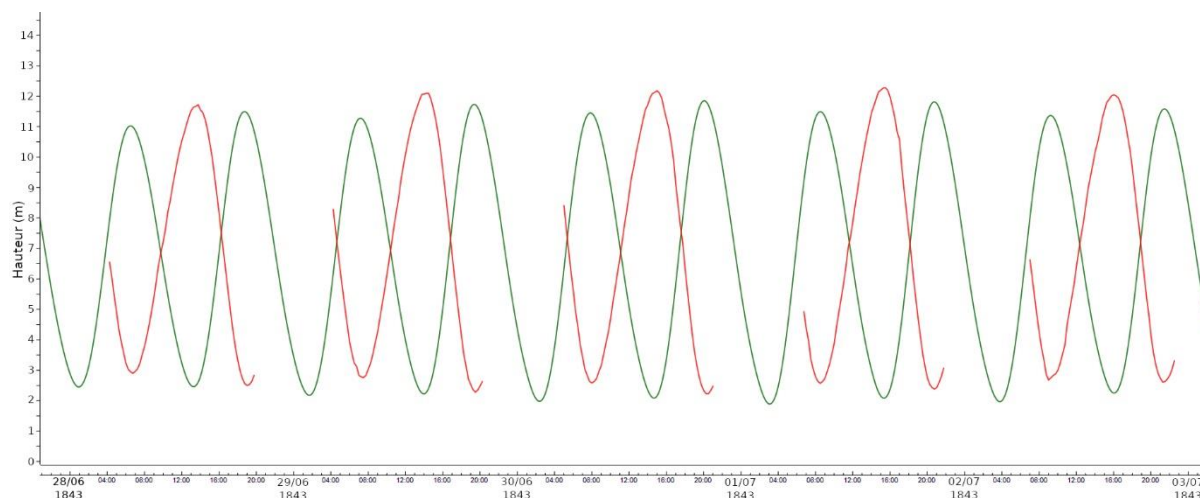


Figure 4 : Interface graphique du logiciel de visualisation TDB avec les courbes numérisées (rouge) et les prédictions de marée (vert) du 28 juin au 2 juillet 1843. Les observations sont déphasées et mal calées verticalement. Après analyses, les données ont été considérées comme incorrectes et donc supprimées de la série.

Un problème récurrent observé sur le site de Saint-Servan est lié à l'envasement du puits de tranquillisation qui peut limiter l'enregistrement des basses mers (BM) et qui parfois impacte également les pleines mers (cf. section 3.3.2). Les autres anomalies détectées peuvent être liées au calage en hauteur du marégraphe, du calage en temps lors du changement du marégramme et des erreurs lors de la numérisation (cf. section 3.3.3).

3.3.2. Le phénomène d'envasement

L'envasement de la base du puits de tranquillisation est un phénomène qui a déjà été observé lors de la reconstruction de séries marégraphiques historiques telles que celles de Saint-Nazaire (Ferret, 2016) ou Socoa (St-Jean-de-Luz) (van den Beld et al., 2021). L'envasement se traduit généralement par un décalage important entre les observations et les prédictions des BM (surestimation ou déphasage), particulièrement lors des périodes de vives-eaux. En effet, l'accumulation de vase dans le puits peut obturer en partie les orifices communiquant avec le milieu extérieur. Cet état de fait, ralentissant la vidange du puits (d'où le déphasage observé) a pour conséquence deux mesures du niveau d'eau différentes entre l'extérieur et l'intérieur du puits. Ce phénomène impacte davantage les BM mais les mesures de PM sont également parfois affectées occasionnant une surestimation des niveaux moyens journaliers.

Le personnel en charge des observations de marée à Saint-Servan a constaté ce phénomène d'envasement lié à la dynamique sédimentaire de la Rance et les a consignés dans leurs registres, y compris lors des travaux de désenvasement du puits (Figure 5).

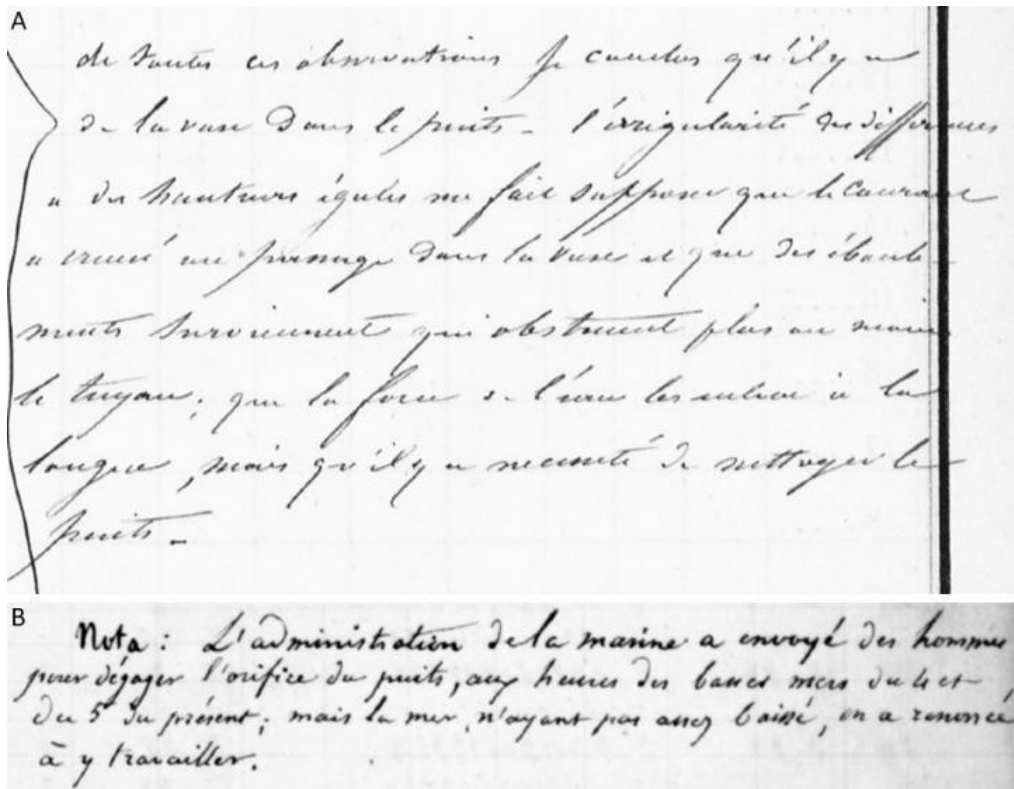


Figure 5 : Extrait d'une note d'un observateur (A) concernant l'envasement du puits de tranquillisation fait en février 1878. Transcription : « De toutes ces observations, je conclus qu'il y a de la vase dans le puits. L'irrégularité des différences des hauteurs égales me fait supposer que le curage a creusé un passage dans la vase et que des éboulements [survenants] qui obstruent plus au moins le tuyau, que la force de l'eau les enlève à la longue, mais qu'il y a nécessité de nettoyer le puits. » (Source : journal des marées de janvier 1878 au décembre 1979 ; Archives Shom) ; (B) concernant les travaux du puits pendant les basses mers, écrit à la fin d'octobre 1957.

Transcription : « Nota : L'administration de la marine a envoyé des hommes pour dégager l'orifice du puits, aux heures des basses mers du 4 et du 5 du présent ; mais la mer n'ayant pas assez baissé, on a renoncé à y travailler. » (Source : cahier bimensuel d'octobre et novembre 1957 ; Archives Shom).

D'autres commentaires témoignent de problèmes en lien avec l'envasement :

- L'absence d'eau dans le puits est constatée à de nombreuses reprises lors des BM entre 1860 et 1870. La vase obstrue de manière trop importante l'entrée du puits et empêche l'eau de rentrer. La vase accumulée au fond du puits engendre régulièrement des ruptures du flotteur. Ainsi les BM entre 1905 et 1911 n'ont pas pu être mesurées.
- Dans les années 1882 et 1897, l'observateur note régulièrement des problèmes sur les BM. Les commentaires sont peu explicites mais probablement liés à l'envasement.

Ce phénomène d'envasement perdure dans le temps et est toujours observé sur les observations récentes. En effet, les données des années 1996, 1997 et 2019 transmises par l'EDF comportent des problèmes similaires. En analysant les courbes, les courbes de marée montrent des replats

au niveau des basses mers, ainsi que des retards au moment du montant qu'il est possible de voir sur la Figure 6.

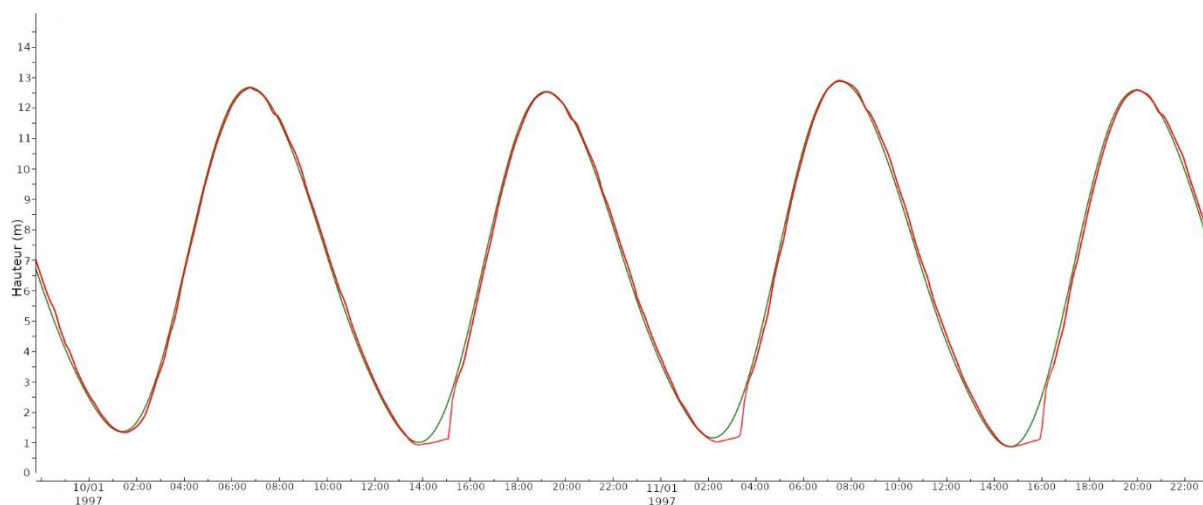


Figure 6 : Visualisation des courbes de marée du 10 et 11 janvier 1997 dans le logiciel TDB. Les données marégraphiques nouvellement numérisées (marégrammes EDF) sont en rouge et les prédictions sont en vert. Les basses mers observées sont aplaties, causé par l'envasement du puits de tranquillisation. Néanmoins, l'envasement ne semble pas d'avoir un impact sur les PM.

L'envasement est un problème difficile à corriger sur les données. En effet, ce phénomène étant progressif, on ne peut pas appliquer une correction fixe dans le temps ou en hauteur. De plus, même si les basses mers sont majoritairement impactées, les pleines mers sont régulièrement épargnées par ce phénomène et peuvent donc être utilisées pour des analyses ultérieures. Généralement, les basses mers, et parfois le montant voir la pleine mer, impactées par l'envasement sont supprimées de la série finale.

3.3.3. Anomalies secondaires

En dehors de l'envasement, d'autres anomalies ont été identifiées dans la série brute : calage en hauteur, en temps et des erreurs lors de la numérisation. Souvent, il est possible de corriger ces anomalies ; dans le cas contraire, les anomalies sont soit supprimées, soit marquées avec une étiquette « 3 » (voir section 3.5).

- **Calage en hauteur.** Les sauts verticaux peuvent correspondre à (i) une erreur faite par l'observateur de l'époque lors de la lecture de la hauteur d'eau (souvent une erreur d'un mètre) corrigée en ajoutant ou retirant la différence de l'erreur, (ii) un mauvais calage du marégramme lors du changement de la feuille dans le marégraphe. Si le décalage est identifié, le marégramme peut être renumérisé avec le nouveau calage, ou (iii) un dérèglement de l'appareil suite à un incident technique (fil de la poulie, flotteur bloqué, ...). L'erreur en hauteur suite à un problème technique n'est pas corrigeable, donc les données impactées ont été supprimées.

- **Calage en temps.** Un déphasage en temps est souvent causé par un dérèglement de l'horloge (cf. ANNEXE II). Parfois, il est possible de corriger les données déphasées si l'observateur de l'époque a écrit une note dans le journal des marées ou ailleurs quantifiant ce déphasage. Parfois, ce déphasage est de quelques minutes comme c'est le cas le 19 mai 1851 où l'observateur indique qu'il a « *retardé la pendule 1min 3s.* ». Toutefois, il est possible que le déphasage soit beaucoup plus important comme c'est observé le 1^{er} juin 1865 où « *la pendule est en avant de 36 minutes sur la courbe.* ». Les décalages en temps peuvent également être causés par : (i) une erreur de l'observateur, souvent d'une heure, corrigée par l'ajout ou le retrait de la différence de l'erreur, (ii) un mauvais calage du marégramme corrigé en renumérisant le marégramme avec le nouveau calage, et (iii) l'envasement (cf. section 3.3.2).
- **Erreurs lors de la numérisation.** Les erreurs lors de la numérisation sont liées à : (i) une mauvaise saisie des valeurs de registres, (ii) un mauvais calage du marégramme, et (iii) un mauvais suivi de la courbe sur un marégramme (erreur du jour ou changement de la courbe). Ces erreurs sont facilement corrigeables.
- **Données inexploitable.** Parfois les données sont inexploitable du fait de la mauvaise qualité des documents (chiffres illisibles, marégrammes impossibles à numériser car trop de courbes, documents mal conservés, ...) ou des données (données incorrectes et non-corrigeable, problèmes techniques, problèmes indéterminés, ...). Un exemple des données inexploitable est visible dans la Figure 4 (cf. section 3.3.1).

3.4. QUALITE DES MESURES SELON LES METADONNEES

3.4.1. La qualité des mesures liée à l'endroit de mesures, à la méthodologie ou aux observateurs

Les métadonnées sont importantes pour déterminer la qualité des mesures. Pour la série marégraphique historique de Saint-Malo/Saint-Servan, il apparait que les mesures de hauteurs d'eau sont très douteuses sur trois périodes (1734-1735, 1835-1841 et 1850-1873) identifiées grâce aux métadonnées. Ces mesures douteuses sont liées à la localisation, aux systèmes de mesures et/ou aux observateurs de ces époques.

Les données de PM et BM mesurées entre 1734 et 1735 au fort de la Conchée, au large de Saint-Malo ne semblent pas correctes. Ces données sont prises en pieds et pouces et ont été converties en mètres dans le cadre du projet. Les hauteurs d'eau transformées sont beaucoup plus grandes (moyenne : 15,5 m ; écart-type : 4,8 m) que les hauteurs mesurées dans le 19^{ème} ou le 20^{ème} siècle (moyenne : 6,8 m ; écart-type : 2,9 m). N'ayant pas d'informations sur des corrections verticales à appliquer à ces mesures, ces données ont donc été rendues inexploitable. Par ailleurs, même pour l'étude du marnage, les marnages obtenus étaient très suspects et supposaient des relevés de PM et BM de mauvaises qualités. Il a donc été décidé de les supprimer de la série reconstruite validée.

Les hauteurs d'eau douteuses mesurées dans le 19^{ème} siècle sont liées aux observateurs de ces époques. Le premier observateur a relevé les hauteurs d'eau sur une échelle de marée de 1835 à 1840. De nombreux documents retrouvés dans les archives font état de la mauvaise qualité des observations sur ces périodes. Une note écrite par l'ingénieur hydrographe Chazallon (cf. ANNEXE III) stipule que : « *Les observations de St Servan étaient faites d'une manière pitoyable. L'on donnait 1800 fr par an à un amateur qui chargeait (moyennement 300 fr) un ancien jardinier du travail. Cet ancien jardinier ne savait ni lire, ni écrire, ni reconnaître l'heure sur une montre ordinaire ! Voilà, quel était l'état des choses en 1839. Chazallon.* »⁴. Une lettre manuscrite de Chazallon à M. le Ministre confirme à nouveau cette sous-traitance d'un jardinier⁵. De plus, l'échelle de marée sur cette période était inclinée d'environ 30° par rapport à la verticale⁶. Ainsi, les mesures de PM/BM de 1835 à 1840, et très probablement jusqu'à 1841 sont erronées.

Entre 1850 et 1873, Tréhouart occupe le poste d'observateur des marées. Selon une note manuscrite de Gaussin « *le marégraphe de Saint-Servan semble tenu avec une négligence extrême* »⁷. Chazallon a déjà exprimé son mécontentement sur cet observateur : « *Pendant le cours de la seconde année je reconnus de nombreuses lacunes dans le travail de l'agent chargé du marégraphe de St Servan et quelque temps après j'appris que l'instrument ne marquait plus l'heure d'une manière exacte. (...) Cet agent étant venu à Paris, m'a avoué qu'il avait remplacé par une corde le mince fil d'acier (de deux ou trois dixièmes de millimètre de diamètre, qui conduit le chariot du marégraphe.* »⁸. Les mêmes sources mentionnent également que M. Théhouart a laissé la retranscription des marégrammes dans les registres de marées à son ami M. Fabre, ancien capitaine au long cours. Enfin, le marégraphe semble rarement contrôlé⁹.

Les **mesures couvrant les trois périodes 1734-1735, 1835 -1841 et 1850-1873 sont finalement écartées de la série validée finale**, car jugées comme trop douteuses et donc inexploitable. Dès lors, elles porteront une étiquette qualité « 4 » comme étant de « mauvaise qualité » (cf. section 3.5).

3.4.2. Influence du barrage de la Rance sur la marée de Saint-Malo

Le projet de la construction d'une usine marémotrice nécessitant la construction d'un barrage remonte au début du 20^{ème} siècle par la création d'une commission pour modéliser l'énergie des marées sous la direction des Ponts et Chaussées en 1918 (Rouzé, 1959). En 1921, une étude sur l'utilisation de l'énergie des marées recommande en particulier l'aménagement de l'estuaire de la Rance. En 1941, la Société pour l'utilisation des marées (SEUM) est créée, à l'initiative de Robert

⁴ Le journal des marées de 1840. Archives Shom.

⁵ Chazallon. Rapport à M. Hamelin, Ministre de la marine, le 6 décembre 1859. Archives Shom.

⁶ Chazallon. Rapport à M. Hamelin, Ministre de la marine, le 6 décembre 1859. Archives Shom.

⁷ Gaussin. Rapport sur les inspections des marégraphes, le 27 avril 1861. Archives Shom.

⁸ Chazallon. Rapport à M. Hamelin, Ministre de la marine, le 6 décembre 1859. Archives Shom ; Pouvreau, 2008.

⁹ Gaussin. Rapport sur les inspections des marégraphes, le 27 avril 1861. Archives Shom.

Gibrat, Directeur de l'électricité au ministère des Travaux Publics. Cette société engage immédiatement un programme d'études visant à la conception d'une usine marémotrice sur l'estuaire de la Rance. Les premiers travaux de la construction du barrage débutent en janvier 1961 et durent 5 ans. La production d'électricité commence en automne 1966 (Rouzé, 1959).

Le barrage de la Rance est situé au sud de Dinard et de Saint-Malo, à l'embouchure du fleuve côtier de la Rance, entre la pointe de la Brebis à l'ouest et la pointe de la Briantais à l'est (Figure 7). Ce barrage crée un bassin de retenue d'une superficie de 22 km² à marée haute¹⁰.

Le barrage de l'usine, constitué d'une digue en béton, mesure quant à lui 390 m de long et 33 m de large. L'électricité est produite par 24 groupes bulbes (turbines Kaplan) réversibles¹¹, permettant de produire de l'électricité grâce au déplacement des masses d'eau par le phénomène de marée (dans les deux sens) : l'énergie hydraulique est transformée en énergie électrique en turbinant l'eau de la retenue¹².



Figure 7 : Une photo des années 1960 du barrage de la Rance (Archives Municipales de Saint-Malo).

Le barrage de la Rance pourrait impacter le régime de la marée à Saint-Malo. Des travaux ont été menés afin d'étudier les éventuels impacts.

¹⁰ Anonyme, EDF. Demande de concession – dossier A – Piece 5. Chapitre I. Objet de la concession – caractéristiques principales de l'aménagement. Date inconnue. Archives Municipales de Saint-Malo.

¹¹ Rouzé, 1959 ; <https://www.edf.fr/usine-maremotrice-rance/presentation>.

¹² <https://www.edf.fr/usine-maremotrice-rance/presentation>.

Il est évident qu'en amont du barrage, la marée est impactée par le fonctionnement du barrage. L'eau dans le bassin est maintenue au même niveau que la pleine mer, ce niveau est gardé pendant plusieurs heures¹³, donc les marées à l'intérieur de l'estuaire sont devenues asymétriques (Landre, 1974). Une autre modification potentielle de la marée à l'intérieur de l'estuaire concerne la hauteur d'eau. Même si des documents indiquent que les hauts niveaux d'eaux ne sont pas modifiés¹⁴, une publication de Landre (1974) révèle que la marée est néanmoins fortement diminuée en amplitude. Parallèlement, une étude réalisée par l'ICA Bonnot sur les observations de la marée sur les côtes de France suggère que la marée est également déformée par la construction du barrage : « *Les observations récentes faites à proximité sont inexploitable pour la prédiction. Il apparait nécessaire d'équiper un autre site d'observation relativement éloigné du barrage.* »¹⁵. Il n'est pas spécifié ici de quel site d'observation l'ICA fait référence et pourrait bien concerner des marégraphes implantés à l'intérieur de l'estuaire.

En 1986, le Shom est sollicité pour étudier ce phénomène et une étude est réalisée sur la prédiction de la marée à Saint-Malo (Simon, 1986). Un des objectifs est la possibilité d'adopter la méthode harmonique pour les prédictions de marée à Saint-Malo. Dans le cadre de cette étude, un marégraphe immergé a été installé dans le port de Saint-Malo et a fonctionné du 9 avril au 10 juin 1986. Ces observations ont été comparées avec les prédictions pour ce site. Parallèlement, des observations réalisées au marégraphe d'EDF à Saint Servan ont été comparées avec les mêmes prédictions. Les conclusions sont que :

- la construction du barrage de la Rance n'a pas modifié sensiblement le régime de la marée à Saint-Servan ;
- la marée à Saint-Servan a environ 2 minutes de retard sur celle de Saint-Malo ;
- la prédiction harmonique à l'aide des constances issues des observations effectuées à Saint-Servan antérieurement à la construction du barrage est plus proche des observations récentes à Saint-Servan que de celles de Saint-Malo ;
- la prédiction harmonique fournit des résultats acceptables pour Saint-Servan ainsi que pour Saint-Malo.

Dès lors, les conclusions de cette étude permettent la **fusion des observations issues de Saint-Servan et de Saint-Malo en un seul et unique jeu de données**.

¹³ Anonyme, EDF. Demande de concession – dossier A – Piece 5. Chapitre III. Modifications apportées au régime des eaux. Date inconnue. Archives Municipales de Saint-Malo.

¹⁴ Anonyme, EDF. Demande de concession – dossier A – Piece 5. Chapitre III. Modifications apportées au régime des eaux. Date inconnue. Archives Municipales de Saint-Malo.

¹⁵ Bonnot. Note sur les observations de la marée sur les côtes de France. Septembre 1980. Archives SHD à Brest ; cote MB 3W.

3.5. ETIQUETTES DE QUALITE

La qualification des données numérisées est une étape nécessaire avant toute analyse ultérieure (évolution du niveau de la mer, niveaux extrêmes...). Les données nouvellement numérisées ont été inspectées visuellement et une « étiquette » a été attribuée aux données en fonction des anomalies identifiées et leurs corrections. En complément, il a été indispensable de revenir régulièrement aux documents sources (marégrammes, registres, métadonnées) pour confirmer ou infirmer les potentielles anomalies. Les étiquettes attribuées aux données permettent de qualifier la qualité de la mesure (Tableau 2).

Une étiquette est associée à chaque donnée (Figure 8). Les données de mauvaises qualités (étiquette « 4 ») sont directement supprimées de la série validée ; les données dans la série validée qui ne sont ni supprimées ni étiquetées « 2 » ou « 3 », sont considérées comme des données de bonne qualité (étiquette « 1 »).

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

Étiquette	Description
1	Bonne qualité
2	Probablement de bonne qualité <i>La donnée a subi une correction / la donnée présente une suspicion de légère anomalie sans élément pour la corriger</i>
3	Probablement de mauvaise qualité <i>La correction donne un résultat moyen / l'anomalie est importante sans éléments pour la corriger</i>
4	Mauvaise qualité <i>Mesure supprimée</i>

La Figure 8 représente la série temporelle brute, sans aucune correction. Par la suite, cette série subira plusieurs phases de vérifications et de corrections, tels qu'une étude des résidus (cf. section 5.2), et des retours réguliers aux informations contenues dans les métadonnées (cf. section 3.4) pour arriver à la série validée finale (cf. section 5.3 ; Figure 14).

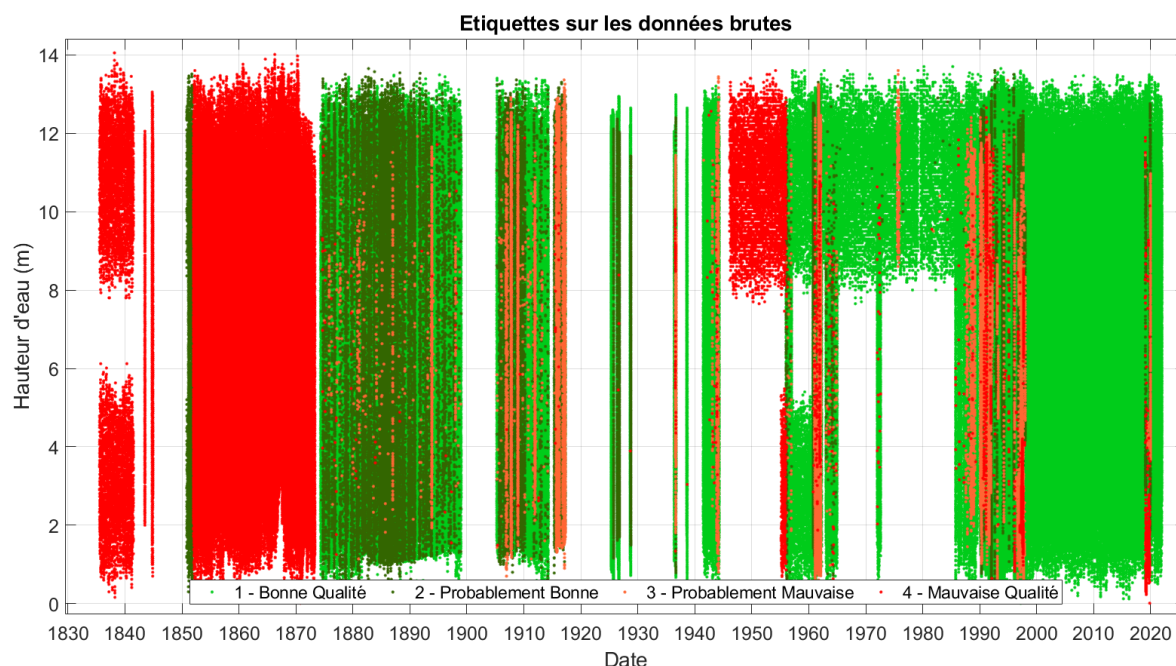


Figure 8 : La série brute avec les étiquettes de qualité attribuées aux données de hauteur d'eau sur toute la série de 1835 à 2021. Vert clair = données de bonne qualité (qualité « 1 »), vert foncé = données qui sont probablement bonnes (qualité « 2 »), marron = données qui sont probablement mauvaises (qualité « 3 ») et rouge = données de mauvaise qualité (qualité « 4 »).

4. LES MESURES MÉTÉOROLOGIQUES À SAINT-MALO

4.1. LES MESURES A SAINT-MALO

Sur la période 1851-1917, parallèlement aux mesures marégraphiques réalisées à l'observatoire de Saint-Servan, des observations météorologiques sont réalisées et consignées dans les journaux (bimensuels) de marée. Ces derniers contiennent divers éléments telles que la pression atmosphérique, la température associée au baromètre ainsi que la direction et l'intensité du vent (Figure 9). Les mesures de pression atmosphérique ont été réalisées quotidiennement par l'observateur de marée (mesures trihoraires diurnes ; c'est-à-dire à 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h) qui lisait la pression sur le baromètre au mercure de type Fortin¹⁶.

¹⁶ Nom auteur illisible. Lettre à M. le Directeur général du Dépôt des Cartes et Plans de la Marine, le 16 janvier 1874. Archives SHD Vincennes ; cote DD2-286-fol-6.

Avril 1858

Dates	6 heures			9 heures			Midi			3 heures			6 heures			9 heures			Baro Eau 2
	mesure	Can	Beau	mesure	Can	Beau	mesure	Can	Beau	mesure	Can	Beau	mesure	Can	Beau	mesure	Can	Beau	
<i>T 1^{er}</i>	419	782	NO 3	443	814	NO 3	456	832	NO 3	478	861	NO 3	504	896	NO 3	556	965	NO 3	972
<i>T 2</i>	567	980	NO 3	551	959	NO 4	544	949	NO 4	511	905	NO 3	510	904	NO 3	509	902	NO 3	966
<i>T 3</i>	516	912	NO 3	525	924	NO 3	535	934	NO 2	541	945	NO 3	551	959	NO 3	563	974	NO 3	989
<i>T 4</i>	591	1012	NO 2	584	1003	NO 1	596	1019	NO 2	596	1019	NO 2	584	1003	NO 3	574	989	NO 2	956
<i>T 5</i>	519	916	NO 2	510	904	NO 4	500	891	NO 3	490	878	NO 2	488	875	NO 3	491	879	NO 3	894
<i>T 6</i>	516	912	NO 3	535	938	NO 4	545	951	NO 3	546	952	NO 2	550	958	NO 1	556	965	NO 1	953
<i>T 7</i>	536	939	NO 3	506	899	NO 3	488	875	NO 3	464	843	NO 3	454	830	NO 1	451	826	NO 3	826
<i>T 8</i>	452	827	NO 3	449	823	NO 3	451	826	NO 3	456	832	NO 4	459	836	NO 3	467	847	NO 2	850
<i>T 9</i>	473	855	NO 1	476	859	NO 2	484	869	NO 1	480	864	NO 2	482	867	NO 2	491	879	NO 2	879
<i>T 10</i>	490	878	NO 3	494	883	NO 2	495	884	NO 3	494	883	NO 4	494	883	NO 4	518	915	NO 2	927
<i>1^{er} Semanal</i>	5079	9013		5073	9006		5092	9030		5056	8982		5076	9011		5176	9141		
<i>T 11</i>	539	942	NO 3	554	963	NO 3	558	968	NO 4	562	973	NO 4	568	981	NO 3	575	990	NO 2	987
<i>T 12</i>	570	984	NO 1	569	982	NO 1	565	977	NO 2	555	964	NO 3	554	963	NO 2	554	963	NO 1	967
<i>T 13</i>	561	972	NO 2	562	973	NO 1	569	982	NO 2	576	992	NO 2	577	993	NO 1	609	1036	NO 2	1033

Figure 9 : Un exemple des données météorologiques dans les registres bimensuels datées du 1^{er} au 13 avril 1858 (Archives Shom). La pression atmosphérique, la température et la direction et l'intensité du vent sont mesurées (mesures trihoraires diurnes) pour la période de 1850-1917.

Dans le cadre de la reconstruction de la série marégraphique de Saint-Servan/Saint-Malo, les mesures de pression atmosphérique ont été numérisées. Ces mesures étaient effectuées à l'intérieur de la pièce dans laquelle se situait le marégraphe, principalement à l'aide d'un baromètre à mercure de type Fortin. Ce baromètre transportable avait une précision de l'ordre du 10^{ème} de millimètre de mercure (mm Hg), mais il est assez imposant (environ un mètre de longueur). Les observateurs possédaient donc un deuxième baromètre, anéroïde, beaucoup plus petit (environ 10 cm de diamètre), mais également moins précis (incertitude sur la mesure : $\pm 0,5$ mm Hg), qu'ils pouvaient utiliser lorsque les conditions ne permettaient pas une mesure du baromètre Fortin¹⁷.

La pression mesurée en mm Hg est convertie en hectopascal (hPa), 1 mm Hg correspond à 133,322 Pa (soit 1 atmosphère (ATM) = 1 013,25 hPa = 760 mm Hg).

4.2. LA NUMERISATION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

La pression atmosphérique a été numérisée manuellement en saisissant les valeurs dans un tableur numérique. Comme pour les données marégraphiques, cette étape de numérisation peut

¹⁷ Instructions pour les observateurs écrits dans le registre bimensuel. Archives Shom.

engendrer des erreurs de saisies. Afin de limiter au maximum ces erreurs, les données saisies sont soumises à un contrôle systématique de deux manières. Le premier contrôle a été fait directement après la saisie des valeurs dans le tableur, par vérification de la continuité des données saisies. Lorsque la différence de deux mesures successives dépassait 4 mm Hg (équivalent à ≈ 5 hPa), une alerte était affichée. Cela permettait ensuite de contrôler la valeur suspecte par une comparaison avec la valeur inscrite dans le registre de marée. Dans le cas d'une erreur de frappe, la valeur est corrigée directement dans les données brutes ; dans le cas contraire, un commentaire était inscrit pour cette valeur, qui était utilisé pendant le deuxième contrôle.

Ce dernier contrôle est effectué lors de la phase de visualisation des données dans TDB. La pression atmosphérique a été importée dans le logiciel et visuellement contrôlée. Chaque anomalie a été vérifiée s'il n'y a pas une erreur de frappe. Ces erreurs ont ensuite été corrigées directement dans les données brutes ou supprimées de la série finale.

4.3. LE BAROMETRE INVERSE

La pression atmosphérique a une influence directe sur le niveau de la mer : en période dépressionnaire, les basses pressions induisent une augmentation du niveau de la mer et inversement, en période anticyclonique, les hautes pressions provoquent une diminution du niveau de la mer. Ce phénomène s'appelle l'effet du baromètre inverse et n'est pas négligeable : en effet une diminution (augmentation) de 10 hPa de la pression induit une augmentation (diminution) du niveau de la mer de 10 cm.

La prise en compte de l'évolution de la pression atmosphérique mesurée conjointement aux mesures de hauteurs d'eau est essentielle dans le processus de validation de la série marégraphique historique. En estimant l'effet du baromètre inverse, il est possible de vérifier si les fluctuations du niveau de la mer ont bien une réalité physique ou si elles sont associées à des anomalies dans la mesure. Cet effet du baromètre inverse peut ainsi être calculé à partir de mesures de pression atmosphérique. S'il n'existe pas de mesures à un instant et/ou à un lieu donné il est possible d'utiliser des réanalyses météorologiques. La réanalyse météorologique est destinée à réanalyser des données d'observation atmosphérique pour l'assimilation de données dans les modèles de prévision numérique du temps.

La Figure 10 illustre l'utilisation du baromètre inverse pour l'identification et la validation des surcotes (cf. section 6.3) pour la période de mai 1885 à novembre 1886. Les surcotes/décotes instantanées sont obtenues en faisant la différence entre la prédiction et l'observation (Figure 10 en gris). Ces surcotes/décotes instantanées peuvent avoir une large amplitude et ne sont pas forcément représentatives d'un phénomène tempétueux, ainsi elles ont été moyennées sur 24h afin de lisser les résidus (Figure 10 en bleu), ce qui permet d'identifier plus facilement les périodes avec des surcotes. Les effets du baromètre inverse ont été calculés à partir des mesures de pression atmosphérique (Figure 10 en vert clair) et avec des réanalyses de pression atmosphérique (Figure 10 en vert foncé) lorsque des observations n'étaient pas disponibles, et sont comparées avec les résidus moyennés. La Figure 10 illustre que sur la période sélectionnée,

les résidus varient en moyenne de la même manière que le baromètre inverse. Ceci confirme ainsi la qualité des mesures reconstruites.

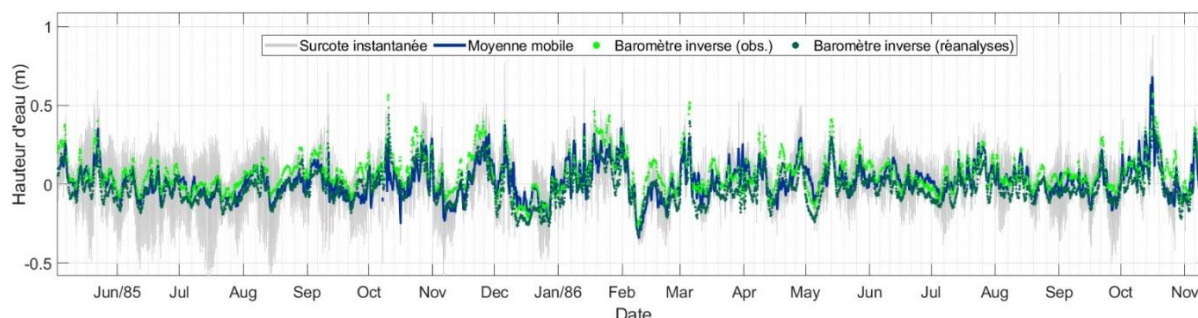


Figure 10 : L'influence du baromètre inverse sur le niveau de la mer à Saint-Servan/Saint-Malo pour la période de mai 1885 à novembre 1886. En gris : surcotes/décotes instantanées ; en bleu : moyenne lissée des résidus ; en vert clair : le baromètre inverse calculé à partir des mesures de pression atmosphérique [1851-1917] ; en vert foncé : le baromètre inverse calculé à partir des réanalyses modélisée.

5. VALIDATION DES DONNÉES HISTORIQUES DE SAINT-MALO

5.1. UNE SERIE COMPOSEE DE DEUX SITES DE MESURES

Comme vu précédemment, des mesures de hauteur d'eau ont été effectuées sur deux sites différents : à Saint-Servan proche de la Tour Solidor et à Saint-Malo au port (cf. ANNEXE I). Environ 800 m séparent ces deux sites (Figure 1). Même si les deux sites étaient traités, initialement, séparément, l'objectif final est de fournir une série composite à partir de ces deux jeux de données. Plusieurs études ont été réalisées justifiant la fusion des jeux de données de Saint-Servan et de Saint-Malo.

L'étude de Simon (1986) a conclu qu'il n'y a pas de différence significative entre les observations de hauteur d'eau effectuées à Saint-Servan (marégraphe de la tour Solidor) et celles à Saint-Malo (marégraphe immergé) (cf. section 3.4.2). La marée à Saint-Servan n'étant décalée que de 2 min et les écarts-types en hauteur pour ces deux sites étant inférieurs au cm (Simon, 1986), les écarts ont été considérés comme négligeables.

Dans le cadre du PAPI Saint-Malo, des observations réalisées simultanément sur les deux sites ont permis de réaliser une comparaison, pour caractériser les différences de temps et de hauteur du signal de marée. Dans les années 1960, 1980 et 1990, des hauteurs de PM mesurées par la capitainerie du port de Saint-Malo étaient relevées en même temps que les mesures continues de hauteurs d'eau enregistrées par le marégraphe de Saint-Servan. Les PM ont été extraites des données continues à Saint-Servan et comparées avec les PM de la capitainerie de Saint-Malo (Figure 11). La différence moyenne en hauteur est de 4,4 cm (± 10 cm) avec un déphasage moyen des PM de 3 min (± 12 min). La moyenne mobile des écarts en hauteur fluctue autour de 0 cm (Figure 11).

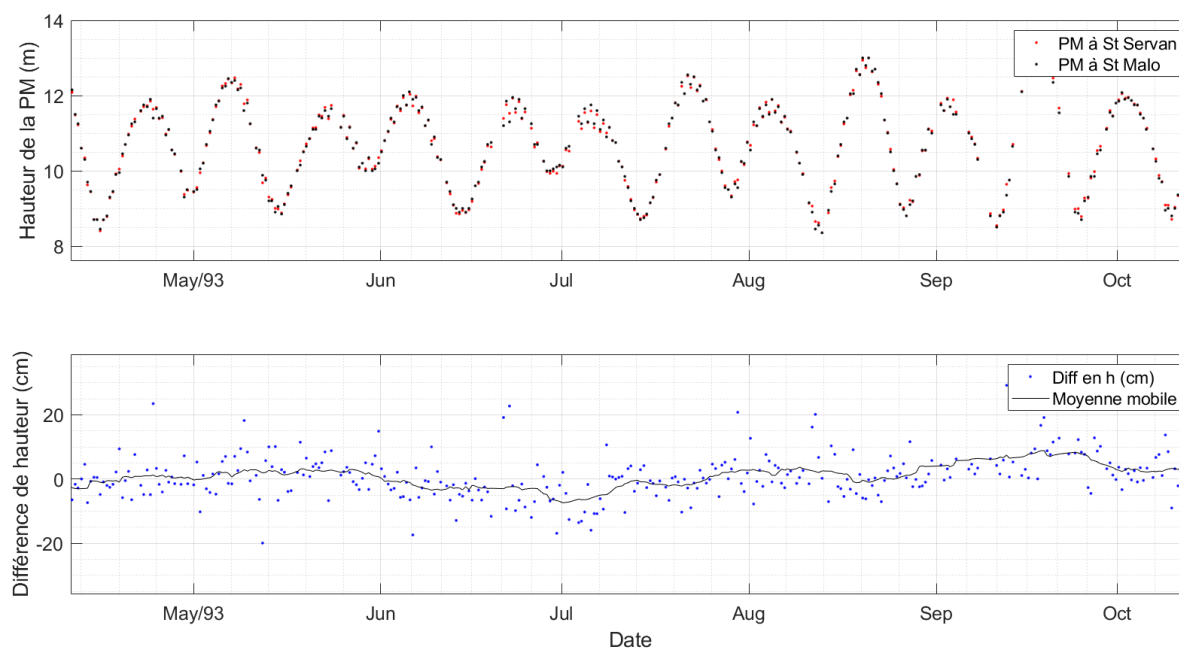


Figure 11 : La comparaison de PM prises sur l'échelle au port de Saint-Malo et les PM extrait des données continues du marégraphe à Saint-Servan. Haut : les hauteurs de PM de Saint-Malo (noir) et de Saint-Servan (rouge) pour la période d'avril au septembre 1993 ; bas : les différences en hauteurs en cm (points bleus) et la tendance (ligne noir).

Il est important de noter ici, que les PM lues à l'échelle de marée à Saint-Malo sont des mesures ponctuelles avec des incertitudes liées au lecteur, au moment de la lecture, à l'arrondi effectué sur l'heure ou la hauteur de la mesure. Les écarts observés entre ces mesures ponctuelles et celles à 5min à Saint-Servan peuvent être liés à ces différences de méthodes de mesure.

Cette étude complémentaire révèle des écarts entre le site de Saint-Malo et Saint-Servan du même ordre de grandeur que les différences trouvées par Simon (1986). Ceci permet de justifier l'utilisation d'une série composite pour ce site d'étude. Ainsi, les analyses décrites par la suite s'appuient sur la série composite.

5.2. ÉTUDE DE RESIDUS

5.2.1. Les résidus en hauteur

Les résidus correspondent aux différences entre les hauteurs observées (h_{obs}) et les hauteurs prédites (h_{pred}) à la même période. Il est possible de calculer deux sortes de résidus : (i) les résidus instantanés, soit la différence entre h_{obs} et h_{pred} à un instant t , et (ii) les résidus de PM ou BM, soit la différence en temps et en hauteur entre les PM ou BM observées et prédites. L'utilisation des résidus instantanés n'est pas toujours adaptée aux reconstructions marégraphiques historiques, car ils sont très sensibles aux décalages en temps, souvent observés dans une série historique. De nombreuses surcotes/décotes artificielles apparaissent qui sont uniquement liées aux écarts de temps et non à des écarts en hauteur. L'utilisation des résidus de PM et/ou BM minimise ces problèmes de calage temporel et sont donc plus justifiées dans le cadre des reconstructions marégraphiques.

Dans un premier temps, une analyse harmonique est réalisée sur la série de hauteur d'eau afin de décomposer le signal de marée en 143 ondes harmoniques. Ces ondes, appelées également

composantes harmoniques, sont utilisées ensuite pour calculer des prédictions de marée. La marée prédite peut différer en fonction de la durée et de la qualité des jeux de données considérés pour calculer les constantes harmoniques. D'où la nécessité d'utiliser un jeu de donnée le plus fiable possible pour réaliser cette décomposition du signal.

Les hauteurs d'eau observées et prédites sont par la suite interpolées. Cette étape a pour but de (i) combler des lacunes éventuelles de courte durée (moins de 3h de lacunes), et (ii) extraire la hauteur et l'heure de chaque PM/BM. Les PM et BM observées et prédites sont par la suite respectivement comparées entre elles.

La Figure 12 montre les résidus en hauteurs de PM et BM à Saint-Servan / Saint-Malo entre 1850 et 2022. Pour éviter que ces résidus ne soient impactés par l'évolution du niveau marin à Saint-Malo, la série temporelle a été découpée en plusieurs sous-jeux de données (entre 10 et 30 ans) afin d'effectuer les analyses harmoniques sur différentes périodes : [1850-1875], [1876-1900], [1901-1914], [1915-1938], [1939-1970], [1971-2000] et [2001-2022]. Ce découpage a été défini en fonction des données disponibles, en réalisant le meilleur compromis entre choisir des périodes suffisamment longues afin d'obtenir des composantes harmoniques fiables tout en se limitant sur la durée pour éviter d'être impacté par l'évolution du niveau marin moyen.

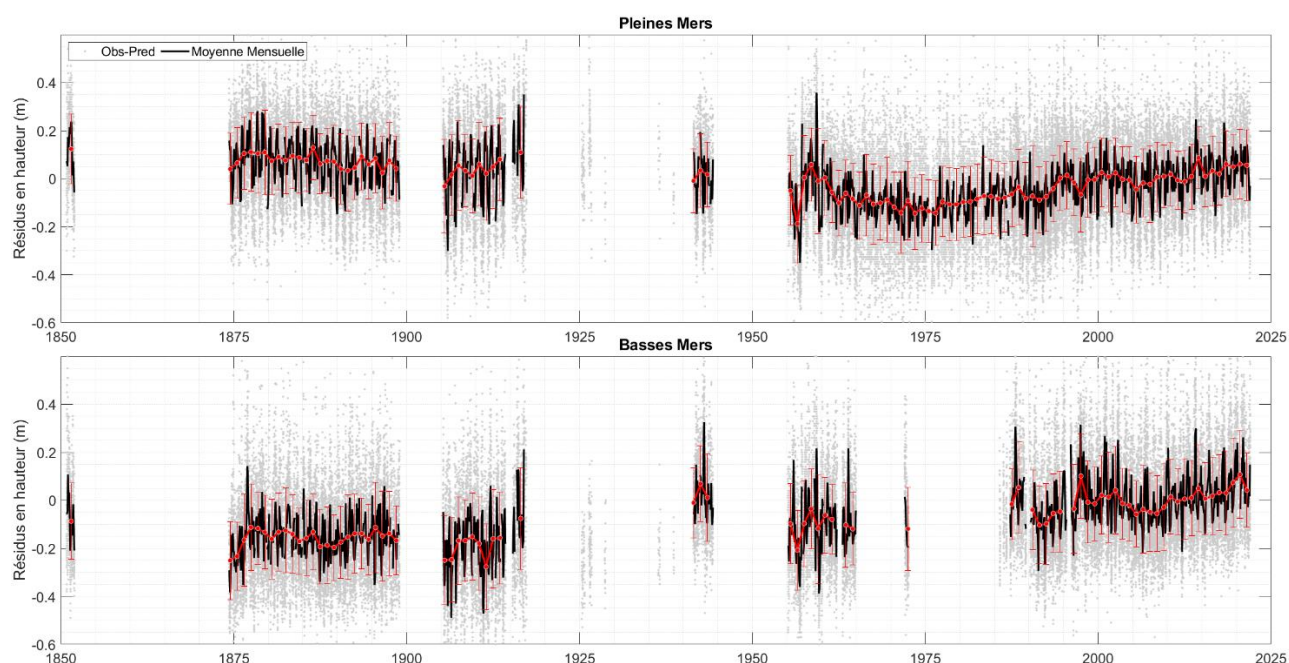


Figure 12 : Résidus en hauteur entre les PM (haut) et BM (bas) prédites et observées pour la série composée de Saint-Servan / Saint-Malo entre 1850 et 2022. En gris : les différences de la hauteur observée et prédite ; en noir : la moyenne mensuelle ; en rouge : la moyenne annuelle avec les écart-types.

Les résidus de PM et BM sur la totalité de la période sont en moyenne respectivement de 0,3 cm et 8 cm, ce qui illustre que la plupart du temps, la série semble être bien calée en hauteur. La différence observée entre les résidus des PM et des BM peut être liée aux problèmes d'envasement récurrents du puits du marégraphe. Comme indiqué dans la section 3.3.2, l'envasement impacte en majorité les BM d'où les écarts avec les prédictions plus importants. Sur l'ensemble de la série, les résidus en hauteur montrent une variabilité relativement importantes

(entre -3,5 cm et +3,5 cm pour les PM et entre -4,9 cm et +3,3 cm pour les BM) (Figure 12) mais ces valeurs sont cohérentes avec celles obtenues dans le cadre d'autres reconstructions (Ferret, 2016; Gouriou, 2012; Latapy, 2020; Pouvreau, 2008). À 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 12 (en noir) sont majoritairement centrées sur zéro ce qui permet de valider les corrections réalisées et donc la production d'une série de donnée homogène.

L'analyse des résidus est un bon moyen d'identifier des périodes suspectes pour lesquelles la qualité des données est douteuse suite à des problèmes de calage vertical. C'est notamment le cas de la période 1946-1954 pour laquelle les données de PM de la Capitainerie sont disponibles mais les résidus de PM sur cette période sont très importants et semblent anormaux comparés aux autres années (non montrés sur la Figure 12 car supprimés après analyse).

Peu d'informations ont été retrouvées sur le zéro de l'échelle utilisé pour ces mesures, exceptée la différence de 20 cm entre le zéro de l'échelle et le ZH (cf. section 1.2). Il est fort probable que le zéro de l'échelle ait été changé à cette période, sans qu'aucune information dans les métadonnées retrouvées ou ailleurs le confirme.

5.2.2. Les résidus en temps

Les résidus en temps de PM et BM sont également calculés pour la série de Saint-Malo/Saint-Servan suivant la méthode détaillée dans la section ci-dessus (cf. section 5.2.1). Les moyennes des résidus de PM et BM sur la totalité de la période reconstruite sont respectivement d'environ 3 min et 5 min, ce qui confirme que la majorité de la série est bien recalée en temps (Figure 13). Les résidus en temps des PM et BM montrent une variabilité relativement importante (entre -0,61 min et +11,50 min pour les PM et entre -0,27 min et +11,50 min pour les BM) et leur écart-types moyens sont environ 2 min et 3,5 min respectivement. Les maximums de plus de 11 minutes ont été calculés pour les années 1915-1917 où d'importants déphasages ont été identifiés (Figure 13).

Dans l'ensemble, ces écarts sont principalement liés aux incertitudes des prédictions et des effets météorologiques enregistrés dans les observations. À ce titre, obtenir des résidus dans cette gamme de valeur est largement acceptable dans le cadre de ce type de travaux (Ferret, 2016; Gouriou, 2012; Latapy, 2020; Pouvreau, 2008).

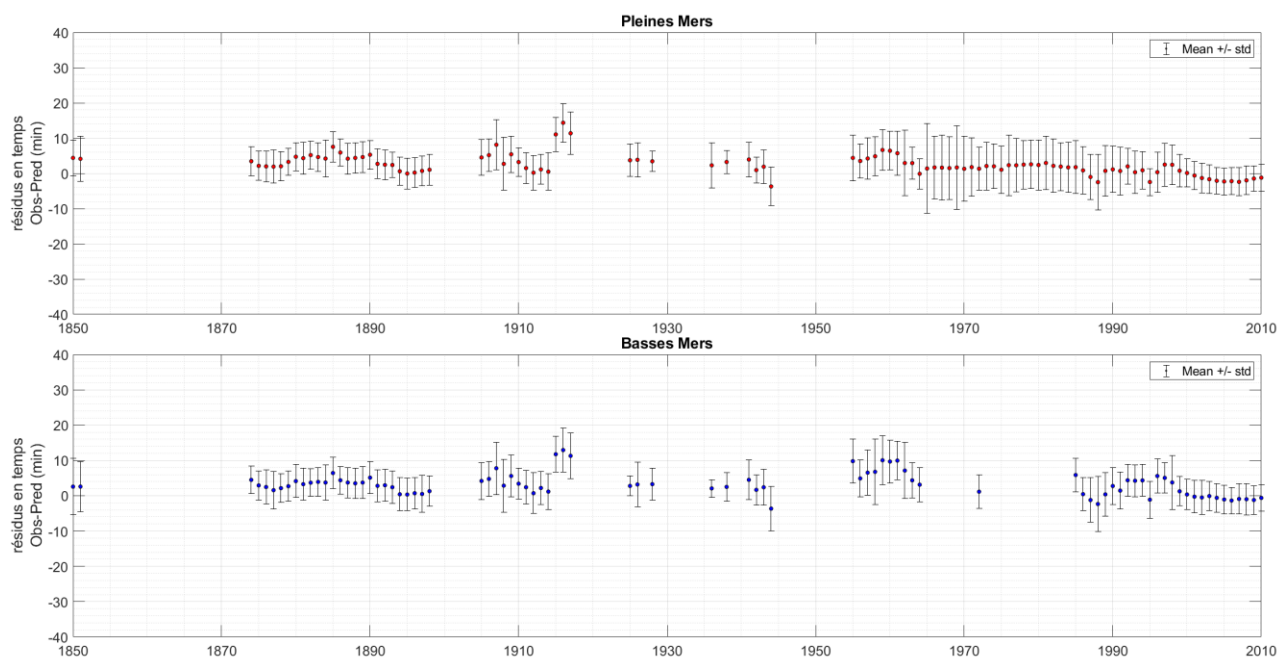


Figure 13 : L'évolution des résidus en temps annuels sur les heures des PM (haut ; rouge) et BM (bas ; bleu) à Saint-Servan/Saint-Malo entre 1850 et 2010. Les moyennes (cercle rouge pour les PM et cercle bleu pour les BM) et les écart-types sont visibles dans la figure.

5.3. LA SERIE MAREGRAPHIQUE HISTORIQUE FINALE ET SON UTILISATION

L'inspection visuelle et les contrôles de la série brute ont permis d'identifier plusieurs anomalies, qui ont été (i) corrigées, (ii) supprimées, ou (iii) conservées et étiquetées « 3 » (voir section 3.5). Les anomalies observées peuvent être liées à l'envasement, au calage en hauteur, au calage en temps et/ou aux erreurs de l'observateur de l'époque. Les erreurs liées à la numérisation ont été directement corrigées.

Le résultat de ces étapes d'analyse permet de fournir une série temporelle finale validée (Figure 14). Cette série validée ou série finale va être utilisée par la suite pour les études liées à l'évolution pluri-décennales du niveau de la mer ou à l'évolution des composantes harmoniques et du marnage. Une étude sur des phénomènes hautes-fréquences, telles que des tempêtes, a permis d'identifier les 20 événements extrêmes les plus importants sur la période 1850-2021 (cf. section 6.3).

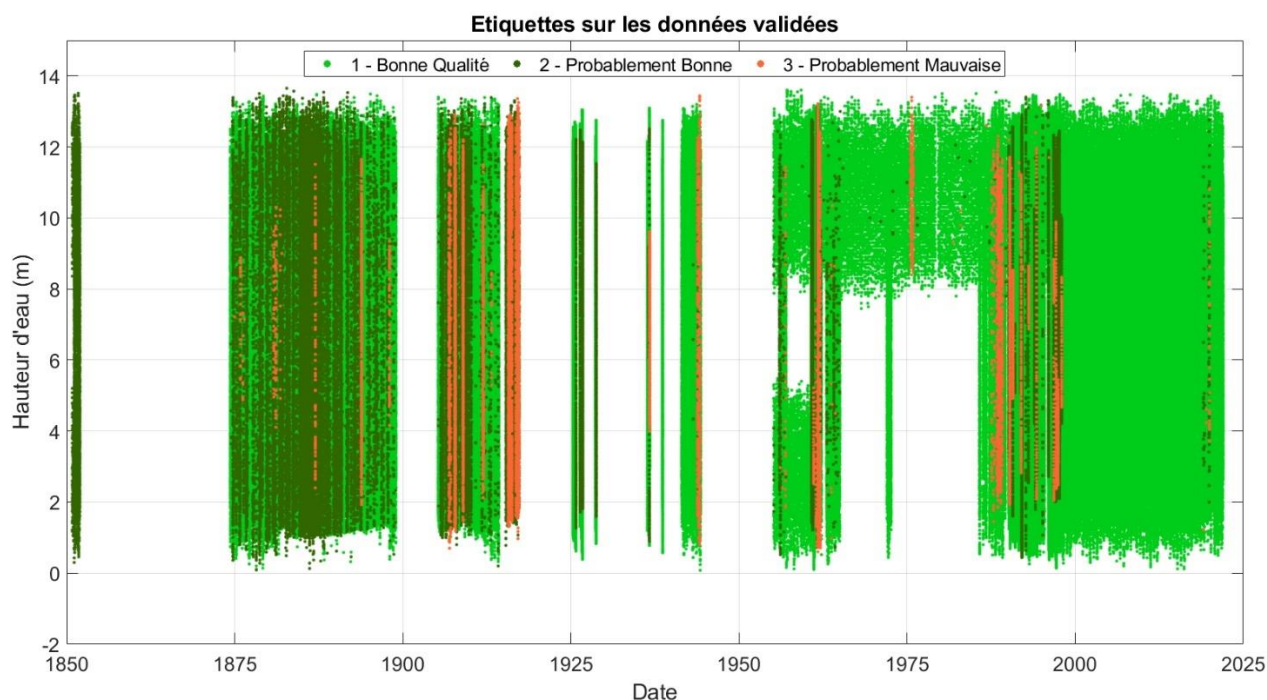


Figure 14 : La série reconstruite composite de Saint-Servan/Saint-Malo de 1850 à 2022. Les étiquettes qualité sont indiquées par couleurs : vert claire = étiquette « 1 » correspondant aux données de bonne qualité ; vert foncé : étiquette « 2 » correspondant aux données avec un qualité probablement bonne ; orange : étiquette « 3 » soit les données considérées comme probablement mauvaises. Les données avec l'étiquette « 4 » ou des données de mauvaise qualité sont supprimées de la série validée et ne sont donc pas visibles dans la figure.

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

- 83,0 % des données sont identifiées comme étant de bonne qualité (étiquette « 1 »).
- 4,5 % des données sont identifiées comme étant de probablement bonne qualité (étiquette « 2 »).
- 1,5 % des données sont identifiées comme potentiellement de mauvaise qualité (étiquette « 3 »).
- 11,0 % des données sont de qualité mauvaise et sont supprimées (étiquette « 4 »). Cette portion est surtout importante à cause de trois périodes ([avant 1850], [1851-1873] et [1946-1954]) avec des données très douteuses et qui sont finalement supprimées de la série finale (cf. sections 3.4.1 et 5.2.1).

En fonction de l'analyse souhaitée, le jeu de donnée est constitué en fonction de l' étiquette de chaque mesure. Un jeu de données de bonne qualité (étiquettes « 1 » et « 2 ») est utilisé pour les analyses décrites en section 6, sauf pour l'étude de marnage qui inclut également les données étiquetées avec « 3 » (cf. section 6.2).

6. EXPLOITATION / ANALYSE DE LA SÉRIE MARÉGRAPHIQUE RECONSTRUITE DE SAINT-MALO

6.1. ÉVOLUTIONS DES CARACTERISTIQUES DES MAREES A SAINT-MALO

6.1.1. Évolution du niveau moyen des mers

Les niveaux moyens mensuels et annuels calculés à partir de la série marégraphique reconstruite de Saint-Malo/Saint-Servan sont présentés en Figure 15. La phase de validation des données (cf. section 5) a impliqué la suppression de nombreuses observations.

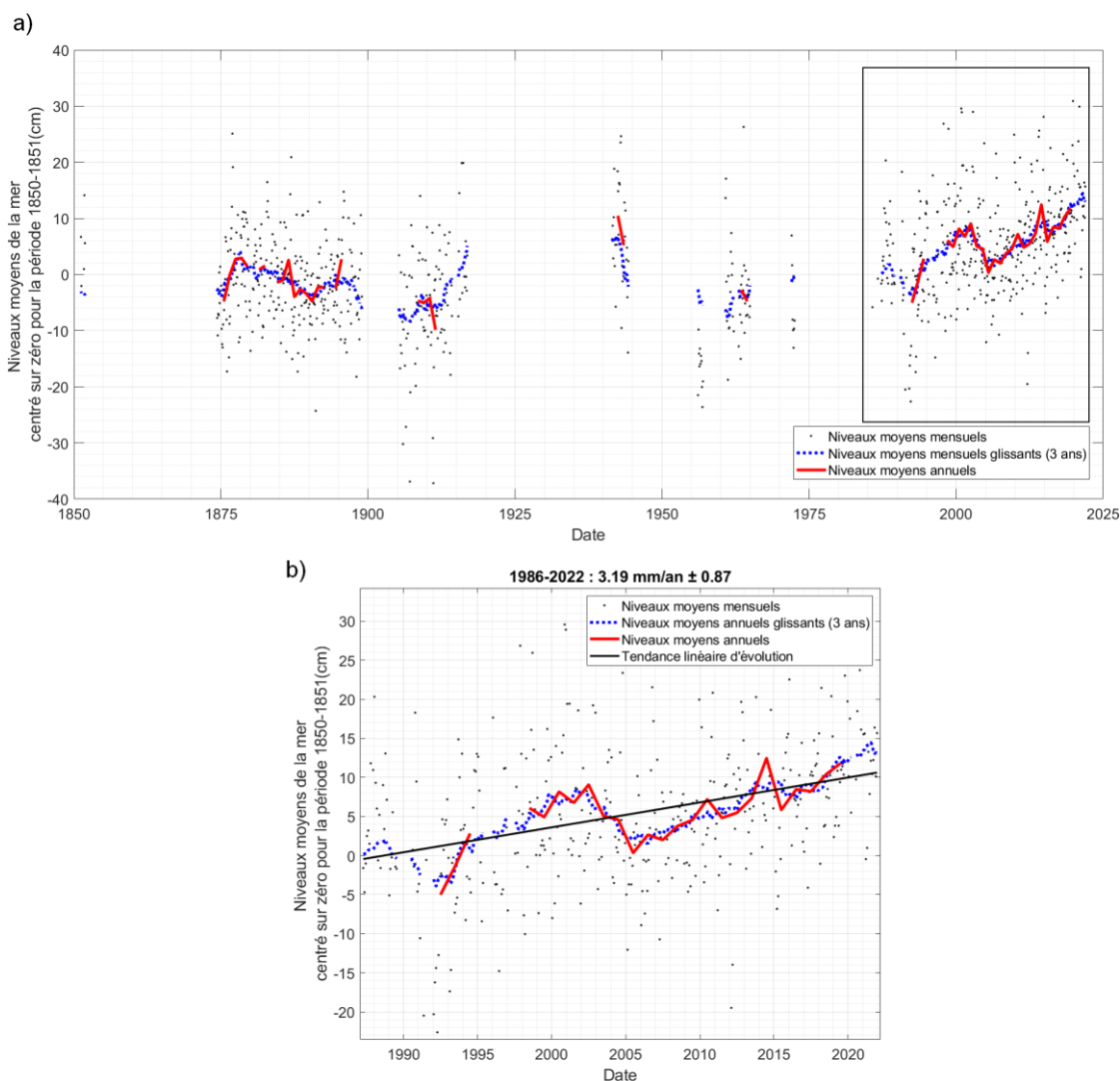


Figure 15 : Évolution des niveaux moyens mensuels (en noir) et annuels (en rouge) calculés pour la série reconstruite de Saint-Malo. Les niveaux moyens annuels correspondent à la moyenne arithmétique des moyennes mensuelles pondérées par le nombre de jours effectivement observés dans le mois. La valeur est calculée si au moins 11 valeurs mensuelles sont effectivement disponibles¹⁸. En bleu sont représentées des moyennes mensuelles glissantes (sur 3 ans) et mettent en évidence les fortes fluctuations du niveau de la mer d'une année sur l'autre. a) Sur toute la période reconstruite [1850-2022] ; b) zoom sur la période récente [1986-2022] avec la tendance linéaire calculée associée.

¹⁸ Pour plus d'informations sur le calcul des niveaux moyens : <https://www.sonel.org/Calcul-des-niveaux-moyens.html>

Sur l'ensemble de la série, les nombreuses lacunes ne permettent pas d'obtenir une série de niveaux moyens continus. Néanmoins, les niveaux moyens annuels calculés sur la période 1875-1917 sont globalement inférieurs à ceux obtenus sur les dernières décennies (1990-2021), ce qui révèle une augmentation du niveau de la mer, depuis la fin du 20^{ème} siècle (Figure 15b).

Lors du traitement des données marégraphiques, les mouvements verticaux du sol ont été considérés comme nuls au cours du temps et n'ont donc pas été pris en compte dans les corrections à appliquer aux mesures. Une antenne GNSS a été installée par SONEL¹⁹ depuis 2010 à Saint-Malo et donne une vitesse verticale de l'ordre de $-0,75 \pm 0,47 \text{ mm.an}^{-1}$, des tendances calculées sur plus d'une dizaine d'années de mesure sont considérées ici comme statistiquement fiables. Néanmoins, les travaux de Dodet et al. (2019) sur les variations du niveau marin le long des côtes françaises métropolitaines, montrent que les mouvements verticaux du sol jouent un rôle modéré, voir négligeable dans l'élévation relative du niveau des mers (sur les sites et stations considérés).

Les niveaux moyens calculés à partir de la série reconstruite révèlent bien une hausse non négligeable à l'échelle séculaire, particulièrement sur la deuxième moitié du 20^{ème} siècle (Figure 15b). Des rythmes d'évolution ont été calculés entre 1850 et 2021, pour différentes durées, à partir des niveaux moyens mensuels (Figure 16). En considérant les données initialement disponibles (1993-2021), la tendance obtenue est de $+3,25 \pm 1,08 \text{ mm.an}^{-1}$ (Tableau 3). En complétant la série avec les mesures inédites, la série comprenant initialement 28 ans de données passe à 72 ans d'observations continues cumulées et permet d'obtenir une tendance plus faible et également de réduire largement l'erreur-type associée à la tendance (Figure 16). Les tendances calculées varient en fonction de la longueur de la série temporelle, notamment lorsqu'on considère moins de 40 ans d'observation, en raison de l'influence des effets atmosphériques à grande échelle (exemple : ENSO, NAO, ...) (Figure 16).

Sur la série complète (1850-2021), la tendance d'évolution du niveau de la mer obtenue à Saint-Malo / Saint-Servan est de $+0,61 \pm 0,11 \text{ mm.an}^{-1}$ (Tableau 3). Cette tendance est inférieure à ce qui est rapporté dans la littérature pour des périodes similaires concernant d'autres sites à proximité (Wahl et al., 2013). Une comparaison des tendances obtenues pour différentes durées est présentée dans le Tableau 4. Trois longues séries marégraphiques proches de Saint-Malo ont été sélectionnées (Brest, Saint-Nazaire et Newlyn). Les tendances indiquées dans le Tableau 4 sont issues de SONEL pour Brest et Newlyn et de Ferret (2016) pour Saint-Nazaire.

¹⁹ <https://www.sonel.org/?page=gps&idStation=1936>

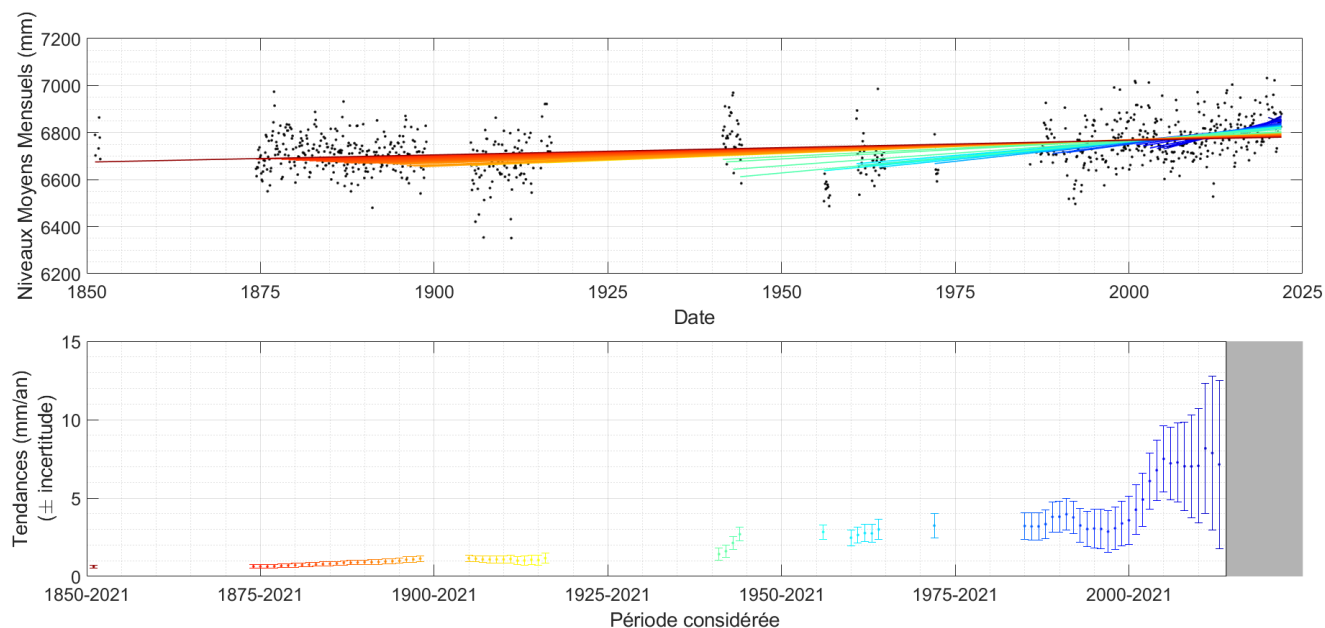


Figure 16 : Haut : Évolution des niveaux moyens mensuels pour la série reconstruit de Saint-Malo et tendances linéaires d'évolution en fonction de la durée de l'observation.

Bas : Évolution des tendances linéaires obtenues en fonction de la période considérée. Les effets atmosphériques à grande échelle influencent le calcul des tendances avec de fortes variabilités interannuelles. Plus les observations sont sur une période longue, plus les tendances seront stables et les incertitudes associées réduites. Les couleurs utilisées pour les tendances (droites de régression en haut et valeurs en bas) varient du bleu au rouge en fonction de la durée considérée pour effectuer le calcul (courtes et longues respectivement). A partir de 2013, on a moins de 10 ans de données disponibles et les tendances obtenues sont très variables d'une année à l'autre avec des incertitudes trop importantes pour être considérées comme significatives. Il a donc été décidé de ne pas les afficher sur la figure (zone en gris).

Comparé aux autres sites à proximité, le rythme d'évolution du niveau moyen à Saint-Malo/Saint-Servan semble plus rapide sur la période 1970-2021 mais reste majoritairement dans le même ordre de grandeur. Plus on allonge la série temporelle avec les données plus anciennes, plus les tendances d'évolution diminuent pour les 4 sites.

Tableau 3 : Les tendances d'évolution du niveau de la mer obtenus à Saint-Malo/Saint-Servan pour différentes périodes de temps.

Période considérée	Saint-Malo/Saint Servan
1850-2021	+0,61 ± 0,11 mm.an ⁻¹
1920-2021	+1,42 ± 0,38 mm.an ⁻¹
1993-2021	+3,25 ± 1,08 mm.an ⁻¹
2000-2021	+3,58 ± 1,55 mm.an ⁻¹

Ainsi, sur le dernier siècle (1900-2021), la tendance calculée pour Saint-Malo est de $+1,16 \pm 0,19 \text{ mm.an}^{-1}$, une tendance proche des valeurs obtenues pour la même période sur les ports à proximité, aux incertitudes près (Tableau 4).

Si on considère une échelle centennale, le niveau de la mer à Saint Malo s'est élevé **de 15-20 cm depuis les années 1910-1920 à un rythme de $1,42 \pm 0,38 \text{ mm.an}^{-1}$** (Tableau 3). L'élévation s'est intensifiée sur les dernières décennies avec des vitesses supérieures à 3 mm.an^{-1} dès les années 1970 (Tableau 3 et Tableau 4). A titre de comparaison, sur la période 1993-2021, les mesures du niveau marin réalisées par satellite révèlent une élévation de $3,15 \text{ mm.an}^{-1}$ pour la région Nord Atlantique²⁰.

Tableau 4 : Les tendances d'évolution du niveau de la mer obtenus à Saint-Malo/Saint-Servan et rapportés dans la littérature pour Brest, Saint-Nazaire et Newlyn (Ferret, 2016 ; SONEL). Les tendances pour les autres sites sont calculées sur des périodes approximativement proches de celles de Saint-Malo.

Période considérée	Saint-Malo/Saint-Servan	Brest	Saint-Nazaire	Newlyn
1970-2021	$+3,24 \pm 0,78 \text{ mm.an}^{-1}$	$+2,66 \pm 0,71 \text{ mm.an}^{-1}$ [1970-2018]	$+2,20 \pm 0,33 \text{ mm.an}^{-1}$ [1970-2014]	$+2,63 \pm 0,36 \text{ mm.an}^{-1}$ [1970-2018]
1950-2021	$+2,89 \pm 0,45 \text{ mm.an}^{-1}$	$+1,96 \pm 0,49 \text{ mm.an}^{-1}$ [1950-2018]	$+1,59 \pm 0,22 \text{ mm.an}^{-1}$ [1950-2014]	$+1,91 \pm 0,22 \text{ mm.an}^{-1}$ [1950-2018]
1900-2021	$+1,16 \pm 0,19 \text{ mm.an}^{-1}$	$+1,59 \pm 0,24 \text{ mm.an}^{-1}$ [1900-2018]	$+0,68 \pm 0,22 \text{ mm.an}^{-1}$ [1909-2014]	$+1,85 \pm 0,12 \text{ mm.an}^{-1}$ [1900-2018]

6.1.2. Évolution des composantes harmoniques

Le phénomène de marée peut être perçu comme un mouvement régulier mais n'est pas forcément périodique. C'est par le biais de l'analyse harmonique qu'il est possible de séparer un certain nombre de composantes de marée du signal total. Chaque composante, appelée également onde harmonique, possède une amplitude et une phase, qui sont dépendantes de chaque site de mesure. L'amplitude correspond à la hauteur maximale à laquelle la composante contribue à la marée. La phase est le moment auquel cette hauteur est atteinte, par rapport à un temps de référence (Parker, 2007).

Des changements dans le régime hydrologique, la bathymétrie et les processus associés (par exemple, les taux de sédimentation) peuvent influencer le phénomène de marée localement (Haigh et al., 2020). Si la marée évolue, les composantes harmoniques vont également évoluer. Ainsi, étudier l'évolution des composantes harmoniques principales peut être intéressant lorsqu'on s'intéresse au phénomène de marée à long-terme. Des analyses harmoniques annuelles sur la série de Saint-Malo ont permis d'extraire les ondes principales de marée et sont

²⁰<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level/data-acces.html#c12195>

présentées en Figure 17. Les amplitudes et les phases d'une grande majorité des ondes principales sont stables au cours du temps (S2, N2, K2 et K1). En revanche, les ondes lunaires (M2, M4 et M6) sont plus variables, avec des amplitudes qui diminuent au cours du temps pour M2 et M4 mais qui augmentent pour M6. Pour les phases, M2, M4 et M6 tendent à diminuer depuis 1850.

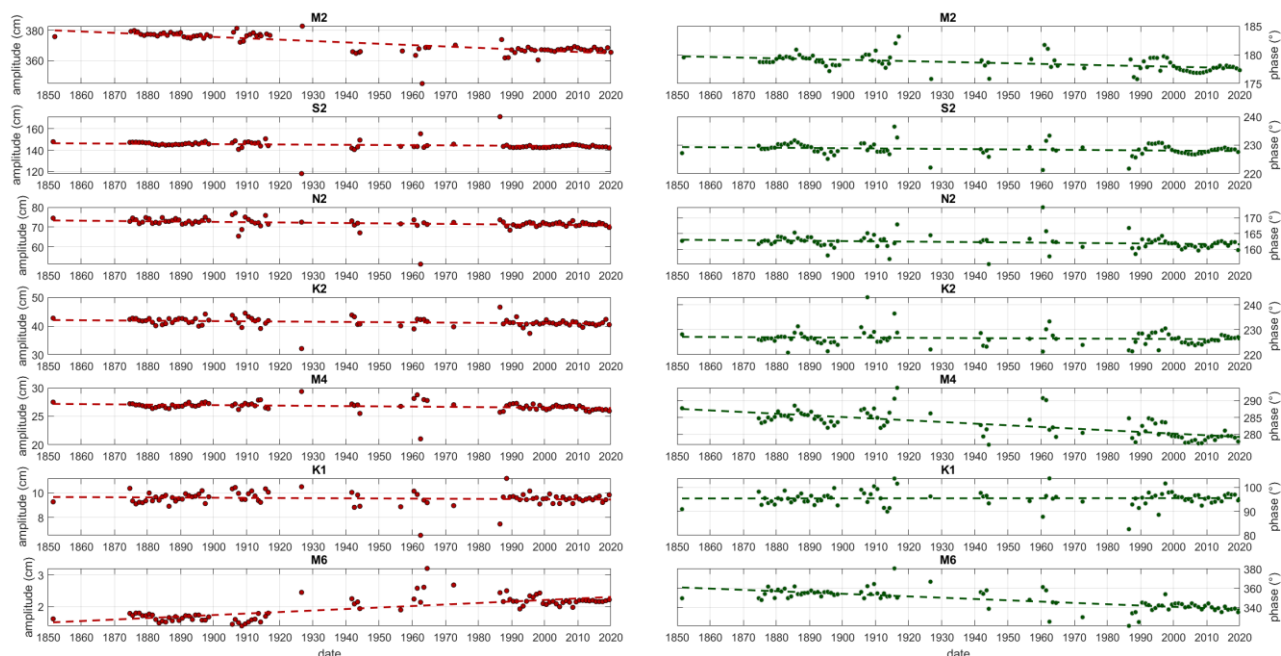


Figure 17 : L'évolution des amplitude (gauche, rouge) et la phase (droit, vert) des ondes différentes de la marée à Saint-Malo. De haut en bas : onde M2, S2, N2, K2, M4, K1 et M6.

Des analyses similaires ont été réalisées sur des sites à proximité, **mais il ne se dégage pas de tendances régionales en termes d'évolution des ondes principales**. Depuis 1850 à Brest, l'onde M2 a diminué de l'ordre de $-0,07 \pm 0,05 \text{ mm.an}^{-1}$ (Haigh et al., 2020) mais la tendance s'inverse lorsqu'on s'intéresse à la période 1910-2020 : $+0,13 \pm 0,11 \text{ mm.an}^{-1}$ (Pineau-Guillou et al., 2021). Globalement, pour les sites d'Europe de l'Ouest depuis 1910, Pineau-Guillou et al. (2021) obtiennent des tendances positives comprises entre $+0,13$ à $+2,02 \text{ mm.an}^{-1}$.

6.2. ÉTUDE DU MARNAGE

Le marnage est la différence de niveau entre la marée haute et la marée basse successive. Quelles que soient les incertitudes restantes liées au recalage vertical de données, il est vraisemblable que s'il subsiste des décalages verticaux non corrigés, ils se mettent en place sur des périodes relativement longues. La majorité des sauts se mettant en place sur une courte durée ont été corrigés ou supprimés lors de la phase de validation des données. Ainsi, le calcul de l'évolution long-terme du marnage peut être réalisé de manière relativement fiable.

Le marnage a été calculé pour la série reconstruite de Saint-Malo/Saint-Servan. Les PM et les BM extraites des données continues ont été ajoutées aux relevés ponctuels de PM et BM pour

calculer le marnage mensuel moyen dès qu'au moins 30 valeurs de marnage étaient disponibles par mois, soit environ 15 jours de données (Figure 18).

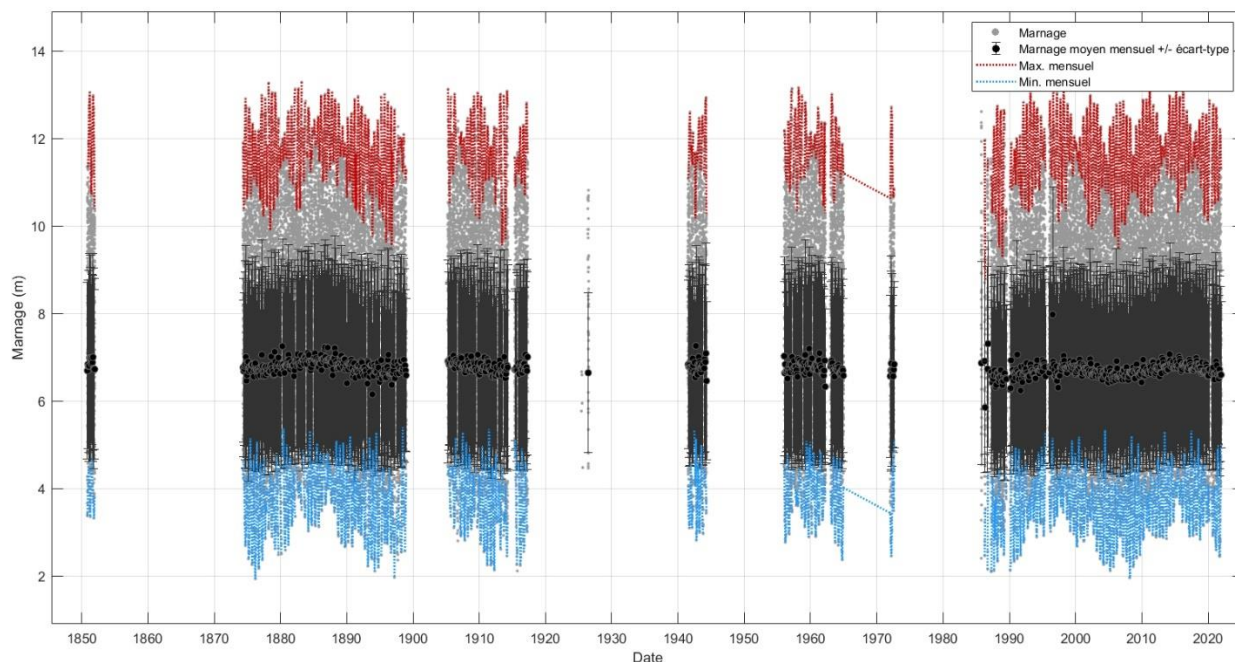


Figure 18 : Évolution du marnage mensuel moyen à Saint-Malo depuis 1850. Gris = marnage ; rouge = hauteur maximale mensuelle ; bleu = hauteur minimale mensuelle ; noir : le marnage moyen mensuel et les écart types.

Des tendances d'évolution ont été calculées pour les différents niveaux obtenus au cours du temps (Tableau 5 ; Figure 19).

Tableau 5 : Tendance d'évolution du marnage et erreurs-type des tendances calculées.

Marnage mensuel	Tendance [1850-2022]
Moyen	-0,79 mm.an ⁻¹ ± 0,18
Maximal	-1,00 mm.an ⁻¹ ± 0,92
Minimal	-0,74 mm.an ⁻¹ ± 0,88

Les tendances calculées semblent indiquer **une diminution du marnage moyen, maximum et minimum à Saint-Malo** et sont différentes de celles trouvées à Saint-Nazaire (+2 mm.an⁻¹ pour la période 1863-2015 (Ferret, 2016)) ou à Dunkerque (+1,25 mm.an⁻¹ pour la période 1865-2019 (Latapy, 2020)) mais sont cohérentes avec les tendances obtenues sur de nombreux sites des îles britanniques (entre -1,8 et +1,3 mm.an⁻¹) (Woodworth et al., 1991). De plus les valeurs obtenues pour le marnage minimum et maximum sont globalement dans la marge d'erreur et ne permettent pas de dégager une tendance générale.

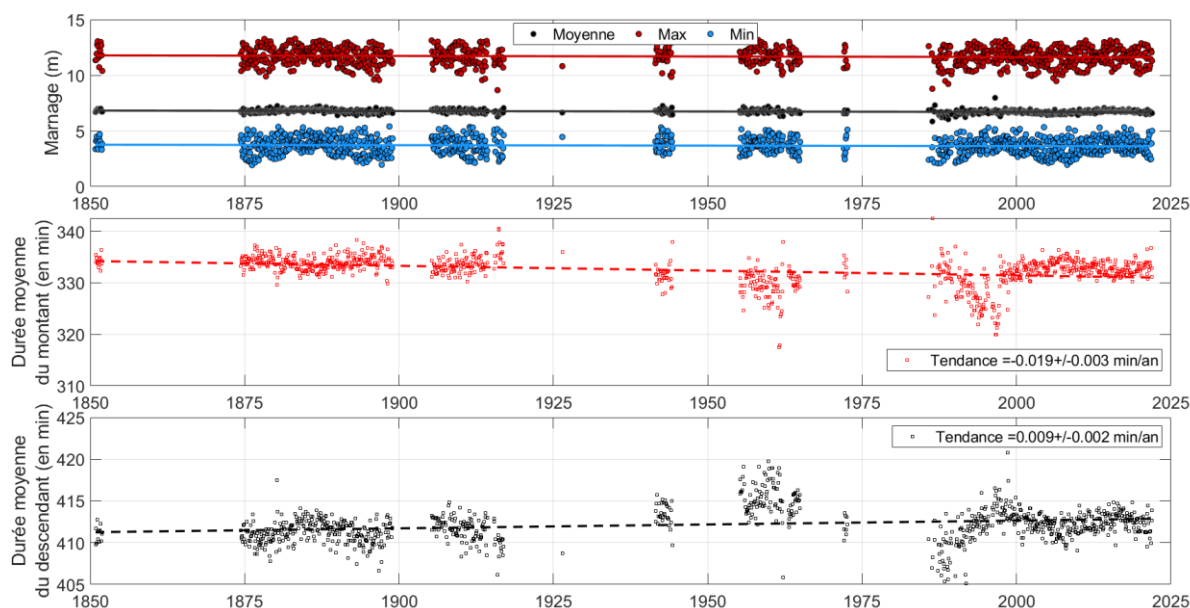


Figure 19 : Évolution des marnages mensuels maximaux (rouge), moyens (noir) et minimaux (bleu) à Saint-Malo (haut) et l'évolution des durée moyenne du montant (milieu) et du descendant (bas).

Des travaux antérieurs ont montré que sur les îles britanniques, **l'évolution du marnage était corrélée à l'évolution long-terme de la composante harmonique M2** (Woodworth et al., 1991). Comme l'illustre la Figure 17, l'amplitude et la phase de l'onde M2 tend à diminuer à Saint-Malo depuis 1850. **Il est possible que pour Saint-Malo, l'évolution de l'onde M2 ait une influence sur le marnage, d'où la diminution observée sur plus d'un siècle.**

Par ailleurs, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la durée du montant et du descendant afin de voir s'il y avait eu des changements au cours du temps dans la propagation de l'onde de marée. Les résultats de cette étude sont présentés dans la Figure 19. **La durée moyenne du montant semble diminuer depuis 1850 tandis qu'à l'inverse, le descendant semble durer plus longtemps sur les périodes récentes.** Des tendances ont été estimées, le montant tendrait à diminuer de $0,019 \text{ min.an}^{-1} (\pm 0,003)$ et le descendant augmenterait de $0,009 \text{ min.an}^{-1} (\pm 0,002)$. Une étude similaire a été réalisée par Haigh et al. (2010) à partir de plusieurs sites autour de la Manche. Cette étude avait révélé que sur la plupart des sites étudiés, les auteurs observaient une augmentation statistiquement significative de la durée de la marée descendante et une diminution de la marée montante. En revanche, les tendances sont faibles, de l'ordre de 1-5 minutes.siecle⁻¹ (Haigh et al., 2010). À titre comparatif, pour Brest, les auteurs ont obtenu les tendances suivantes : $-0,009 \text{ min.an}^{-1} (\pm 0,002)$ pour le montant et $+0,009 \text{ min.an}^{-1} (\pm 0,002)$ pour le descendant. Ces tendances sont très proches de celles obtenues à Saint-Malo et semble indiquer une évolution générale similaire.

6.3. LES SURCOTES ET LES EVENEMENTS EXTREMES A SAINT-MALO

L'étude des niveaux extrêmes se fait à travers l'analyse de plusieurs indices. La surcote/décote instantanée est la différence entre la hauteur d'eau observée (h_{obs}) et celle prédites (h_{pred}) à un instant t . Une surcote est marquée par une différence positive ($h_{obs} > h_{pred}$) et une décote est marquée par une différence négative ($h_{obs} < h_{pred}$). La surcote de PM est utilisée plus souvent que la surcote instantanée dans les analyses de série marégraphique reconstruite. **Cette mesure correspond à la différence entre la hauteur de PM observée et cela de PM prédite** et elle est moins sensible aux décalages en temps (comme c'est également le cas pour les résidus, cf. section 5.2).

Les composantes harmoniques et les niveaux moyens de la mer ont évolué au cours du temps (cf. section 6.1.1 et 0). Pour représenter au mieux les conditions hydrodynamiques de l'époque, les prédictions de marée utilisées pour le calcul des SPM ont été obtenues à partir de plusieurs jeux de constantes ([1850-1875], [1876-1900], [1901-1914], [1915-1938], [1939-1970], [1971-2000] et [2001-2022]).

Les facteurs les plus influents sur la variation du niveau d'eau, et donc sur les surcotes, sont le vent et la pression atmosphérique. Les vents forts poussent les masses d'eau vers les côtes et vers l'intérieur des estuaires et engendrent des surcotes. À ce phénomène s'ajoute l'effet des basses pressions atmosphériques (phénomène de baromètre inverse ; cf. section 4.3). Une chute barométrique de 10 hPa se répercute sur un plan d'eau avec une augmentation de 10 cm.

Pour la période 1851-1917, la pression atmosphérique était mesurée plusieurs fois par jour (cf. section 4). Pour les autres années, des réanalyses de pressions atmosphériques ont été utilisées :

- Le **NOAA 20CR**²¹. Cette réanalyse est produite par le NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) aux Etats-Unis et assimile uniquement des données de pression en surface pour générer les réanalyses, les autres variables sont estimées implicitement par le modèle. Cette réanalyse couvre l'intégralité du globe entre 1836 et 2015 avec un pas de temps trihoraire et une résolution spatiale de $1^\circ \times 1^\circ$. Nous avons utilisé la pression atmosphérique réduite au niveau moyen de la mer dans la cadre du PAPI St Malo.
- Le **ERA5**²². Cette réanalyse d'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) utilisée dans l'étude du Shom pour l'axe 2 (livrables 2 et 4), assimile des données modélisées avec les observations pour générer une réanalyse d'un grand nombre de paramètres atmosphériques, océanographiques et terrestres. Des moyennes ainsi que des estimations d'incertitudes sont disponibles et couvre l'intégralité du globe à partir de 1950 avec une résolution spatiale de $0,25^\circ$ (réanalyse) ou $0,5^\circ$ (estimation d'incertitude). Nous avons utilisé les données de la pression

²¹ https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/

²² <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>

atmosphérique à partir de 2015 jusqu'à aujourd'hui avec une résolution temporelle d'une heure.

Une analyse des surcotes de pleines mers (SPM) pour la série reconstruite de Saint-Malo est faite et les 20 SPM principales ont été identifiées (Figure 20 ; Tableau 6 ; ANNEXE I). Les événements identifiés à partir de la série reconstruite inédite ne correspondent pas forcément aux tempêtes ayant le plus impacté le territoire Malouin. En effet, nous avons uniquement calculé ici les surcotes maximales survenues lors de la pleine mer, et ne nous sommes pas intéressés, comme ce fut le cas dans le Livrable 2 de l'Axe 2 du PAPI Saint-Malo (Seyfried et al., 2020), aux paramètres météo-marins (houle et vent). Ces derniers peuvent fortement influencer sur le risque de submersion littoral. Néanmoins, les SPM récents (1990-2020) identifiées dans la présente étude sont cohérents avec les événements et valeurs calculées dans le Livrable 2 de l'Axe 2 du PAPI Saint-Malo. Ces SPM correspondent aux événements extrêmes qui sont parfois rapportés et nommés officiellement, comme les tempêtes Oratia (30 octobre 2000) et celle du 5 janvier 1998 (sans nom, Météo France²³).

Tous ces événements ont eu lieu pendant la période hivernale (novembre à fin mars), à l'exception des événements du 14 octobre 1891, du 25 septembre 1896, du 31 octobre 1967 et du 30 octobre 2000, qui ont eu lieu pendant l'automne.

La Surcote de Pleine Mer (SPM) la plus importante, d'une valeur de 1,1 m, a eu lieu lors de la tempête Oratia, le 30 octobre 2000 (Tableau 6 ; ANNEXE IV ; Figure 20). Cet événement s'est produit lors d'une pleine mer de vive-eau, atteignant une hauteur d'eau de 13,14 m. Le 10 mars 1982, pour une hauteur d'eau équivalente et un fort coefficient de marée (102), la SPM calculée est moindre (74 cm). Cette tempête a également été recensée par Seyfried et al. (2020) dans le cadre de l'Axe 2 du PAPI Saint-Malo : des rafales à 110 km/h ont été enregistrés à Saint-Malo pour cet événement. Ces valeurs sont toutefois inférieures au niveau des PHMA (Plus Hautes Mers Astronomiques) calculées par le Shom, estimée à 13,59 m par rapport au ZH dans le RAM²⁴ (2020).

Dans le Tableau 6, la seconde plus haute SPM est de 87 cm, enregistrée le 1^{er} mars 1882. Cette surcote a été également observée à Brest (Daubord et al., 2015). A Saint-Malo, les vents sud-ouest de force 8 enregistrés couplés à la forte dépression atmosphérique ont probablement accentué la surcote observée.

²⁴ <https://diffusion.shom.fr/pro/references-altimetriques-maritimes-ram.html>

Tableau 6 : Liste des 20 surcotes de pleines mers (SPM) identifiées à Saint-Malo à partir des données reconstruites. Pour chaque évènement, la date, l'heure, la hauteur de la surcote et de la pleine mer sont indiquées. De plus, à titre indicatif, les coefficients de marée pour chaque évènement sont également rapportés. La septième colonne indique si l'évènement tempétueux a déjà été rapporté ou identifié dans des bases de données. L'indication « Météo-France » signifie que la tempête est listée sur le site de Météo-France²⁵; l'indication BD-TSH correspond à la Base de Données Tempêtes et Submersions Historiques développée par l'IRSN²⁶ recensant tout type de documents relatifs à des tempêtes ou des submersions historiques sur le littoral Manche et Atlantique. Lorsque les événements ont également été inventoriés dans le cadre de l'Axe 2 du PAPI Saint-Malo, il est indiqué le nom du livrable. Les remarques relatives aux événements sont ajoutées sur la dernière colonne, les informations sur la force du vent et sur les états de mer ont été trouvées dans les journaux bimensuels de marée.

Id.	Date	Heure PM (TU)	Surcote PM (m)	Hauteur de PM (m)	Coef. de marée	Tempête rapportée	Remarques diverses
1	1850-12-16	16h19	0,70	11,45	68		"La mer [est] grosse"
2	1874-12-11	07h10	0,70	11,93	74	BD-TSH	Vent de force 8 Bft de Sud-Ouest
3	1875-11-11	04h20	0,68	11,90	78	BD-TSH	Vent de force 9 Bft
4	1881-12-20	05h18	0,80	12,27	79		Vent de force 8 Bft
5	1882-03-01	03h48	0,87	10,58	52	BD-TSH	Vent de force 8 Bft de Sud-Ouest
6	1883-02-02	12h53	0,75	9,24	34		Vent de force 8/9 Bft
7	1891-10-14	03h28	0,79	10,61	56		Vent de force 8 Bft
8	1896-09-25	07h34	0,69	12,42	81	BD-TSH	
9	1916-11-05	02h09	0,77	10,40	56		Vent de force 5 Bft
10	1943-01-13	23h35	0,70	10,40	54	BD-TSH	
11	1957-03-20	08h50	0,73	12,64	91		
12	1957-11-04	03h35	0,71	10,84	59		
13	1961-02-06	09h18	0,67	11,57	72		
14	1966-02-25	08h52	0,74	11,84	76		
15	1967-10-31	04h16	0,69	11,94	83	Livrable 2 Axe 2 PAPI Saint-Malo	
16	1982-03-10	18h58	0,74	13,14	102	Livrable 2 Axe 2 PAPI Saint-Malo	
17	1998-01-05	10h59	0,69	11,48	61	MétéoFrance	

²⁵ Site-web Météo France tempêtes de 1703 à 2020 : <http://tempetes.meteo.fr/spip.php?rubrique6>

²⁶BD-TSH: <https://gforge.irsnn.fr/gf/project/bdts/>

						BD-TSH Livrable 2 Axe 2 PAPI Saint-Malo	
18	1998-01-18	09h14	0,68	11,58	66	BD-TSH	
Oratia	2000-10-30	07h37	1,10	13,14	87	MétéoFrance BD-TSH Livrable 2 Axe 2 PAPI Saint-Malo	
20	2002-11-14	01h55	0,79	9,66	41	BD-TSH Livrable 2 Axe 2 PAPI Saint-Malo	

La surcote de pleine mer du 5 janvier s'inscrit dans une série de quatre tempêtes qui concernent le nord de la France entre la Bretagne et le Nord-Pas de Calais. Tous les jours entre le 2 et le 5 janvier, une dépression traverse rapidement les régions proches de la Manche et génère des vents forts²⁷. Ces pics de dépression sont particulièrement visibles sur le graphique de l'évènement, en ANNEXE IV. De nombreuses surcotes ont été enregistrées sur d'autres sites à proximité. Par exemple, à Cherbourg, une surcote de 61 cm est observée (Roche et al., 2014).

Pour les événements passés, la démarche est plus complexe, l'utilisation de réanalyses ou d'observations de pression atmosphérique permet de confirmer dans une certaine mesure la véracité de la surcote. Mais confirmer l'évènement par le biais de documents ou d'informations annexes permet de donner un poids supplémentaire à l'évènement. Une recherche dans la base de données TSH ou dans les tempêtes recensées sur la période 1703-2018 dans le cadre du livrable 2 de l'Axe 2 a permis de confirmer de nombreux événements historiques (Tableau 6) en donnant des informations complémentaires. Par exemple, la surcote du 25 septembre 1896 s'est produite lors d'un coup de vent important ressenti tout le long de la façade Atlantique : « *Après les temps incertains de ces derniers jours, les brusques coups de vent, les ondées subites, les grains successifs, les variations du baromètre, on pouvait s'attendre à une tempête. [...] On signale des dégâts à Poitiers, à Périgueux, à Bergerac, à Rochefort, à Royan, à Saintes, à Bordeaux, sur toute la côte enfin. À Brest le trois-mâts Marie s'est échoué* »²⁸.

De même, la surcote du 11 novembre 1875 correspond à un événement également observé en Vendée²⁹.

Cette série marégraphique inédite et les événements extrêmes identifiés pourraient, dans le futur, réalimenter l'étude climatologique réalisée dans l'axe 2 du PAPI Saint-Malo et permettrait d'affiner les résultats de modèle.

²⁷ <http://tempetes.meteo.fr/spip.php?article176>

²⁸ Journal de la Charente Inférieure, 26 Septembre 1896. Archives Départementales de la Charente Maritime.

²⁹ Procès-verbal de Gendarmerie, Brigade de Chaillé-les-Marais, le 11 novembre 1875 (Archives Départementales de la Vendée, 1M559), in GEOS, DHI, 2013 Études des Aléas Naturels sur le « Sud Vendée et Marais Poitevin », Annexe A, p. A-7 et p. A-63.

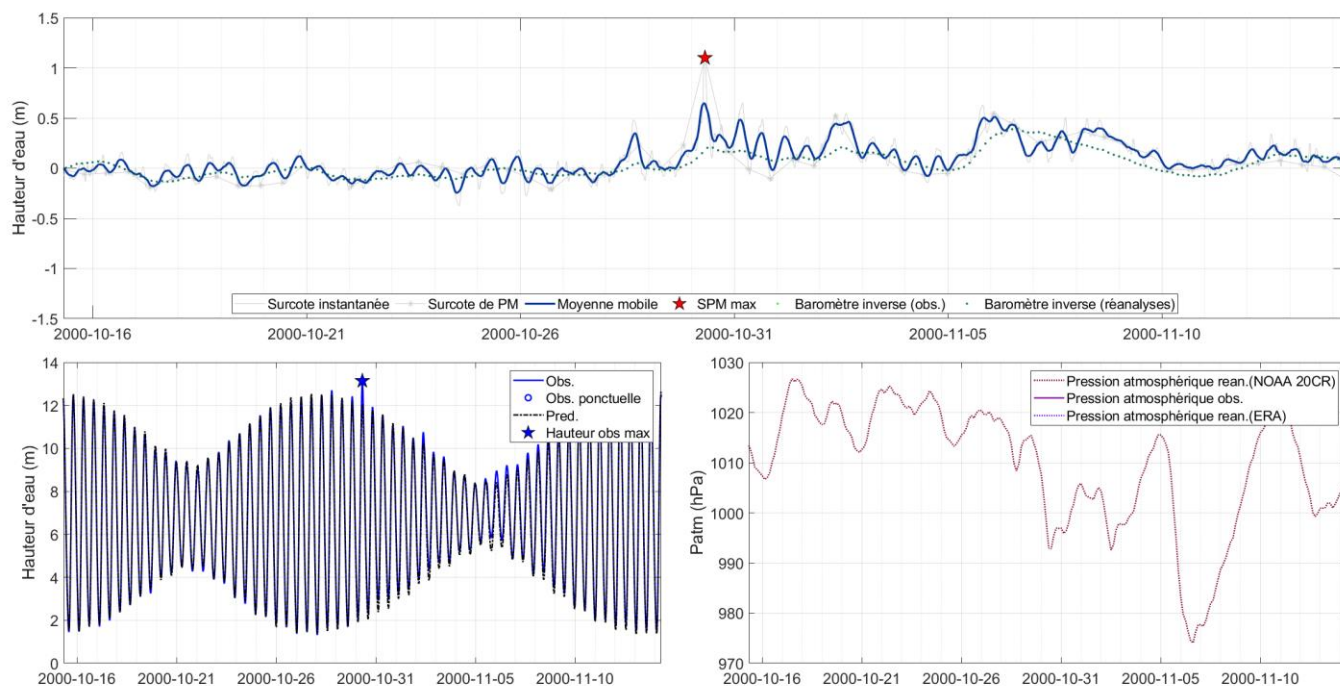


Figure 20 : La surcote principale de PM (SPM) à Saint-Malo identifiée pour la 30 octobre 2000 (surcote de 1,10 m). Haut : surcotes/décotes instantanées (en gris), surcotes/décotes de pleine mer (gris étoile) et la moyenne mobile des résidus (bleu), baromètre inverse calculé à partir des mesures de pression atmosphérique [1851-1917] (vert clair) et le baromètre inverse calculé à partir des réanalyses modélisées (NOAA 20CR ou ERA5) (vert foncé). La surcote de PM de l'évènement considéré est indiquée par une étoile rouge. Bas gauche : une visualisation du signal de marée avec les hauteurs observées (bleus) et prédites (noir) et la hauteur observée maximale pour l'évènement considéré (étoile bleu). Bas droite : La pression atmosphérique observée (ligne continue violette) et/ou modélisée par la méthode NOAA 20CR (ligne pointillée rose) ou l'ERA5 (ligne pointillée violette).

7. CONCLUSION

Dans le cadre du programme d'actions de prévention des inondations (PAPI) de Saint-Malo, le Shom est notamment chargé de la numérisation des données marégraphiques analogiques du marégraphe de Saint-Malo afin d'améliorer la connaissance du risque lié aux phénomènes de submersion marine (Axe 1, Action 1.II). Cette action a pour objectif la reconstruction de la série marégraphique historique de Saint-Malo : il s'agit de rechercher, collecter, numériser et valider les différents marégrammes analogiques disponibles depuis le 19^{ème} siècle dans les archives de différents établissements, afin d'aboutir à une série temporelle de hauteurs d'eau historique fiable.

La première étape de ce projet a consisté à rechercher et inventorier l'ensemble des documents qui comprennent des mesures de hauteurs d'eau ou sont en lien avec des mesures marégraphiques (métadonnées) prises à Saint-Malo (livrable n° 1).

Au total, **14 000 registres de marée et 2 000 marégrammes** ont été numérisés soit environ 300 Go d'images numériques traitées dans le cadre de cette étude. Les registres et marégrammes numérisés lors de la reconstruction de la série Saint-Servan/Saint-Malo, ont produit **1 million de valeurs saisies** (livrable n° 2). Par ailleurs, plus de 160 documents qualifiés de métadonnées ont été retrouvés et exploités. Dans l'ensemble, la série couvre une période d'environ 180 ans, depuis 1835. Ce projet a permis de numériser environ **125 ans de mesures cumulées** du niveau marin présentant toutefois parfois des lacunes. Les mesures disponibles sont très diverses et peuvent être des hauteurs de PM et/ou BM, des hauteurs horaires ou en continue (5 min). Ces mesures sont prises sur deux sites différents, l'anse Solidor à Saint-Servan et au port de Saint-Malo. En plus des mesures de hauteurs d'eau, des mesures météorologiques sont disponibles pour la période de 1850-1917. Les valeurs de pression atmosphérique ont été saisies et ont permis de calculer l'effet du baromètre inverse. L'utilisation de ces données a permis de confirmer les surcotes et les événements extrêmes identifiés.

La cohérence et la qualité de la série finale a pu être vérifiée par l'analyse des métadonnées et du contrôle des données numérisées. La série a été homogénéisée verticalement (correction du zéro hydrographique ou le zéro du marégraphe/échelle) et temporellement (conversion TSV/TSM/heure locale en TU). Les hauteurs d'eau sur les autres périodes temporelles ont été vérifiées et, si nécessaire, corrigées ou supprimées. Cette étape de contrôle et de validation est très fastidieuse car elle implique des aller-retours réguliers aux documents originaux. La plupart de ces corrections restent ponctuelles, exceptées sur 4 grandes périodes de temps pour lesquelles les données numérisées ont dû être supprimées, car considérées comme trop douteuses : [1734-1735], [1835-1841], [1851-1873] et [1946-1954]. Des étiquettes de qualités ont été attribuées aux données ; **87,5% des mesures sont de (probablement) bonne qualité** (83% étiqueté 1, 4.5% étiqueté 2), ce qui est très satisfaisant pour une série marégraphique historique.

Le travail réalisé dans le cadre de ce projet a **permis la reconstruction d'une série composite à partir de mesures faites à Saint-Servan et à Saint-Malo**. Les analyses des résidus en hauteur et en temps ont permis de valider les corrections réalisées sur les données. Ce long travail de construction a conduit à la production de fichiers numériques des séries temporelles, qui sont fournis en complément de ce rapport (ANNEXE V).

Des niveaux moyens (journaliers, mensuels et annuels) ont été calculés. La tendance **d'évolution du niveau de la mer** obtenue pour la série complète (**1850-2021**) à Saint-Malo est de **+0,61 ± 0,11 mm.an⁻¹**, ce qui est inférieur à celles rapportées dans la littérature pour des sites à proximité de durée équivalente. Cependant, la tendance d'évolution pour le dernier siècle (1900-2021) est **+1,16 ± 0,19 mm.an⁻¹** ce qui est plus en accord avec les tendances obtenues à Brest, Saint-Nazaire et Newlyn sur la même période.

Une série temporelle du marnage a été extraite également de la série reconstruite de Saint-Malo. Au cours du temps, **les marnages mensuels (moyen, maximal et minimal)** tendent à diminuer de **-0,79, -1,00 et -0,74 mm.an⁻¹**, respectivement. Ces valeurs sont différentes de celles obtenues sur d'autres ports français, mais dans la même gamme de valeurs que les tendances estimées pour de nombreux sites des îles britanniques. Par ailleurs, la **durée du montant tendrait à diminuer de 0,019 min.an⁻¹** alors que la **durée du descendant tendrait à augmenter de 0,009 min.an⁻¹**. Ces valeurs sont cohérentes avec celles d'autres sites en France (par ex. Brest) et autour de la Manche.

La série temporelle inédite a permis d'identifier des événements extrêmes passés non considérés jusqu'alors. Au total, à partir de la série reconstruite inédite, **20 événements extrêmes** sont décrits dans ce livrable, caractérisés par des **surcotes de pleine mer entre 67 cm et 1,1 m**. Les événements ont été croisés avec les informations contenus dans plusieurs bases de données (MétéoFrance et/ou BD-TSH) et ont permis de confirmer une dizaine d'événements. Les 20 événements extrêmes sont survenus durant la période hivernale (sauf quatre qui ont eu lieu en automne) et coïncident avec une dépression météorologique (basse pression atmosphérique) et/ou des vents importants. Les 20 événements historiques pourraient, à termes, réalimenter l'étude climatologique effectuée dans l'axe 2 du PAPI Saint-Malo et permettrait d'affiner les résultats de modèle. L'intégration des surcotes historiques permettrait également d'améliorer les analyses statistiques des niveaux marins extrêmes de la zone d'étude.

Dans l'ensemble, le travail réalisé a permis d'obtenir une série temporelle la plus quantitative possible. Cette série contribue à l'amélioration de la connaissance et de la conscience du risque côtier à Saint-Malo.

8. RÉFÉRENCES

- Candès, A.-M., Latapy, A., Pouvreau, N., 2021. PAPI SEUDRE - 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. Shom.
- Daubord, C., André, G., Goirand, V., Kerneis, M., 2015. Rapport technique final NIVEXT : NIVEaux marins EXTrêmes. Shom.
- Dodet, G., Bertin, X., Bouchette, F., 2019. Characterization of Sea-level Variations Along the Metropolitan Coasts of France: Waves, Tides, Storm Surges and Long-term Changes. *Journal of Coastal Research* 88, 10–24. <https://doi.org/10.2112/SI88-003.1>
- 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. Université de La Rochelle, La Rochelle.
- Haigh, I., Nicholls, R., Wells, N., 2010. Assessing changes in extreme sea levels: Application to the English Channel, 1900–2006. *Continental Shelf Research* 30, 1042–1055. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.02.002>
- Haigh, I.D., Pickering, M.D., Green, J.A.M., Arbic, B.K., Arns, A., Dangendorf, S., Hill, D.F., Horsburgh, K., Howard, T., Idier, D., Jay, D.A., Jänicke, L., Lee, S.B., Müller, M., Schindelegger, M., Talke, S.A., Wilmes, S.-B., Woodworth, P.L., 2020. The Tides They Are A-Changin': A Comprehensive Review of Past and Future Nonastronomical Changes in Tides, Their Driving Mechanisms, and Future Implications. *Reviews of Geophysics* 58, e2018RG000636. <https://doi.org/10.1029/2018RG000636>
- Landre, N., 1974. Fichier Technique des estuaires bretons - La Rance (Rapport).
- 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). Université Littoral Côte d'Opale.
- Parker, B.B., 2007. Tidal analysis and prediction. NOAA, NOS Center for Operational Oceanographic Products and Services, Silver Spring, MD.
- Pineau-Guillou, L., Lazure, P., Wöppelmann, G., 2021. Large-scale changes of the semidiurnal tide along North Atlantic coasts from 1846 to 2018. *Ocean Science* 17, 17–34. <https://doi.org/10.5194/os-17-17-2021>
- 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. Université de La Rochelle, La Rochelle.
- Roche, A., Baraer, F., Cam, H., Madec, T., Gautier, S., Jan, G., Goutx, D., 2014. Projet VIMERS : une typologie des tempêtes bretonnes pour prévoir l'impact des tempêtes à venir et mieux s'y préparer. pp. 925–932. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.102>
- Rouzé, M., 1959. Diagrammes no. 31. L'énergie des marées.
- Seyfried, L., Vrignaud, C., Jourdan, D., Michaud, H., Lathuillière, C., 2020. Livrable n°2 : Analyse et prise de connaissance de la zone - inventaire des données météorologiques et océanographiques - Axe 2 "Surveillance,prévision des crues et des inondations". Action 2.I "Amélioration de la connaissance des risques de submersion marine," PAPI Saint-Malo.
- Simon, B., 1986. Observation simultanée de la marée à St Malo et à St Servan (No. 445 EPSHOM/E/OC/NP). Shom.
- van den Beld, I., Latapy, A., Pouvreau, N., 2021. Projet EZPONDA - Rapport du partenaire Shom - Axe 2 Niveau d'eau anciens. Shom.
- Wahl, T., Haigh, I.D., Woodworth, P.L., Albrecht, F., Dillingh, D., Jensen, J., Nicholls, R.J., Weisse, R., Wöppelmann, G., 2013. Observed mean sea level changes around the North Sea coastline

- from 1800 to present. *Earth-Science Reviews* 124, 51–67.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.003>
- Woodworth, P.L., Shaw, S.M., Blackman, D.L., 1991. Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline. *Geophysical Journal International* 104, 593–609. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb05704.x>

ANNEXE I

Synthèse de documents identifiés et traités dans le cadre de la reconstruction marégraphique de Saint-Malo.

TSM = Temps Solaire Moyen ; TSV = Temps Solaire Vrai ; UTC : Temps Universel Coordonné ; TU+1 ou TU+2 = Temps universelle + 1h ou +2h (ou heure légale) ; BM = basse mer ; PM = pleine mer ; TDB = Tide Data Base – Base de données national du niveau de la mer opérée par le Shom ; NM = Niveau Moyen de la mer ; CH = Constantes Harmoniques.

Période	Période détaillée	Durée effective	Instrument	Localisation des mesures	Système de temps	Période d'archivage	Type d'archivage	Lieu d'archivage	Type d'exploitation
1734-1735	Nov. 1734 – oct. 1735	~ 12 mois	Échelle de marée	Le mur d'enceinte du fort de la Conchée	TSV	PM/BM	Registre	AN	Inexploitable
1824-1825	23 déc. 1824 – 23 juin 1825	~ 6 mois	Échelle de marée	Bassins à flot de St-Malo	TSV	PM	Registre	AD35	Inexploitable
1835-1844	Juil. 1835 – Juin 1841	~ 7 ans	Échelle de marée	Saint-Servan	TSV	PM/BM	Registre	Shom	Inexploitable
	1843 – 1844	~ 9 mois	Échelle de marée	Saint-Servan	TSV	PM/BM	Registre	Shom	Inexploitable
1850-1917	Nov. 1850 – fév. 1851 + avr. – août 1851	~ 9 mois	Échelle de marée	Saint-Servan	TSV	PM/BM	Registre	Shom	Marnage Évolution du NM Évolution CH Surcotes Météo 1850-1873 : inexploitable
	Fév. – avr. 1851 + août 1851 –	~ 47 ans	Marégraphe à flotteur	Saint-Servan	TSV	15min (saisie horaire)	Registre	Shom	

	déc. 1898								
	Avr. 1905 – mai 1917	~ 11 ans	Marégraphe à flotteur	Saint-Servan	TSM	15min (saisie horaire)	Registre	Shom	
1925-1938	Avr. – oct. 1925	~ 7 mois	Marégraphe à flotteur	Saint-Servan	TU+1	5min	Marégramme	Shom	Marnage Évolution du NM Évolution CH Surcotes
	Mai – oct. 1926	~ 6 mois	Marégraphe à flotteur	Saint-Servan	TU+1	5min	Marégramme	Shom	
	Août – oct. 1928	~ 3 mois	Marégraphe à flotteur	Saint-Servan	TU+1	5min	Marégramme	Shom	
	Mai – Sep. 1936	~ 5 mois	Marégraphe à flotteur	Saint-Servan	TU+1	5min	Marégramme	Shom	
	Août – Sep. 1938	~ 2 mois	Marégraphe à flotteur	Saint-Servan	TU+1	5min	Marégramme	Shom	
1941-1944	Juin 1941 – avr. 1944	~ 34 mois	Marégraphe à flotteur	Saint-Servan	UTC (TDB)	Horaire	Marégramme	Shom	Marnage Évolution du NM Évolution CH Surcotes
1946-1997	Fév. 1946 – mars 1997	~ 51 ans	Échelle de marée	Saint-Malo	TU+1 TU+1/TU+2	PM	Registre	AD35	Évolution des PM 1946-1954 : inexploitable
1955-1964	Fév. 1955 – Sep. 1960	~ 4 ans (56 mois)	Données numériques	Saint-Servan	TU+1	PM/BM	Registre	EDF	Marnage Évolution du NM Évolution CH Surcotes
	Jan – déc. 1956	~ 1 an	Marégraphe EDF	Saint-Servan	TU+1	Horaire	Registre	EDF	

	Sep. 1960 – fév. 1962	~ 17 mois	Marégraphie EDF	Saint-Servan	TU+1	5min	Marégramme	EDF	
	Jan. 1963 – déc. 1964	~ 2 ans	Marégraphie EDF	Saint-Servan	TU+1	Horaire	Registre	EDF	
1972	Jan. – août 1972	~ 8 mois	Marégraphie EDF	Saint-Servan	UTC (TDB)	Horaire	Registre	EDF	Marnage Évolution du NM Évolution CH Surcotes
1985-1997	Oct. 1985 – août 1989	~ 34 mois	Marégraphie EDF	Saint-Servan	UTC (TDB)	Horaire	Marégramme	EDF	Marnage Évolution du NM Évolution CH Surcotes
	1990-1995 ; 1996-1997	~ 7,5 ans	Marégraphie EDF	Saint-Servan	TU+1/TU+2 UTC (TDB)	5min Horaire	Marégramme	EDF	
2003-présent	2003 – présent	~ 18 ans	Marégraphie radar Shom	Saint-Malo	UTC	Continue	TDB	Shom	Marnage Évolution du NM Évolution CH Surcotes

ANNEXE II

1.1. LE ZÉRO A SAINT-SERVAN

Pour les mesures faites à Saint-Servan, il est possible de suivre le **zéro hydrographique** et celui du marégraphe, le **zéro instrumental**. Trois périodes de temps peuvent être identifiées : (i) les observations antérieures à 1847, (ii) la période comprise entre 1847 et 1851, et (iii) depuis 1852. Les informations retrouvées dans les métadonnées sur le zéro hydrographique et sur le zéro instrumental sont, la plupart du temps, cohérentes entre elles, mais il existe parfois des incohérences entre ces informations.

Les années avant 1847

Les observations marégraphiques permettent de ramener la mesure de profondeur à un niveau de référence fixe, ou zéro de réduction, qui correspond en général au zéro hydrographique du lieu. Dans ce but, des échelles de marée ont été placées temporairement dans l'Anse de Solidor entre 1824 et 1851. Il y a très peu d'informations relatives au zéro de réduction adopté trouvée dans les documents contextuels ou les registres de marée pour cette période.

Ainsi, il est difficile de confirmer avec certitude le ZH pour les mesures avant 1847. Même si des documents ont été trouvés pour les années 1828 à 1845, ces informations sont soit incohérentes soit incomplètes. Il est presque impossible de confirmer avec certitude le ZH et/ou le zéro de l'échelle de marée utilisé pour les mesures de la hauteur d'eau.

Au cours de l'année 1828, l'ingénieur hydrographe Beautemps-Beaupré a établi le ZH à 42 pieds et 8 pouces (= 13,86 mètres) au-dessous du couronnement du môle du Tréchet. En 1839, l'ingénieur hydrographe Chazallon note que le ZH est à 42 pieds (= 13,64 mètres) au-dessous de ce couronnement. Cette valeur reste inchangée jusqu'en 1841 au moins (Annuaire des marées de 1839, 1840 et 1842).

En 1844, le môle du Tréchet a disparu et ainsi un nouveau repère est utilisé de 1843 à 1845 (couronnement du quai au fond de l'avant-port de Saint-Servan = -13,64 m).

Il est probable que le ZH n'ait pas changé à cette époque, mais des incohérences persistent. La cote du couronnement du Tréchet reste constante entre 1839 et 1842, mais la cote du sommet de la Roche le Buron est passée de 22 pieds et 5 pouces (= 7,28 m) en 1839 et 1840³⁰ à 7,31 m en 1842 (Annuaire des marées), soit une différence de 3 cm. Par la suite, les informations retrouvées indiquent que la cote du sommet de la Roche le Buron est restée à 7,31 m jusqu'en 1851³¹. Malheureusement, l'emplacement de cette roche n'a pas été retrouvée dans nos investigations et ne nous permet pas de rattacher ces cotes à un repère actuel.

Les années 1847-1851

À compter de 1847, le ZH de Saint-Servan est mieux documenté et permet de suivre le ZH et le zéro instrumental avec plus de certitude.

³⁰ Annuaire des marées 1839 et 1840.

³¹ Annuaire des marées 1839 ; 1840 ; 1842-1845 ; 1847-1849 ; 1851.

Un nouveau repère, la surface supérieure de la tablette du Môle des Noires, est utilisée comme repère fondamental à partir de 1847. Le ZH est coté à 14,10 m au-dessous de ce repère fondamental (soit -5,84 m NGF Bourdalouë).

En 1852, Chazallon établit le ZH à -13,87 mètres du repère fondamental³² (-5,61 m NGF Bourdalouë). Cette année a marqué le premier changement confirmé du ZH à Saint-Servan de 23 cm (Figure 3).

La période 1852 à l'actuel

Le ZH adopté en 1852 à Saint-Servan est bien celui établi par l'ingénieur hydrographe Chazallon à -13,87 m sous le repère fondamental de la surface supérieure de la tablette du Môle des Noires (-5,61 m NGF Bourdalouë).

En 1874, les Ponts et Chaussées situent le zéro des cartes à la cote -5,72 m NGF Bourdalouë^{33,34}, ou à 13,98 m au-dessous de la plateforme du Môle des Noires³⁵.

En 1896, le zéro du marégraphe est à 13,98 m au-dessous de la tablette du Môle des Noires et à -5,72 m NGF Bourdalouë d'après l'observateur de marée Heurtault qui était chargé du marégraphe cette année-là³⁶. En 1898, le ZH est à 13,87 m au-dessous de la surface supérieure de la tablette du Môle des Noires ou à la côte de -5,61 m NGF Bourdalouë³⁷. Par déduction, le zéro du marégraphe est supposé être à 11 cm au-dessous du ZH.

Cependant, entre 1874 et 1896, des notes manuscrites retrouvées dans les registres de marée indiquent que le zéro du marégraphe correspond au ZH, contredisant ainsi l'écart de 11 cm entre le ZH et le zéro de la mesure³⁸. Cet exemple illustre bien la difficulté de cette étape de reconstruction, avec des incohérences dans les informations historiques retrouvées. Ces notes indiquant que le zéro de la mesure correspondait au ZH n'ont pas été retrouvées dans les registres précédents 1874 ou après 1894. Il est ainsi difficile de pouvoir conclure sur le zéro de la mesure et donc sur la correction à réaliser sur les mesures de hauteur d'eau de l'époque. Après plusieurs tests et vérifications, il a été nécessaire de choisir une correction à appliquer. Nous avons considéré ici que l'observateur de marée était le plus fiable et ainsi que sur la période 1874 à 1896 le ZH correspondait bien au zéro de la mesure. Logiquement, nous avons émis

³² Annuaire des marées 1852.

³³ Anonyme. Note sur les points de repère du zéro des sondes à St Malo (1923-1924) ; Archives du Shom.

³⁴ Ingénieur Général Dyevre. Note à M. L. Vantroys d'EDF, le 29 septembre 1947 ; Archives du Shom.

³⁵ Heurtault. Résumé des observations faites au marégraphe de St-Servan de mai 1874 à décembre 1885 et des résultats produits de ces observations. Janvier 1886.

³⁶ Heurtault. Résumé des observations faites au marégraphe de St-Servan de mai 1874 à décembre 1885 et des résultats produits de ces observations. Janvier 1886.

³⁷ Annales des marées 1898.

³⁸ Notes dans les journaux de marée du 1874-1875 ; 1876-1877 ; 1878-1879 ; 1880-1881 ; janvier 1884 ; 1886-1887 ; Anonyme. Note sur les points de repère du zéro des sondes à St Malo (1923-1924). Archives Shom.

l'hypothèse que par la suite le zéro de la mesure n'avait pas évolué et ainsi que sur la période 1896-1917, le ZH correspondait aussi au zéro du marégraphe.

Pendant une campagne hydrographique réalisée par l'ingénieur hydrographe Courtier en 1923, le ZH est établi à -5,61 m NGF Bourdalouë ou à -6,60 m NGF Lallemant³⁹, puis à -6,294 m IGN69 en 1996. Les différents rapports de nivellement réalisés depuis 1923 et retrouvés dans le cadre de ce projet tendent à indiquer que ZH n'a pas changé de 1923 aux années 1990, malgré des changements dans les réseaux de nivellement nationaux officiels.

La surface supérieure de la tablette du Môle des Noires a été considérée comme un repère fondamental jusqu'en 1972. Un nouveau repère fondamental a été établi en 1972 par EDF, coté à 6,18 m NGF Lallemant. Ce repère est un repère NGF scellé dans la passerelle d'accès au marégraphe de Saint-Servan et est à 12,78 m au-dessus du ZH (6,486 m NGF IGN69) (Figure 3).

1.2. LE ZERO A SAINT-MALO

Le ZH est également identifié pour les mesures de hauteur d'eau prises au port de Saint-Malo. Le ZH à Saint-Malo est coté à -6,289 m IGN69 en 2005, en comparaison, à Saint-Servan, le ZH est coté à -6,294m IGN69, soit une différence de 0,5 cm. Cette information permet de conclure sur la cohérence entre les mesures de Saint-Malo et Saint-Servan. Le zéro du marégraphe radar actuellement opérationnel à Saint-Malo est calé à ce ZH.

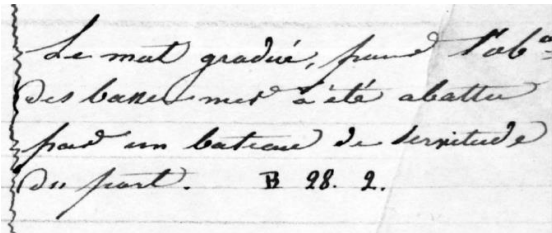
Entre 1946 et 1997, la capitainerie du port de Saint-Malo a consigné les mesures systématiques des pleines mers (uniquement) lues sur une échelle de marée de l'écluse. Les informations sur les zéros des échelles ou de la mesure ne sont pas abondantes pour ces observations. À noter, que contrairement aux observations faites dans l'anse Solidor, les relevés de pleines mers n'étaient pas réalisés pour des besoins scientifiques et/ou hydrographiques. Les relevés étaient retranscrits dans des registres de mouvements portuaires très probablement en relation avec les ouvertures/fermetures des écluses pour les entrées/sorties des navires. Nous avons retrouvé des informations indiquant que le zéro de l'échelle était calé sur un zéro de la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) qui était 20 cm trop haut (*Y. Thomas, communication personnelle, janvier 2022*). En 1994, le zéro a été recalé par une mission du Shom, mais la DDE a continué à utiliser leur zéro.

³⁹ Anonyme. Note des points de repère du zéro des sondes à St Malo (1923-1924). Archives Shom ; Annuaire des marées 1923.

ANNEXE III

Quelques exemples des notes et remarques dans les journaux des marées faites par l'observateur de l'époque. Les notes concernent le fonctionnement d'appareil (casse et réparation de matériel), l'envasement, les conditions météorologiques (quand il est impossible de prendre les observations), ou d'autres sujets.

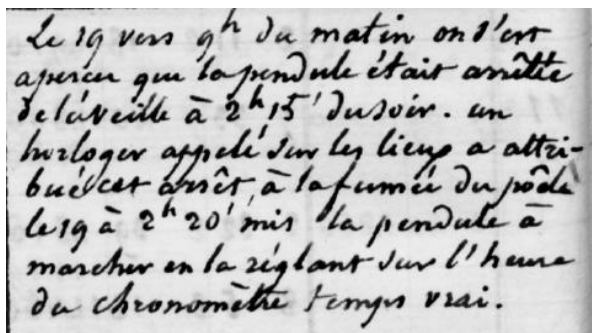
Casse, réparation et nettoyage matériel / appareil :



Le mat gradué pour l'ob-
Des basses mers a été abattu
par un bateau de servitude
du port. B 28. 2.

Note de journal des marées du 28 au 31 octobre 1836 :

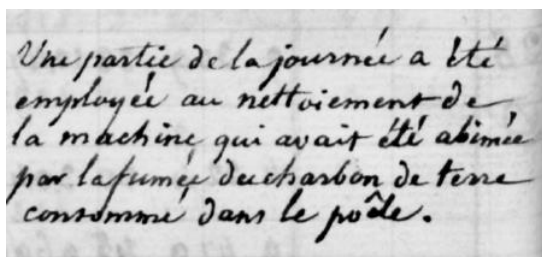
« Le mat gradué pour l'observation des basses mers a été abattu par un bateau de servitude du port. »



Le 19 vers 9h du matin on s'est
aperçu que la pendule était arrêtée
de la veille à 2h15 du soir. un
horloger appelé sur les lieux a attri-
bué cet arrêt à la fumée du poêle.
Le 19 à 2h20 mis la pendule à
marcher en la réglant sur l'heure
du chronomètre temps vrai.

Note de journal des marées de décembre 1851 :

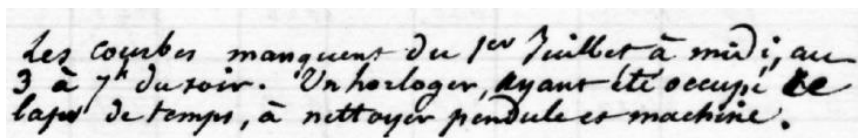
« Le 19 vers 9h du matin on s'est aperçu que la pendule était arrêtée de la veille à 2h15 du soir. Un horloger appelé sur les lieux a attribué cet arrêt à la fumée du poêle. Le 19 à 2h20 mis la pendule à marcher en la réglant sur l'heure du chronomètre temps vrai. »



Une partie de la journée a été
employée au nettoyage de
la machine qui avait été abimée
par la fumée du charbon de terre
consommé dans le poêle.

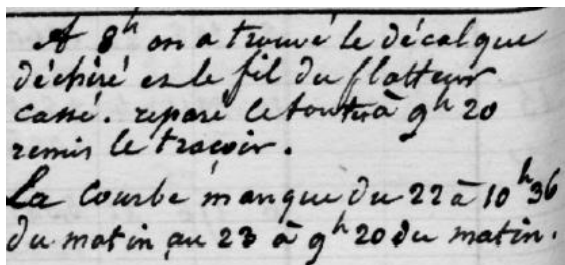
Note de journal des marées du 4 janvier 1852 :

« Une partie de la journée a été employée au nettoyage de la machine qui avait été abimée par la fumée du charbon de terre consommé dans le poêle. »



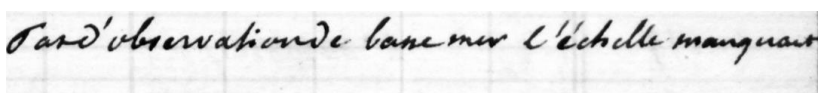
Note du journal des marées de 1 au 3 juillet 1854 :

« Les courbes manquent du 1er juillet à midi au 3 à 7h du soir. Un horloger, ayant été occupé ce laps de temps, à nettoyer pendule et machine. »



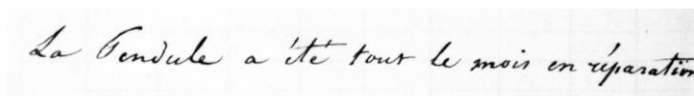
Note du journal des marées de 22-23 septembre 1854 :

« À 8h, on a trouvé le décalque déchiré et le fil du flotteur cassé. Réparé le tout à 9h20 remis le traçoir. La courbe manque du 22 à 10h36 du matin au 23 à 9h20 du matin. »



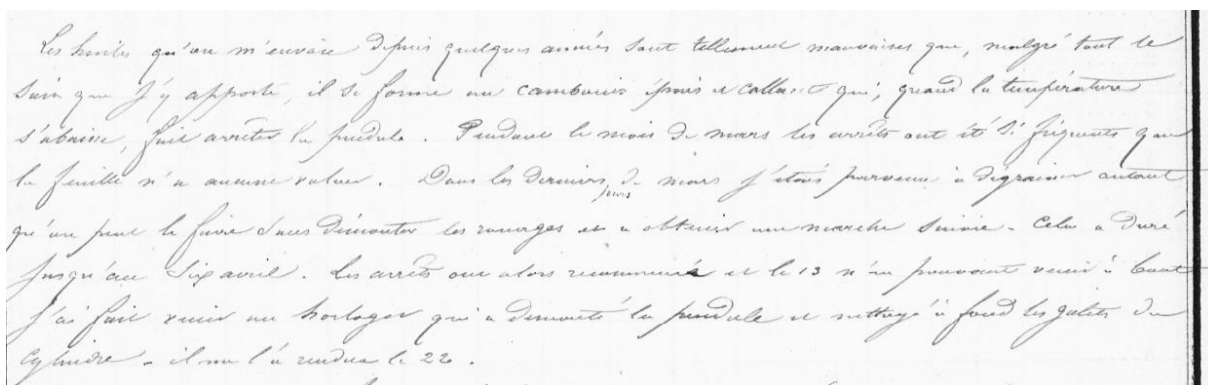
Note de journal des marées du 19 octobre 1954 :

« Pas d'observation de basse mer l'échelle manquante. »



Note de journal des marées d'avril 1857 :

« La pendule a été tout le mois en réparation. »



Note de journal des marées d'avril 1880 :

« Les huiles qu'on m'envoie depuis quelques années sont tellement mauvaises que, malgré tout le soin que j'apporte, il se forme un cambouis épais et collant qui, quand la température s'abaisse, fait arrêter la pendule. Pendant le mois de mars les arrêts ont été si fréquents que la feuille [...] n'a aucune valeur. Dans les derniers jours de mars j'étais parvenu à dégraisser autant qu'on peut le faire [...] les rouages et à obtenir une marche suivie. Cela a duré jusqu'au six avril. Les arrêts ont alors recommencé et le 13 n'en pouvant venir au bout j'ai fait venir un horloger qui a démonté la pendule et nettoyé à fond les galets du cylindre – il me l'a rendue le 22. »

Note du journal des marées de 1 au 7 décembre 1916 :

« Du 1^{er} au 7 le fil du flotteur est cassé. »

Déphasage en temps :

Note du journal des marées de 19 mai 1851 :

« Retardé la pendule 1^m 3^s. »

Note de journal des marées du 1^{er} juin 1865 :

« La pendule est en avant de 36 minutes sur la courbe. »

Note de journal des marées de mai 1885 :

« 3 minutes à retrancher aux heures pour l'avance du cylindre. »

L'envasement :

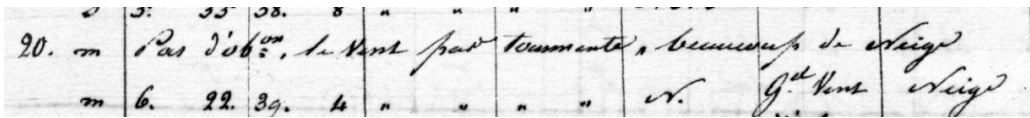
Note de journal des marées d'août 1881 :

« Il y a eu de la vase dans le puits et l'échelle que j'avais fait mettre à l'extrémité du tuyau pour avoir les hauteurs des plus basses mers a été enlevée. »

Note de journal des marées d'avril 1905 :

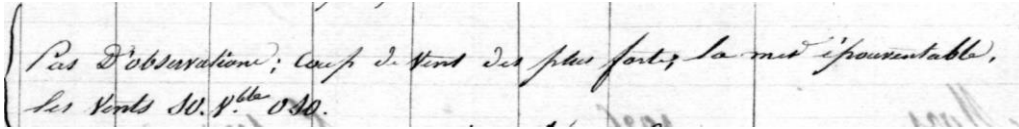
« Le puits du marégraphe étant en partie ensablé le flotteur échoué quand la hauteur de l'eau est aux environs de 1^m50. Les basses mers peuvent donc être indiquées sur les courbes. »

Données météorologiques :



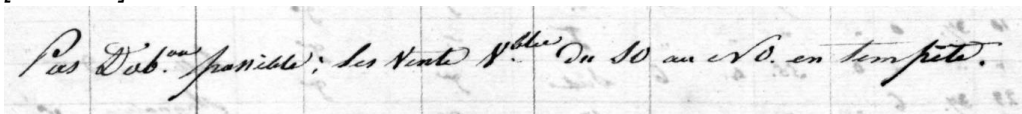
Note de journal des marées du 20 décembre 1835

« Pas d'observation, le vent fort tourmenté, beaucoup de neige. »



Note de journal des marées de 2 mars 1836 :

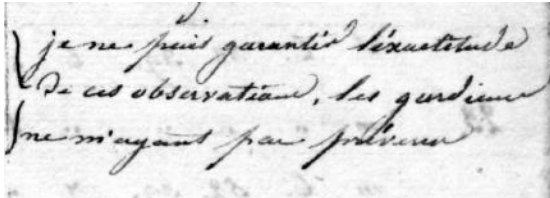
« Pas d'observation ; coup de vent des plus forts, la mer épouvantable, les vents SO V^{ble} [Variable] OSO. »



Note de journal des marées de 28-29 mars 1836 :

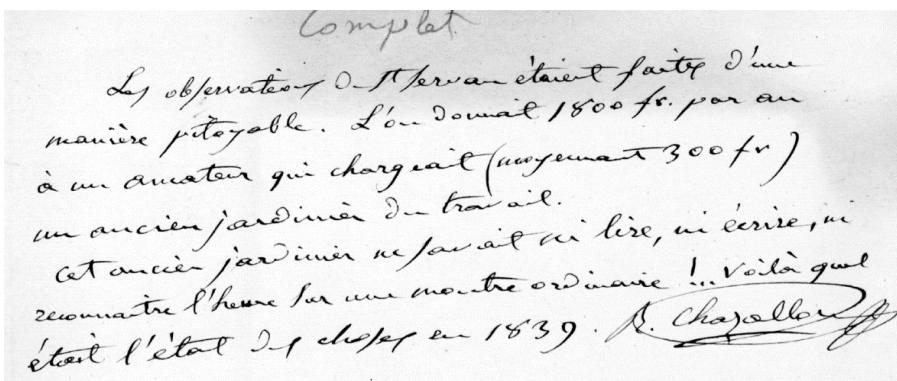
« Pas d'ob^{on} [observation] possible ; les vents V^{ble} [variable] du SO au NO en tempête. »

Observateur :



Note du 12 septembre 1835 :

« Je ne puis garantir l'exactitude de ces observations, les gardiens ne m'ayant pas prévenus. »



Note de Chazallon dans le journal des marées de 1840 :

« Les observateurs de St Servan étaient faites d'une manière pitoyable. L'on donnait 1800 fr par an à un amateur qui chargeait (moyennement 300 fr) un ancien jardinier du travail. Cet ancien jardinier ne savait ni lire, ni écrire, ni reconnaître l'heure sur une montre ordinaire !... Voilà quel était l'état des choses en 1839. Chazallon. »

L'observateur des marées ayant été malade a été obligé de garder sa chambre.

Note de journal des marées de 23 mai 1852 :

« L'observateur des marées ayant été malade a été obligé de garder sa chambre. »

L'observateur des marées n'a pu se rendre au puits par suite d'indisposition.

Note de journal des marées de 15 octobre 1854 :

« L'observateur des marées n'a pu le rendre au puits par suite d'indisposition. »

L'observateur des marées n'ayant pu se rendre au marégraphe le 1^{er} Mars 1859, la personne chargée de le remplacer, a mal placé la feuille sur le cylindre. L'heure minuit a été prise pour Midi : minuit se trouve donc au milieu de la carte, et midi aux extrémités contrairement à l'habitude.

Note de journal des marées d'avril 1859 :

« L'observateur des marées n'ayant pas pu se rendre au marégraphe le 1^{er} mars 1859, la personne chargée de le remplacer, a mal placé la feuille sur le cylindre. L'heure minuit a été prise pour midi : minuit se trouve donc au milieu de la carte, et midi aux extrémités contrairement à l'habitude. »

Observations arrêtées cause de maladie

Note de journal des marées de septembre 1912 :

« Observations arrêtées – cause de maladie. »

Autres :

Observations de Marées faites à St Servan en juillet 1840.
Le temps a été réglé sur cadran solaire
La hauteur a été mesurée sur des mat graduée

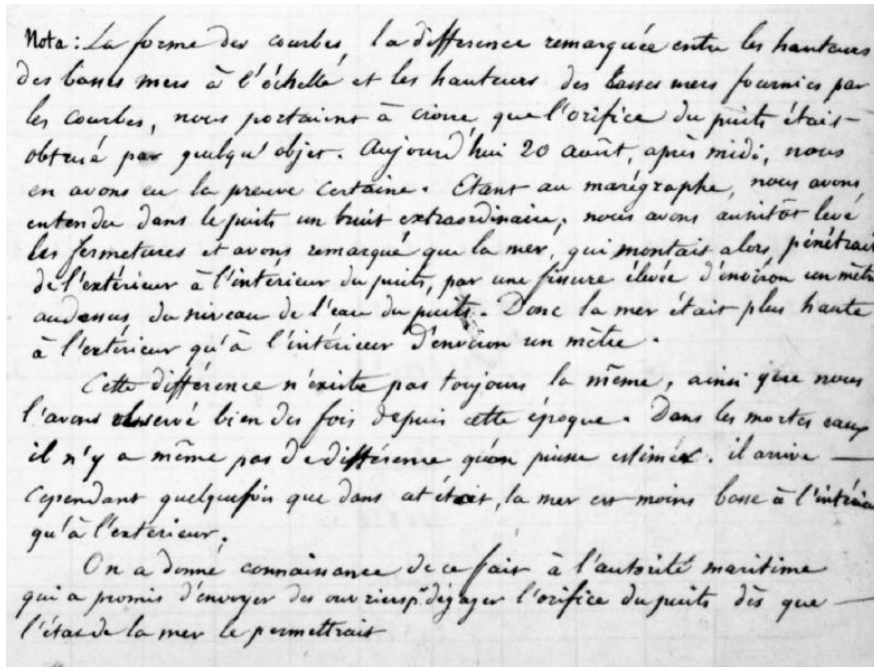
Note de journal des marées de juillet 1840 :

« Observations de marées faites à St Servan en juillet 1840. Le temps a été réglé sur cadran solaire. La hauteur a été mesurée sur les mat graduée. »

Nota : La plupart des courbes — doivent être peu correctes, car il y a eu pendant le mois beaucoup d'accidents à la machine; de plus la mer ayant été généralement fort grosse, il a été très-difficile de bien régler l'instrument.

Note du journal des marées de décembre 1857 concernant des courbes incorrectes.

« Nota : la plupart des courbes doivent être peu correctes ; car il y a eu pendant le mois beaucoup d'accidents à la machine ; de plus la mer ayant été généralement fort, grosse, il a été très difficiles de bien régler l'instrument. »

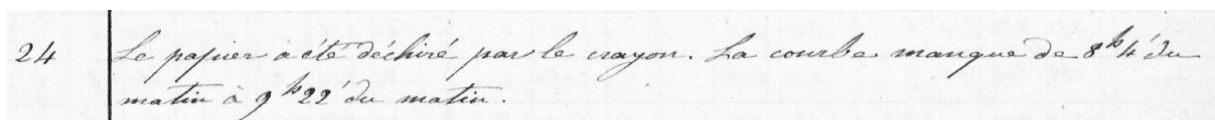


Note de journal des marées d'août 1857 :

« Nota : La forme des courbes, la différence remarquée entre les hauteurs des basses mers à l'échelle et les hauteurs des basses mers fournies par les courbes, nous portaient à croire que l'orifice du puits était obstrué par quelque objet. Aujourd'hui 20 août après-midi, nous avons entendu dans le puits un bruit extraordinaire ; nous avons aussitôt levé les fermetures et avons remarqué que la mer, qui montait alors, pénétrait de l'extérieur à l'intérieur du puits, par une fissure élevée d'environ un mètre au-dessus du niveau de l'eau du puits. Donc la mer était plus haute à l'extérieur qu'à l'intérieur d'environ un mètre.

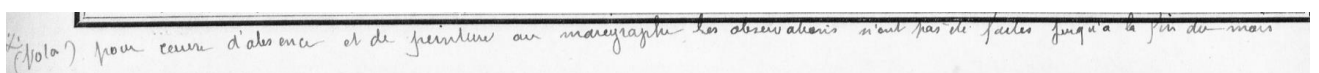
Cette différence n'existe pas toujours la même, ainsi que nous l'avons observé bien des fois depuis cette époque. Dans les mortes eaux il n'y a même pas de différence qu'on puisse estimer, il arrive cependant quelquefois que dans cet état, la mer est moins basse à l'intérieure qu'à l'extérieur.

On a donné connaissance de ce fait à l'autorité maritime qui a promis d'envoyer des ouvriers pour dégager l'orifice du puits dès que l'état de la mer le permettrait. »



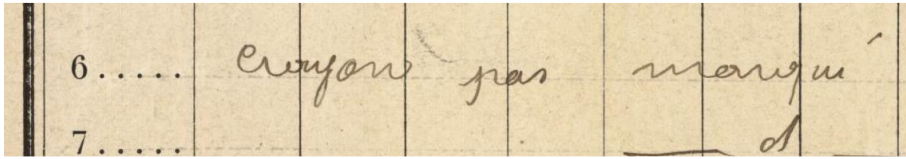
Note de journal des marées de 24 janvier 1865 :

« Le papier a été déchiré par le crayon. La courbe manque de 8h4' du matin à 9h22' du matin. »



Note du journal des marées de 21 au 29 août 1909 :

« (Nota) pour cause d'absence et peinture au marégraphe les observations n'ont pas été faites jusqu'à la fin du mois. »



Note dans le registre de marée pour le 6 et 7 décembre 1910 :

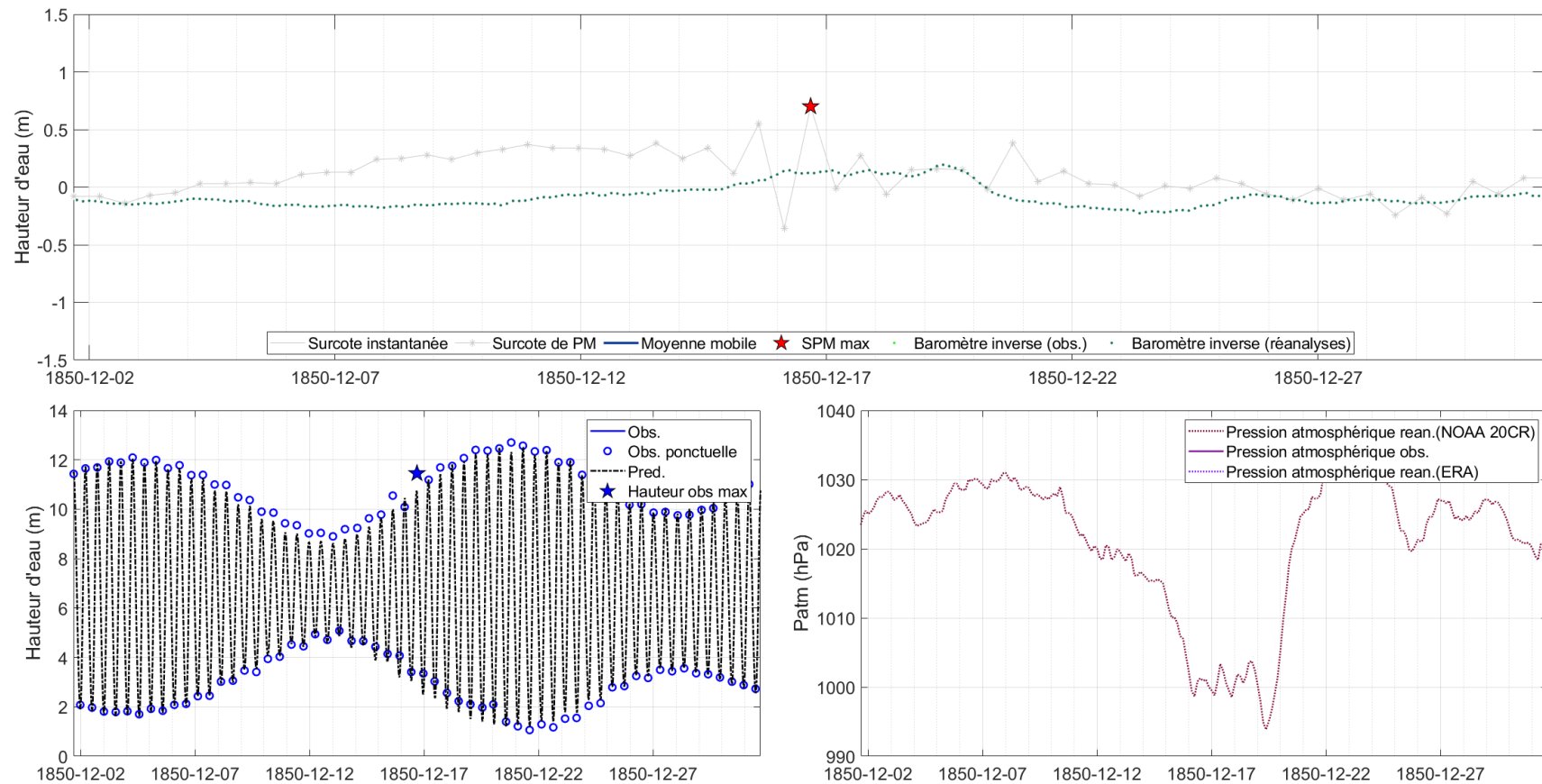
« Crayon pas marqué. »

ANNEXE IV

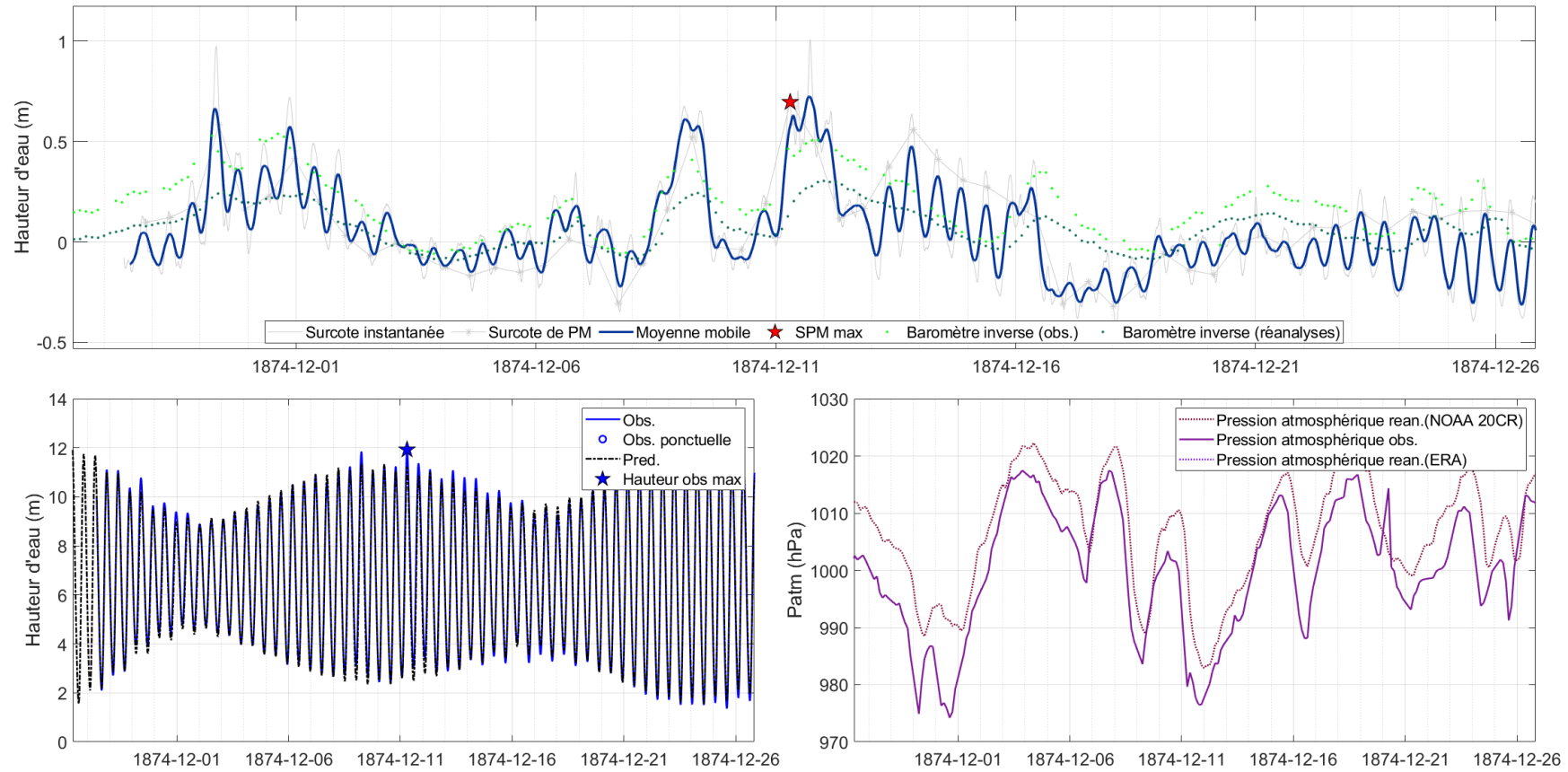
L'étude des niveaux extrêmes se fait à travers l'analyse de plusieurs indices. La surcote/décote instantanée est la différence entre la hauteur d'eau observée (h_{obs}) et celle prédites (h_{pred}) à un instant t . Une surcote est marquée par une différence positive ($h_{\text{obs}} > h_{\text{pred}}$) et une décote est marquée par une différence négative ($h_{\text{obs}} < h_{\text{pred}}$). Lors d'un événement de tempête, en termes de submersions éventuelles, le paramètre caractéristique est naturellement la hauteur maximale observée, il est ainsi communément admis de calculer la surcote de pleine mer (SPM) pour un événement donné. Des moyennes glissantes sont estimées à partir des surcotes instantanées et permettent de lisser le signal et de comparer plus facilement ces résidus avec l'effet du baromètre inverse (issu de mesures ou de réanalyses de pression atmosphérique). Pour les 20 événements identifiés à partir de la série reconstruite de Saint-Malo/Saint-Servan, les SPM calculées correspondent bien à des périodes dépressionnaires.

Pour chaque figure : Haut : surcotes/décotes instantanées (en gris), surcotes/décotes de pleine mer (gris étoile) et la moyenne mobile des résidus (bleu), baromètre inverse calculé à partir des mesures de pression atmosphérique [1851-1917] (vert clair) et le baromètre inverse calculé à partir des réanalyses modélisées (NOAA 20CR ou ERA5) (vert foncé). La surcote de PM de l'évènement considéré est indiquée par une étoile rouge. Bas gauche : une visualisation du signal de marée avec les hauteurs observées (bleus) et prédites (noir) et la hauteur observée maximale pour l'évènement considéré (étoile bleu). Lorsque des mesures ponctuelles de pleine ou basse mer étaient disponibles, elles sont également représentées sur le graphique. Bas droite : La pression atmosphérique observée (ligne continue violette) et/ou modélisée par la méthode NOAA 20CR (ligne pointillée rose) ou l'ERA5 (ligne pointillée violette).

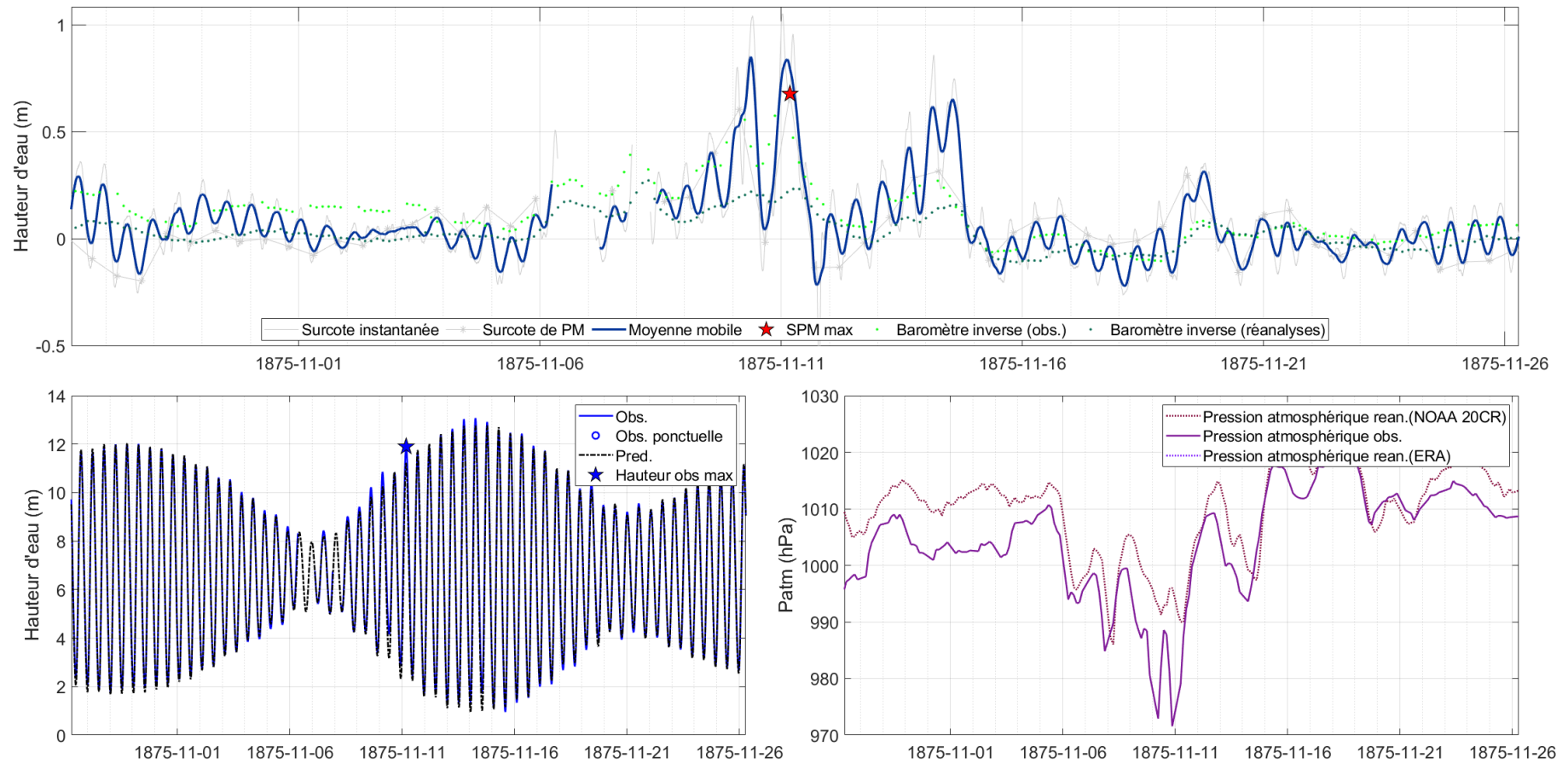
Évènement du 16 décembre 1850



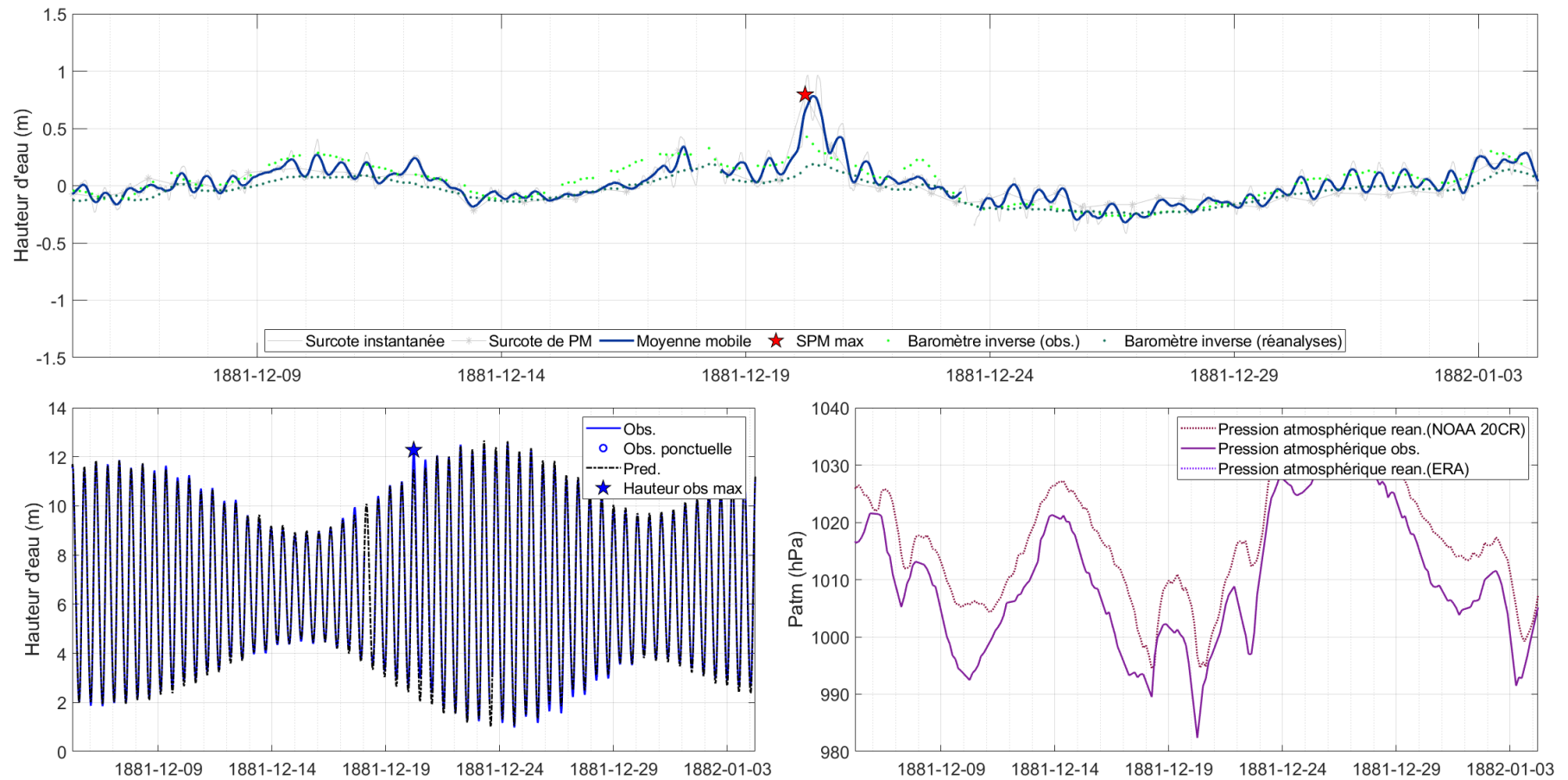
Évènement du 11 décembre 1874



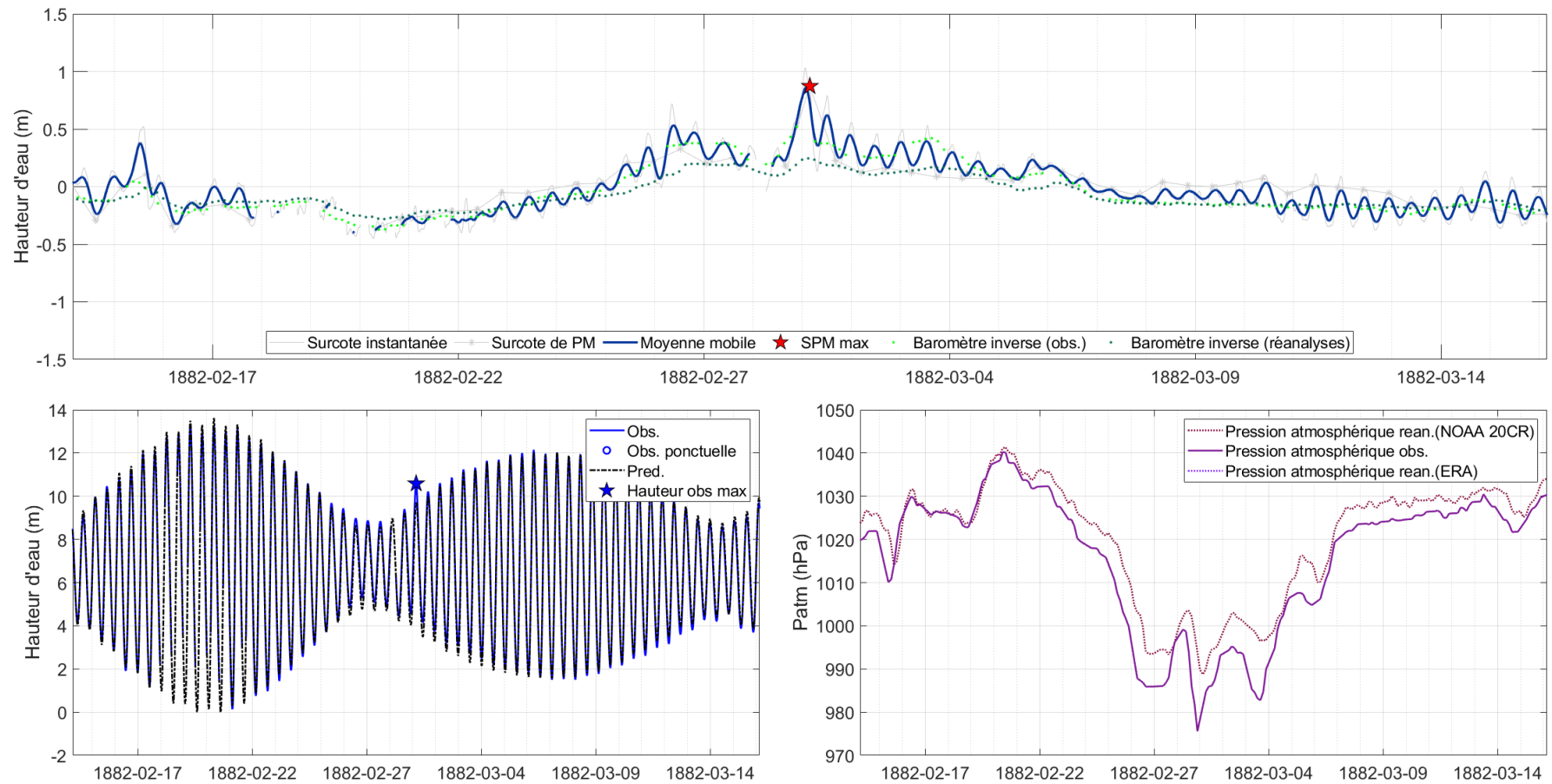
Évènement du 11 novembre 1875



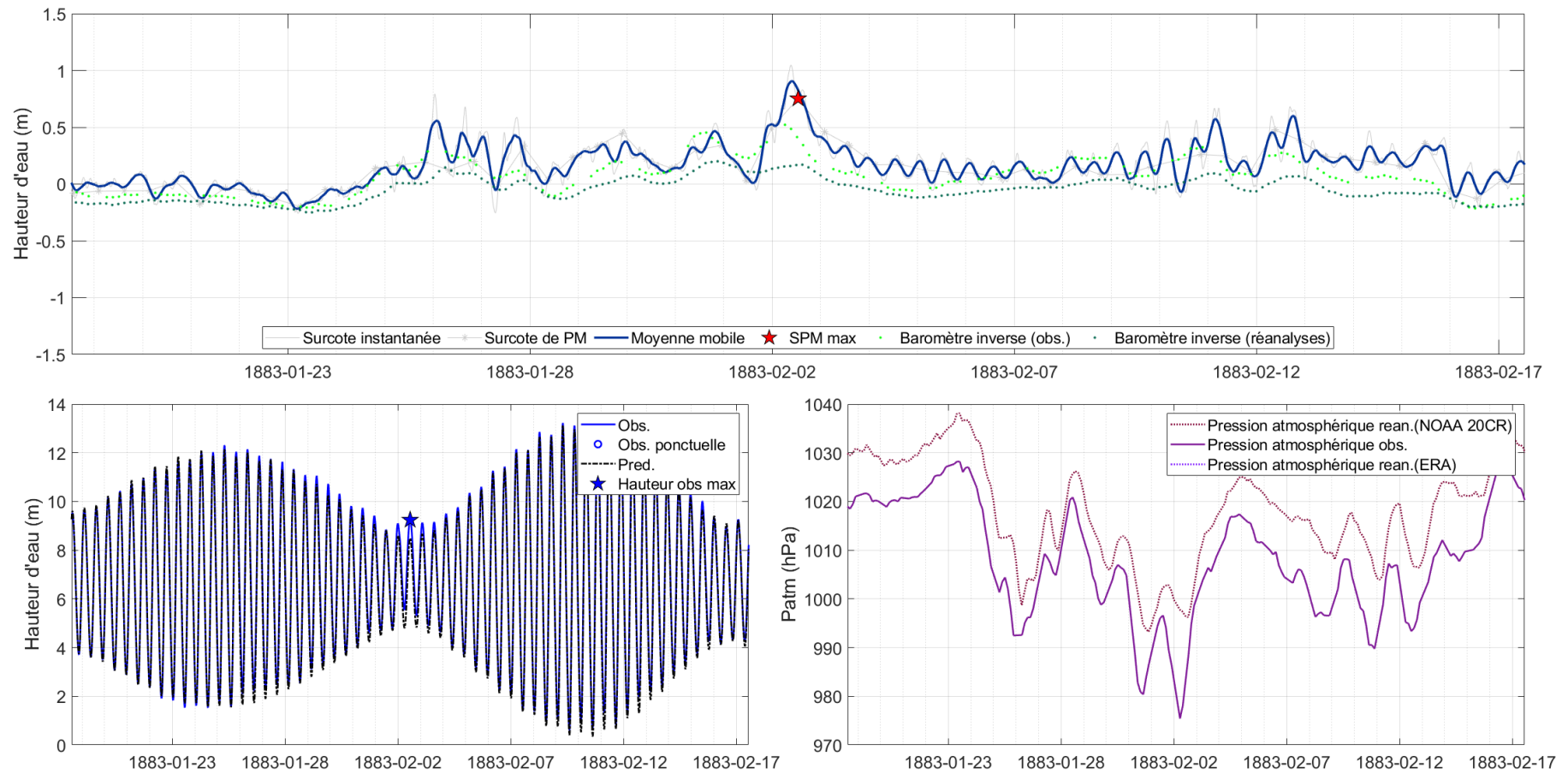
Évènement du 20 décembre 1881



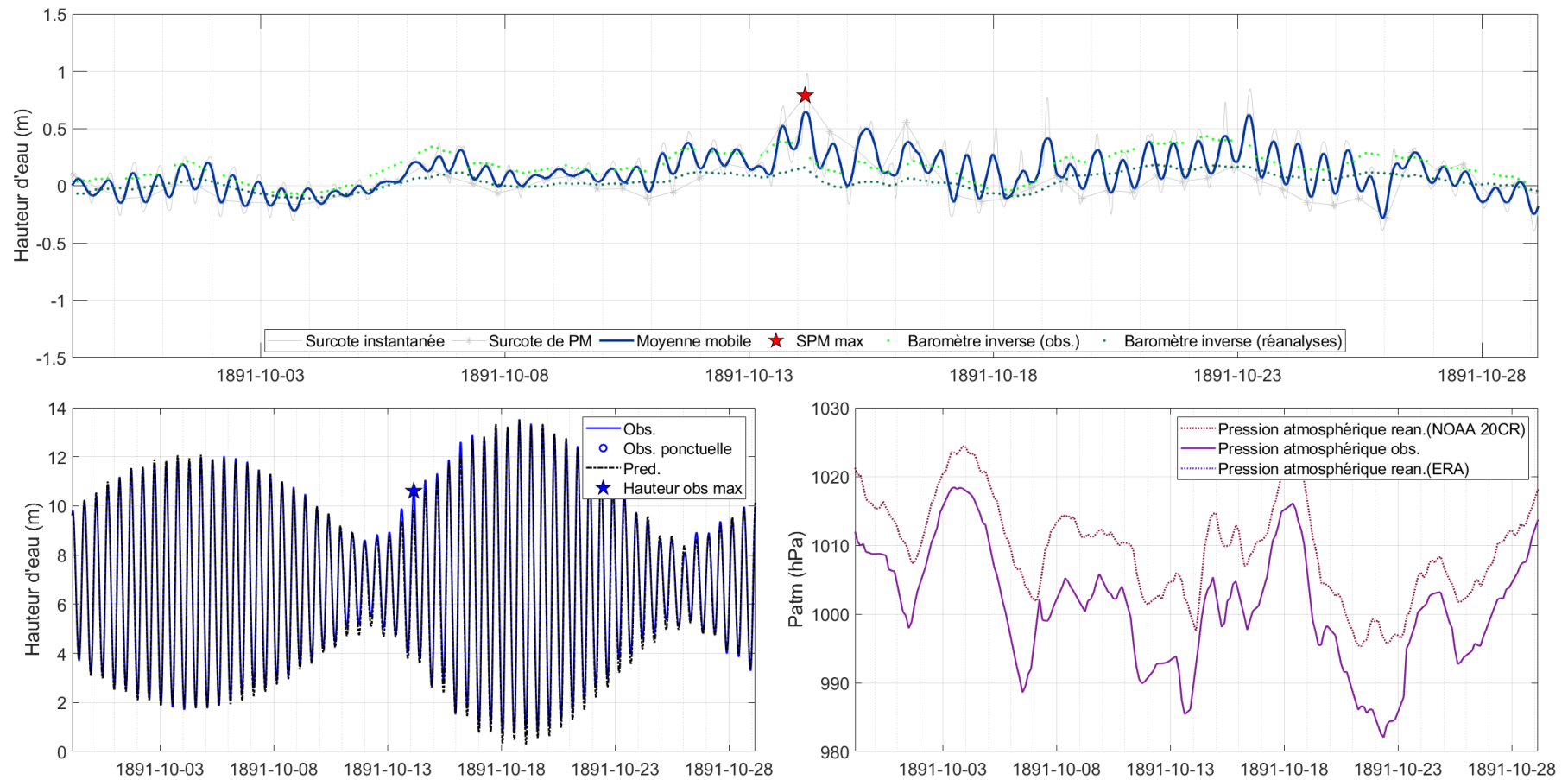
Évènement du 1^{er} mars 1882



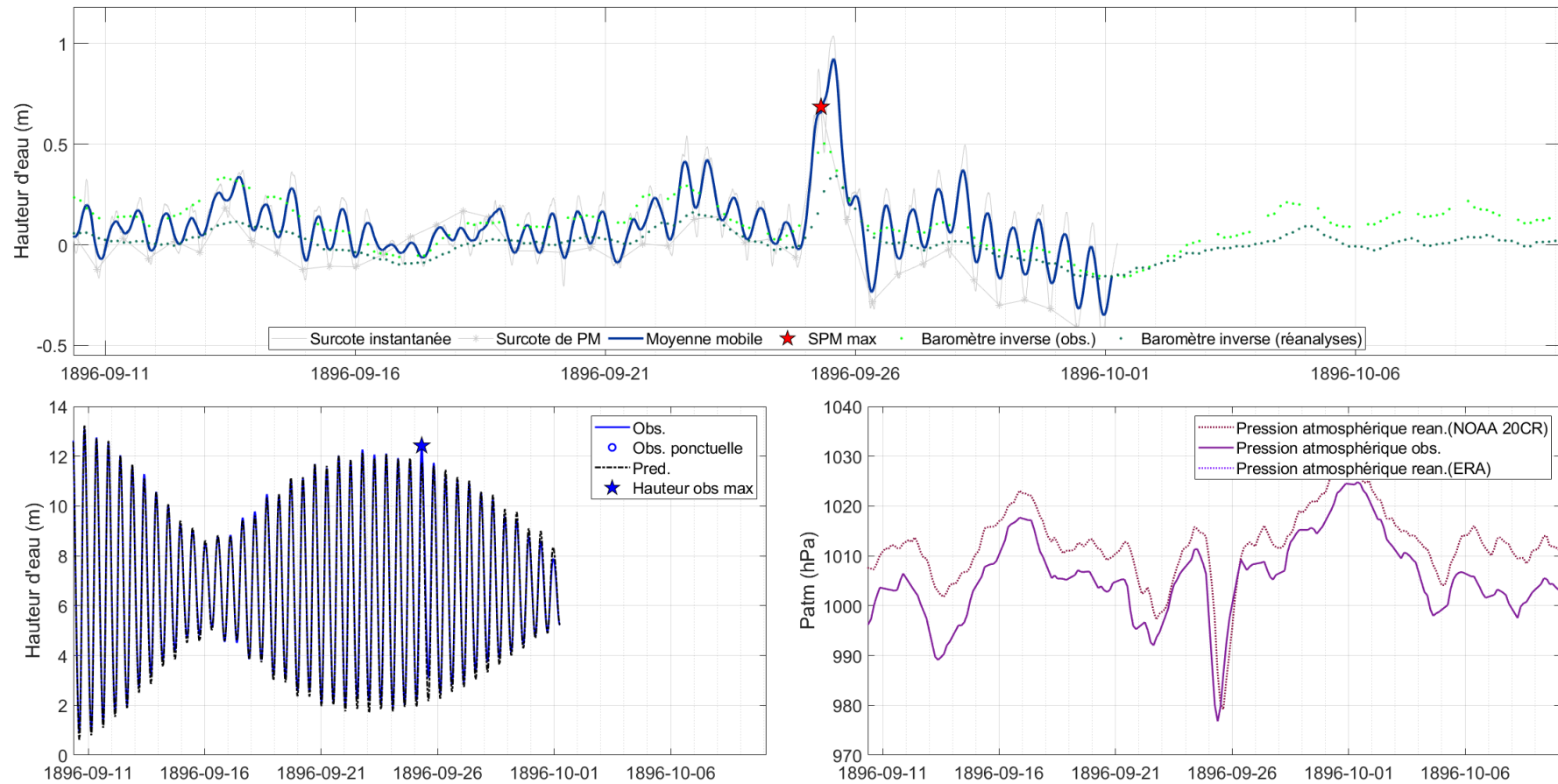
Évènement du 2 février 1883



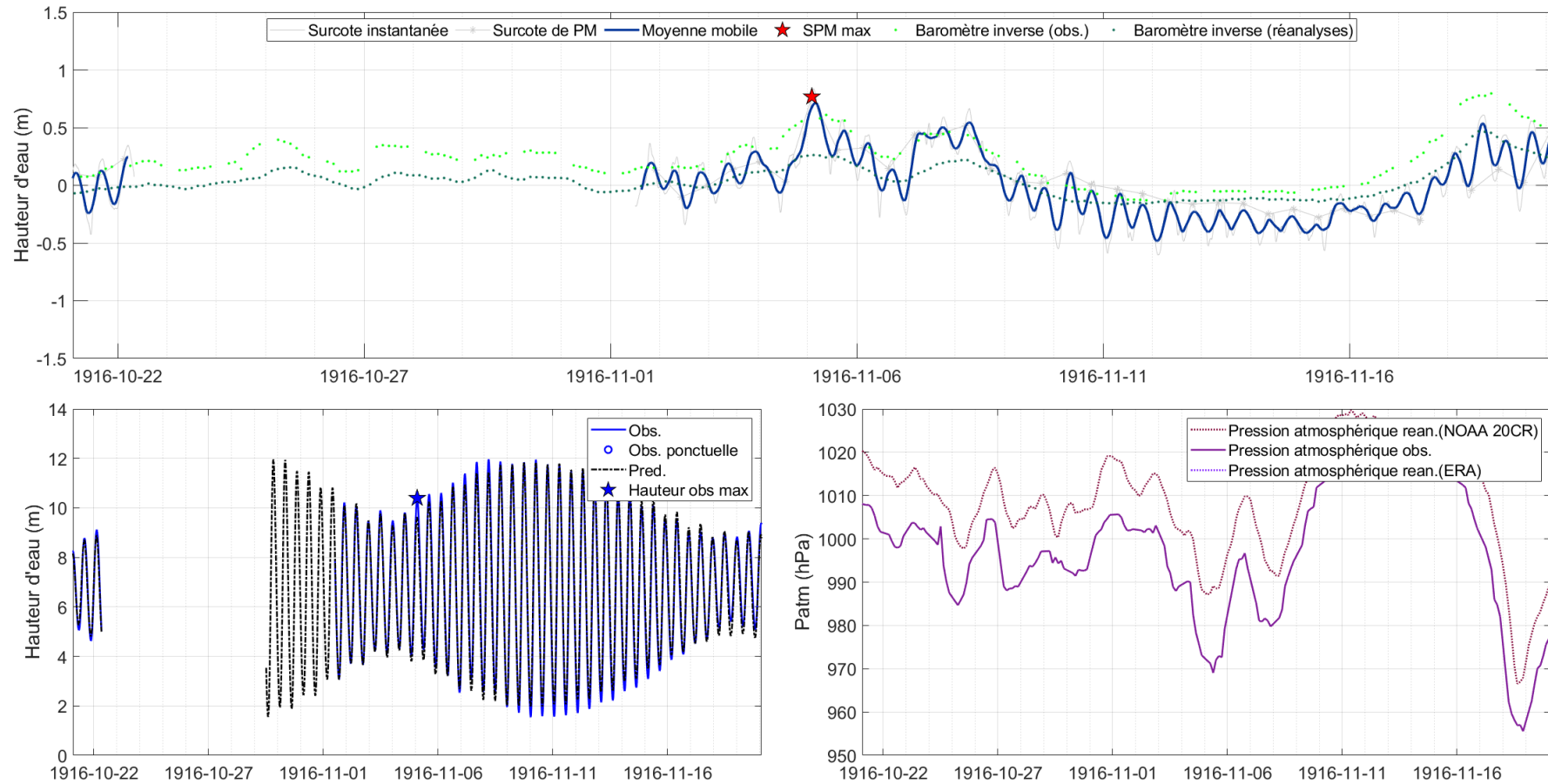
Évènement du 14 Octobre 1891



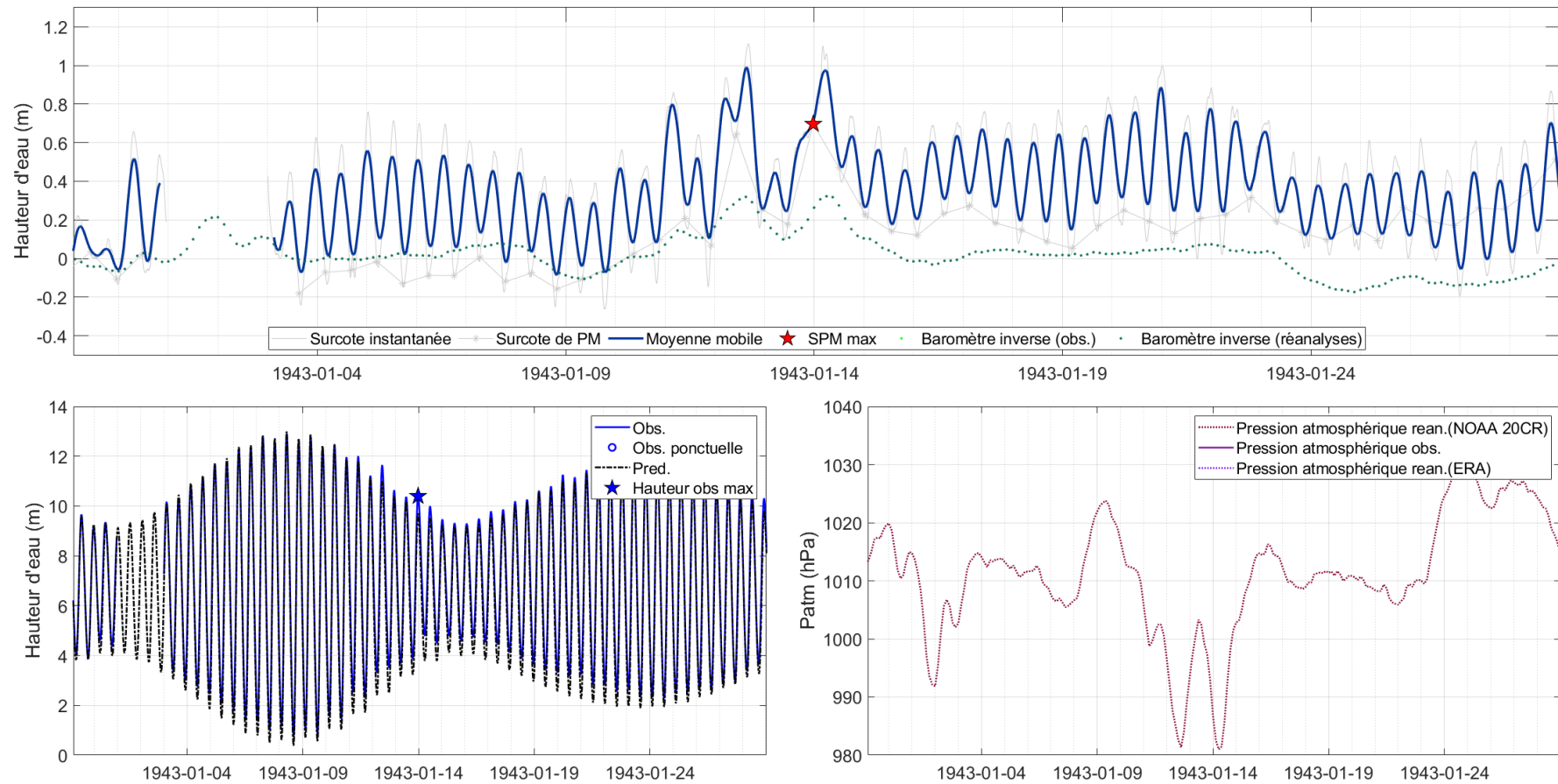
Évènement du 25 septembre 1896



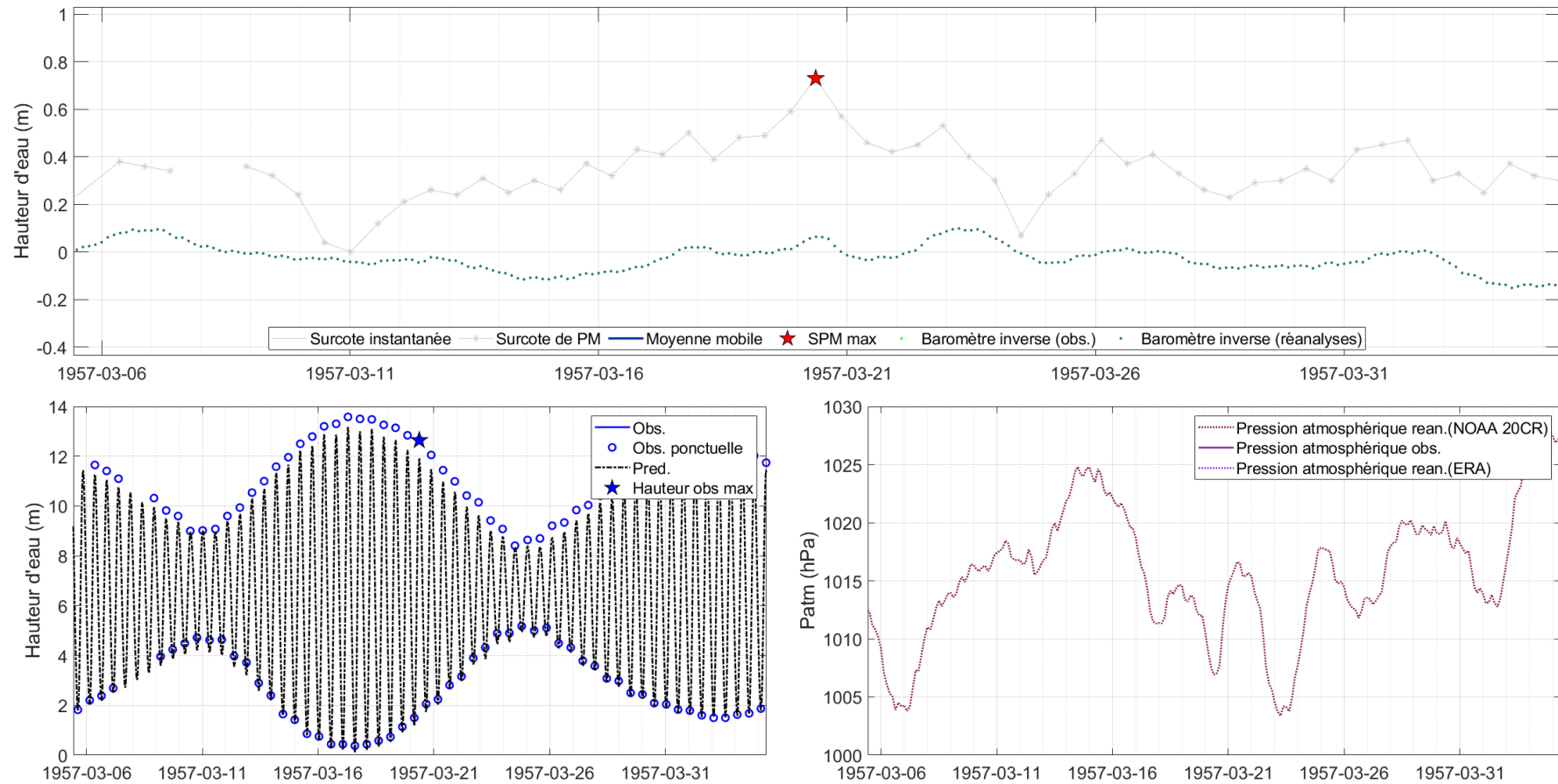
Évènement du 5 novembre 1916



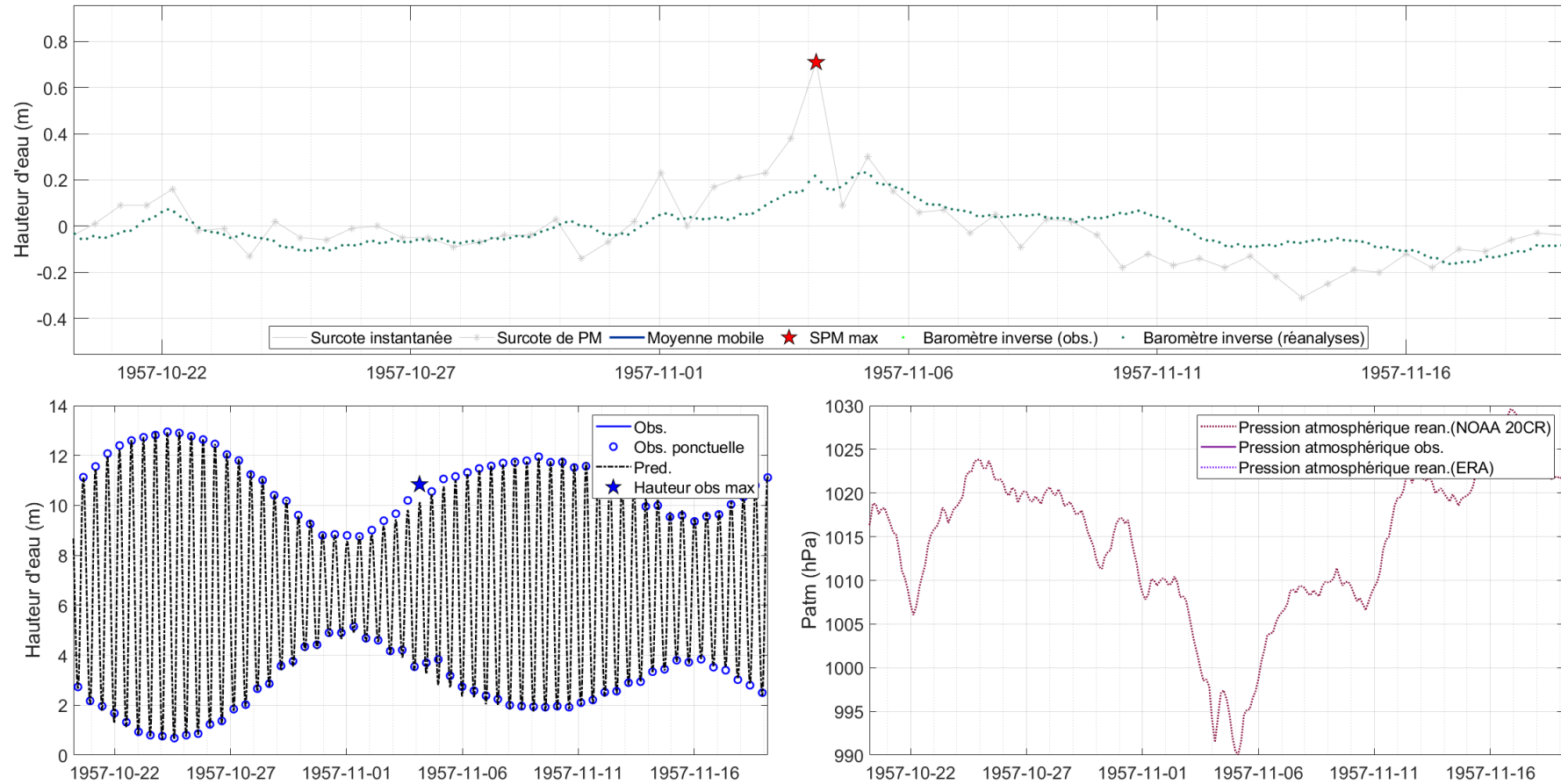
Évènement du 13 janvier 1943



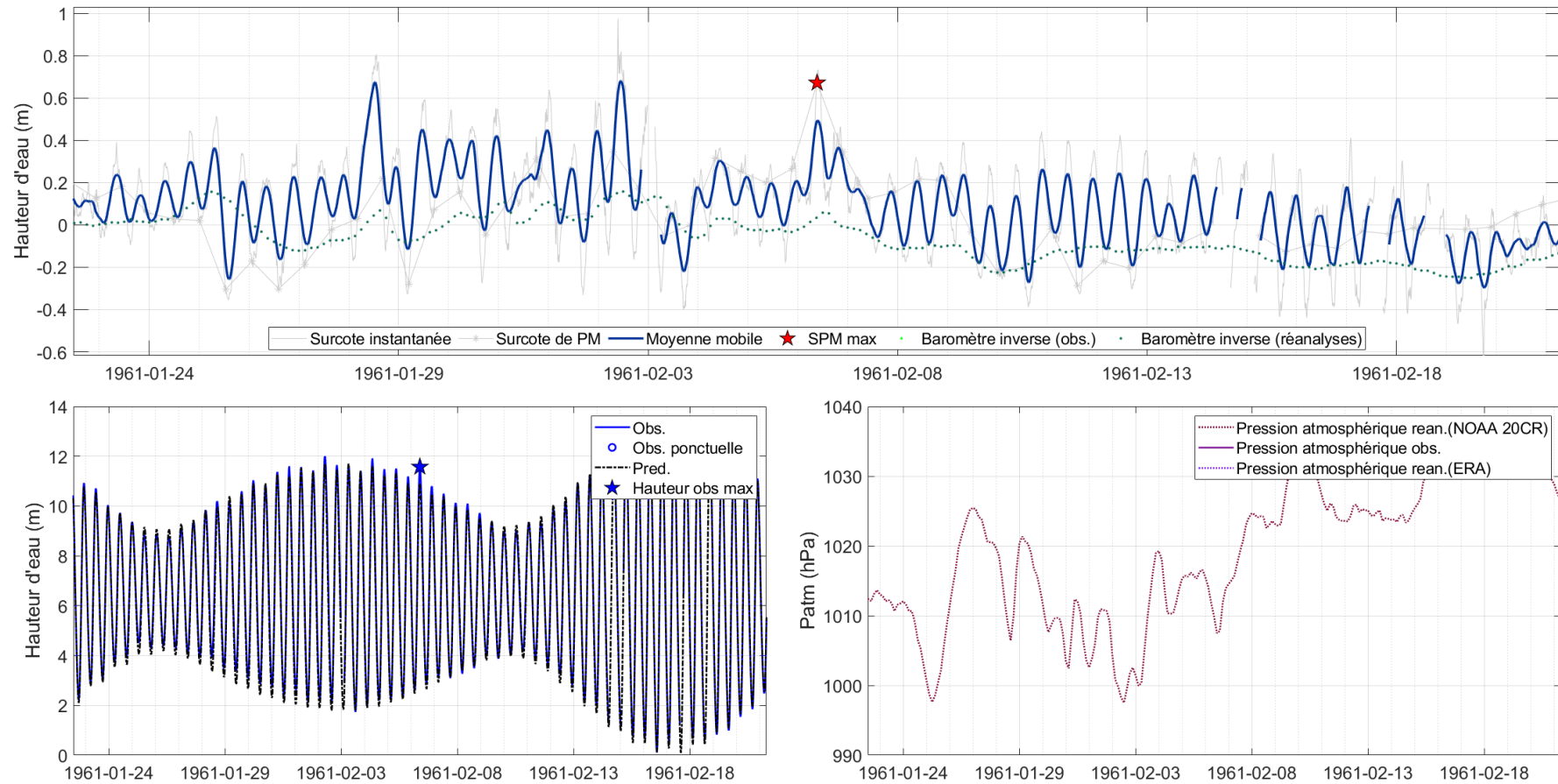
Évènement du 20 mars 1957



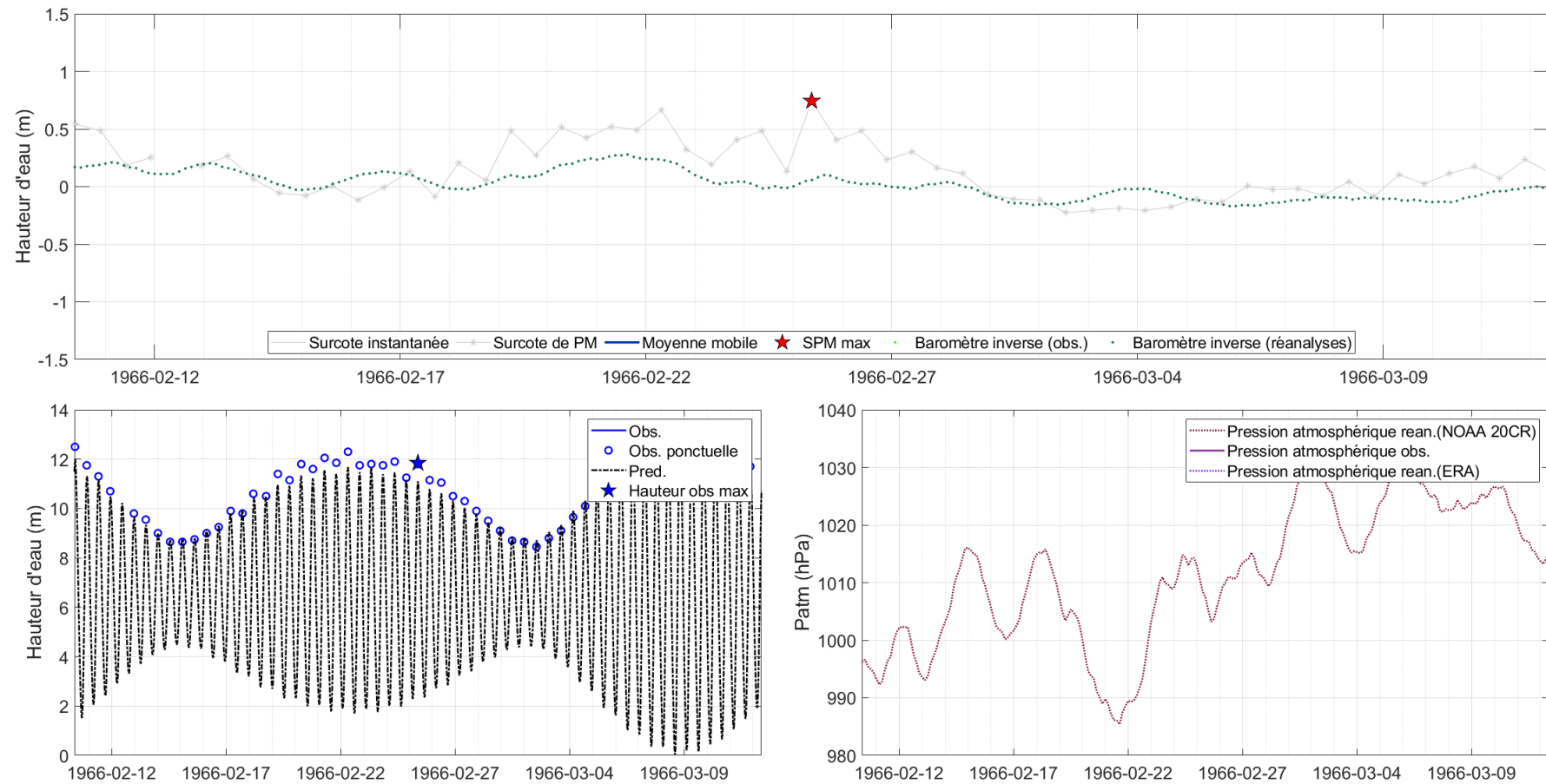
Évènement du 4 novembre 1957



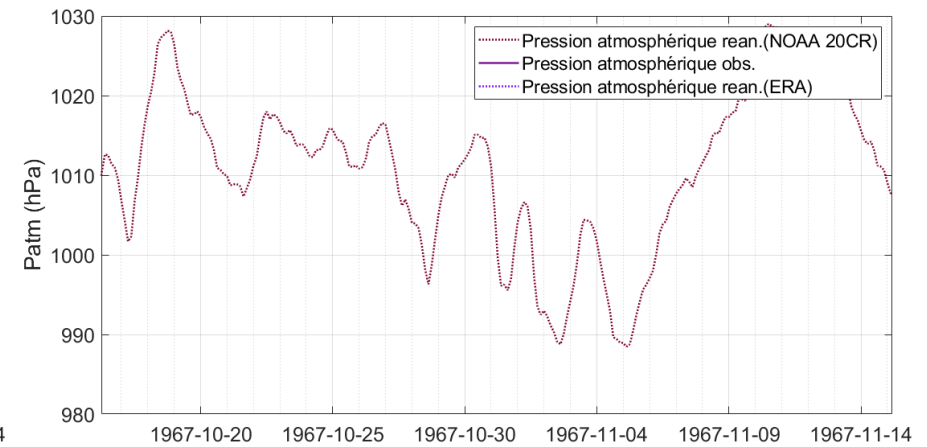
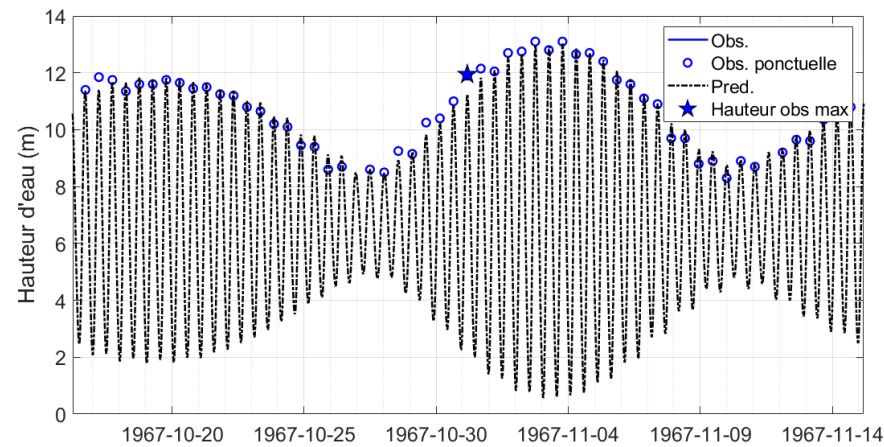
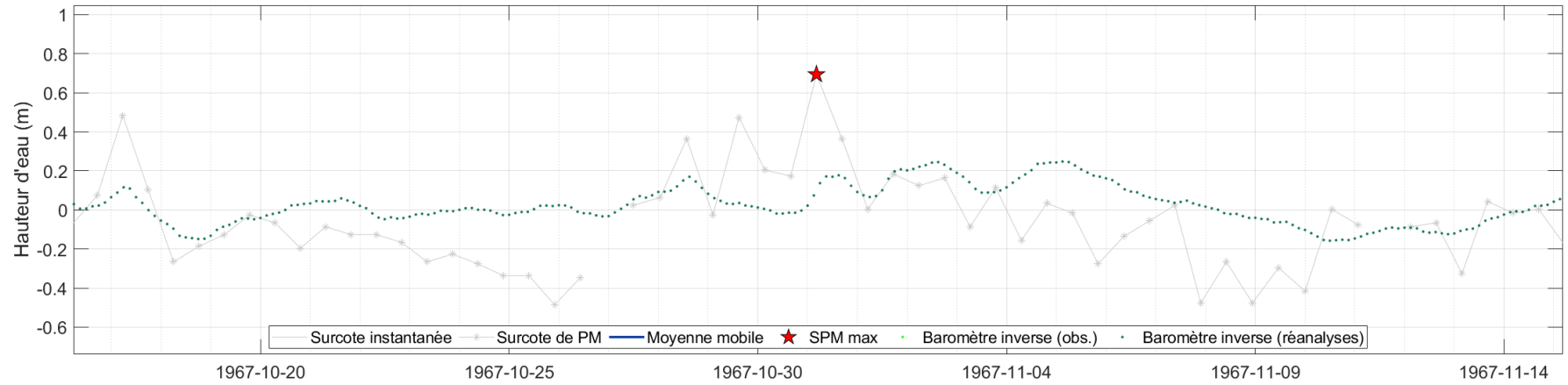
Évènements du 6 février 1961



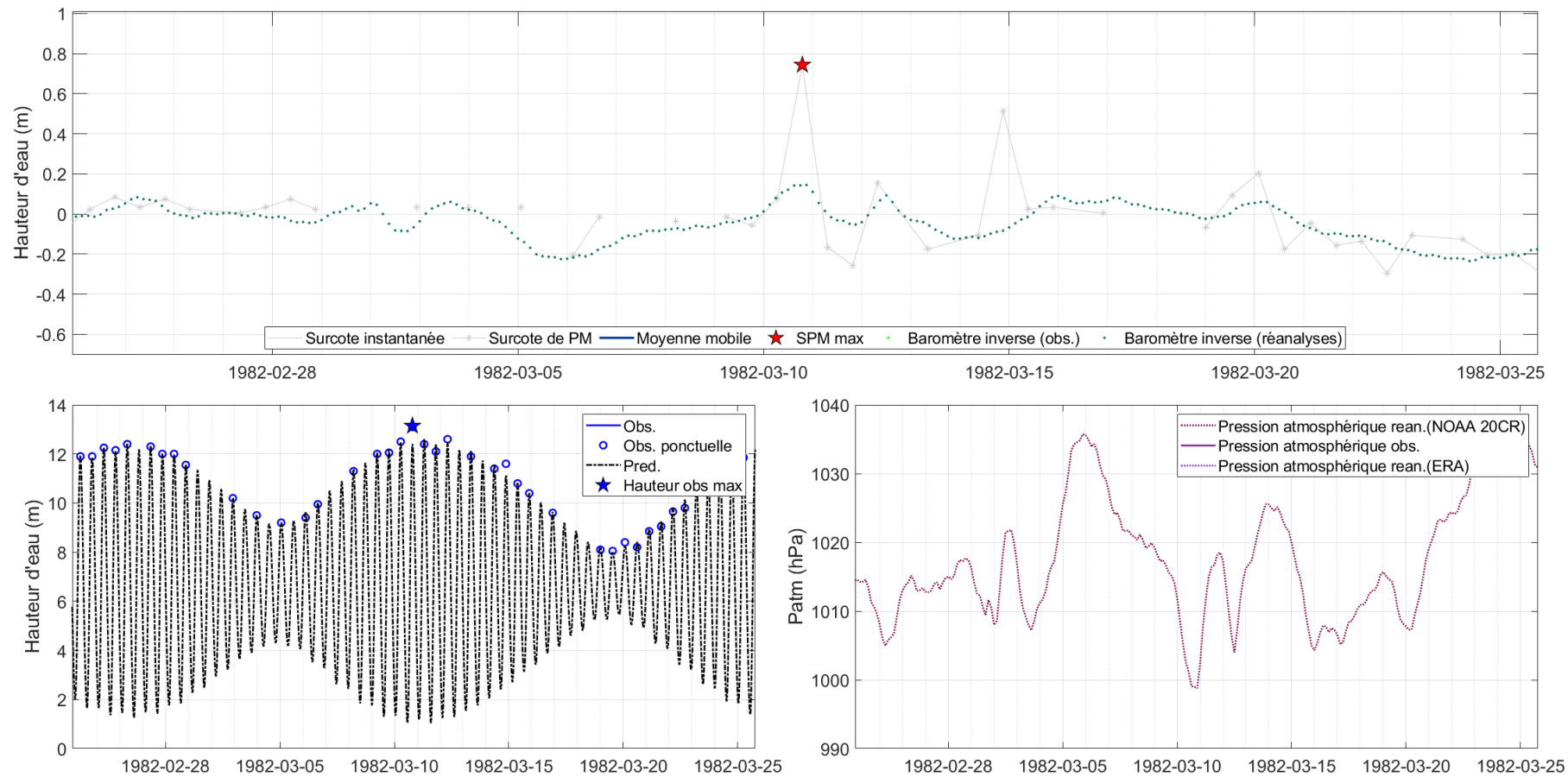
Évènement du 25 février 1966



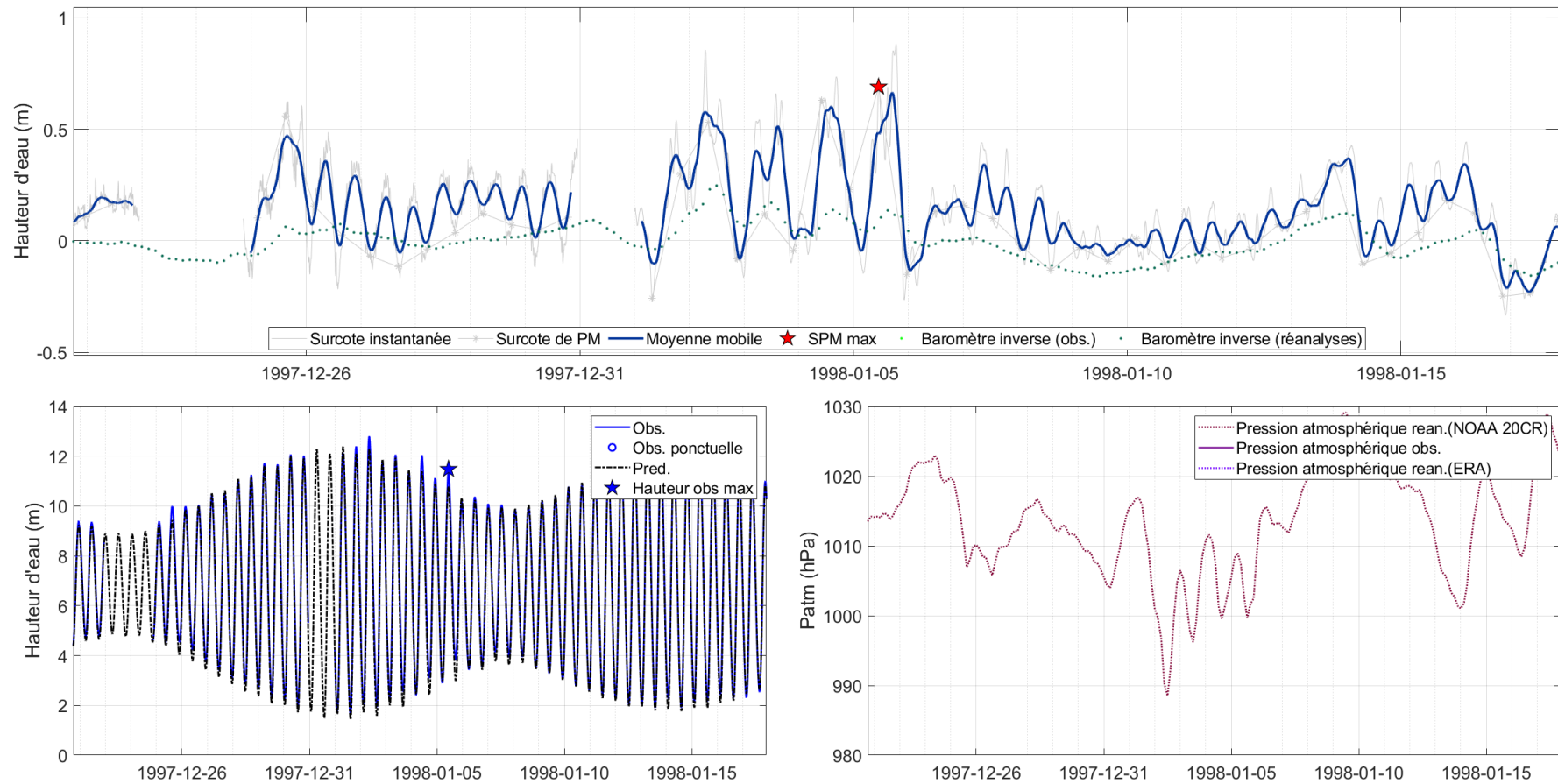
Évènement du 31 octobre 1967



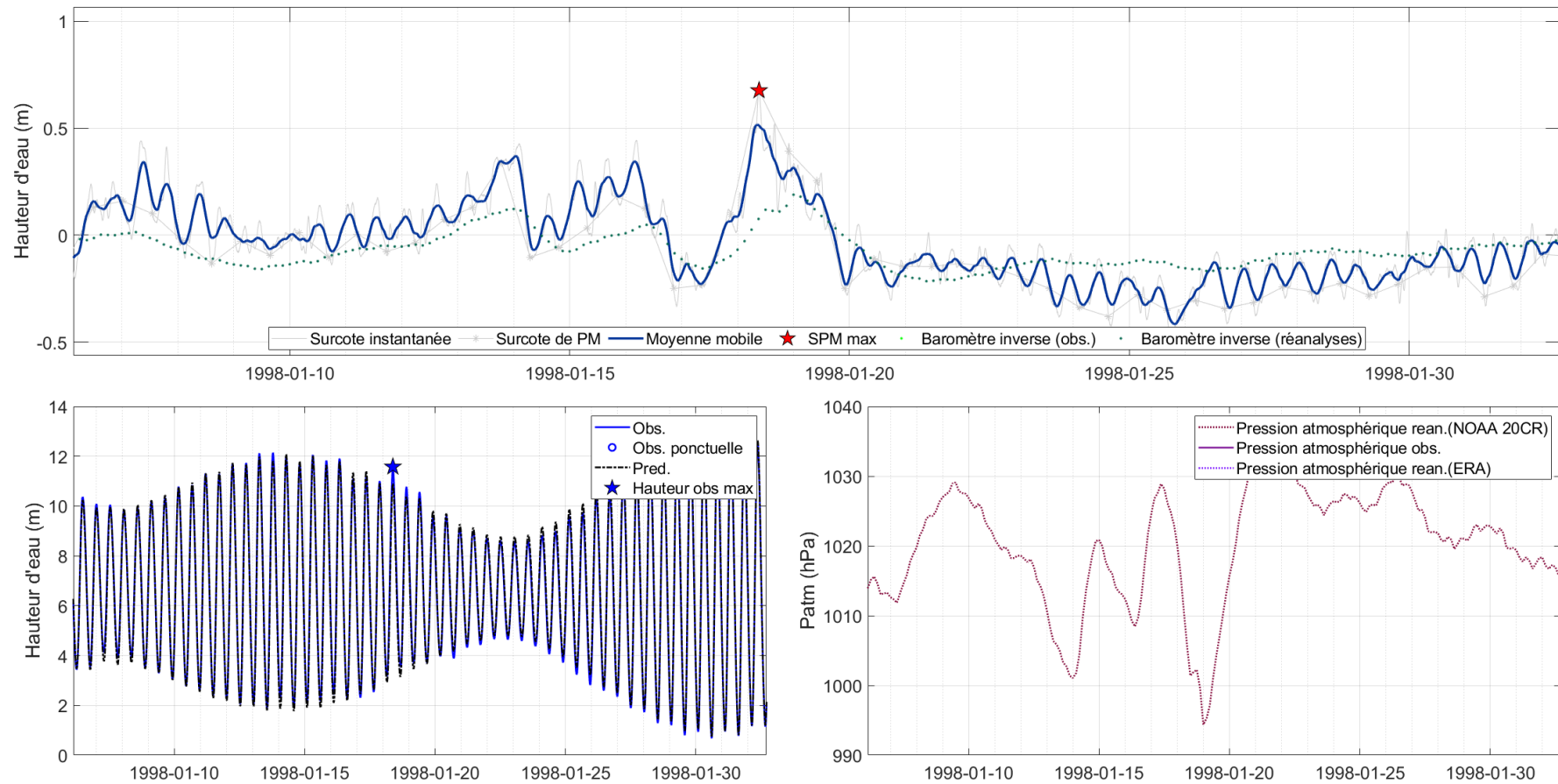
Évènement du 10 mars 1982



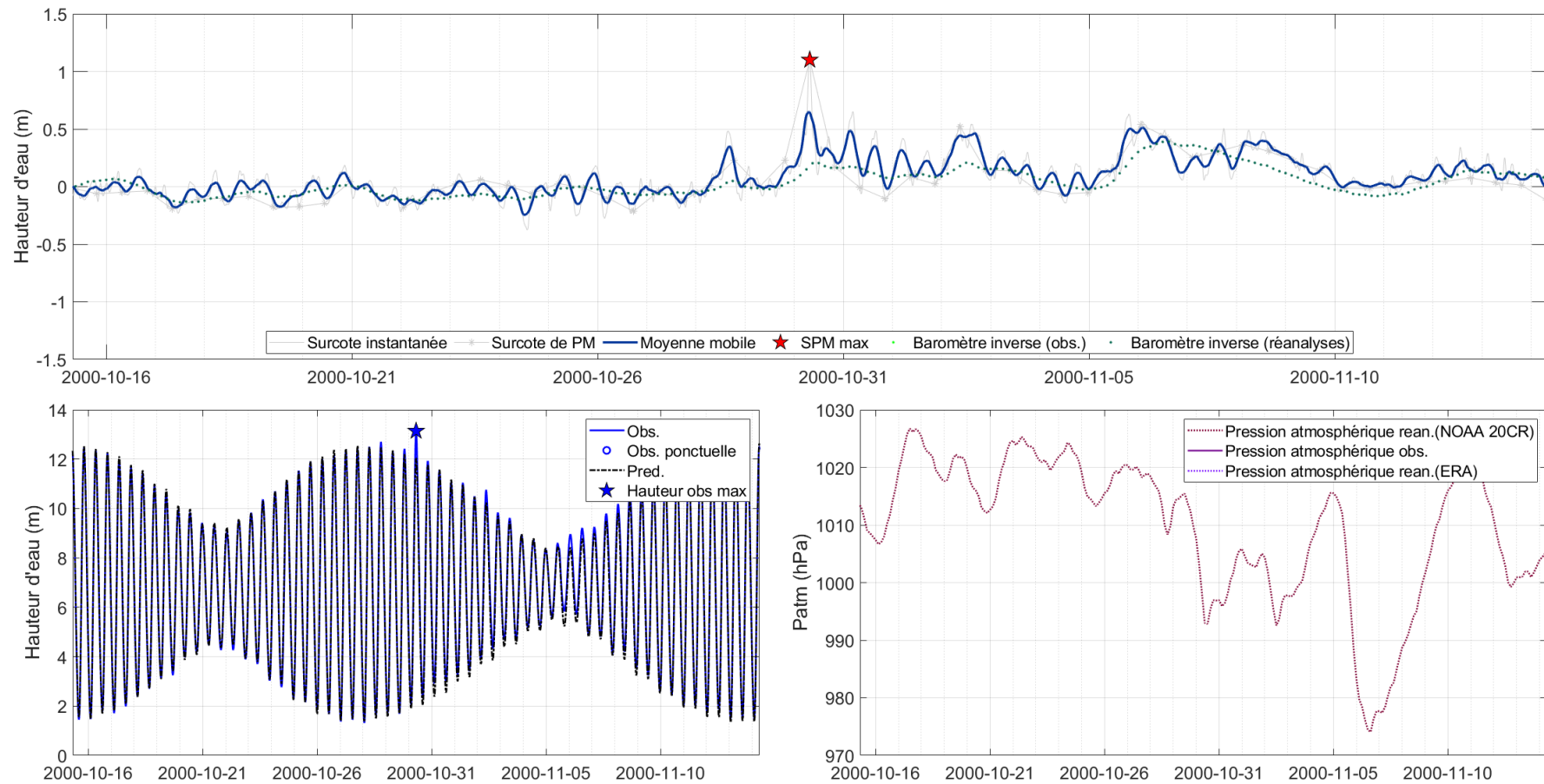
Évènement du 5 janvier 1998



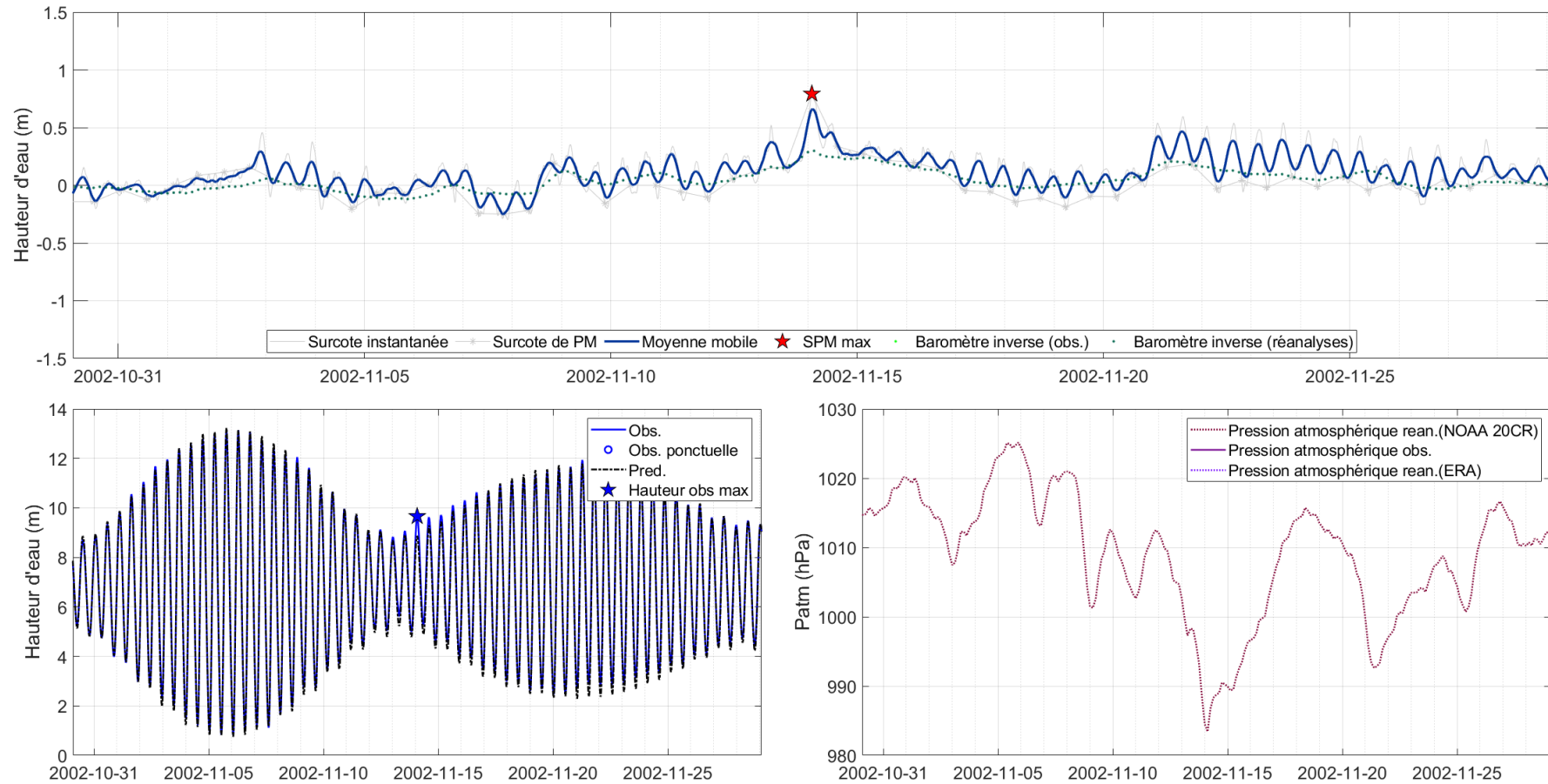
Évènement du 18 janvier 1998



Évènement du 30 octobre 2000 : Oratia



Évènement du 14 novembre 2002



ANNEXE V

Liste des fichiers ascii fournis dans le cadre du livrable 3 de l'action n°1.II de l'étude n°1 du PAPI SAINT MALO

Fichier	Description
<i>Serie_StMalo_St_Servan_brut.txt</i>	<i>Fusion de l'ensemble des données de hauteurs d'eau brutes effectuées à Saint-Malo et Saint-Servan depuis le 19^{ème} siècle.</i> Colonne 1 : horodate des mesures de hauteurs d'eau (mesures de PM/BM, données à 5min ou horaires) Colonne 2 : mesures de hauteurs d'eau n'ayant subies aucune correction verticale (références verticales indépendantes entre les différents lots de mesures). Colonne 3 : code indiquant si les mesures sont des données inédites en continue (1), de PM/BM (2) ou des données préalablement disponibles sur data.shom (3). Colonne 4 : étiquettes permettant de qualifier la qualité de la donnée (1 : bonne qualité ; 2 : probablement bonne qualité ; 3 : probablement mauvaise qualité ; 4 : mauvaise qualité).
<i>Serie_StMalo_St_Servan_valid.UTC.txt</i>	<i>Fusion de l'ensemble des données de hauteurs d'eau validées enregistrée à Saint-Malo et Saint-Servan depuis le 19^{ème} siècle.</i> Colonne 1 : horodate des mesures de hauteurs d'eau en UTC (mesures de PM/BM, données à 5min ou horaires) Colonne 2 : mesures de hauteurs d'eau en fonction du zéro hydrographique (ZH). Colonne 3 : code indiquant si les mesures sont des données inédites en continue (1), de PM/BM (2) ou des données préalablement disponibles sur data.shom (3). Colonne 4 : étiquettes permettant de qualifier la qualité de la donnée (1 : bonne qualité ; 2 : probablement bonne qualité ; 3 : probablement

	mauvaise qualité ; 4 : mauvaise qualité).
NMj_StMalo_StServan.txt Nmoy_an_StMalo_StServan.txt Nmoy_mens_StMalo_StServan.txt	<i>Séries temporelles des niveaux moyens journaliers (NMj), mensuels (NMoy_mens) et annuels (NMoy_an) calculés à partir de la série marégraphique validée de Saint-Malo/Saint-Servan.</i> Colonne 1 : horodate des mesures de niveaux moyens calculés (UTC). Colonne 2 : niveaux moyens journaliers (NMj), mensuels (NMoy_mens) et annuels (NMoy_an) calculés par rapport au ZH.
St_Servan_Patm_obs_1851-1917.UTC.txt	<i>Série temporelle des observations de pression atmosphérique mesurée à Saint-Servan entre 1851 et 1917.</i> Colonne 1 : horodate des mesures de pression atmosphérique en UTC. Colonne 2 : mesures de pression atmosphérique en hectopascal.
Liste_20_SPMmax_StMalo_StServan.txt	Colonne 1 : horodate des 20 évènements extrêmes identifiés à partir de la série marégraphique validée de Saint-Malo/Saint-Servan en UTC. Colonne 2 : surcote de pleine mer (SPM) en mètres. Colonne 3 : hauteur d'eau mesurée lors de la pleine mer en mètres par rapport au ZH.
Liste_PMBM_StServan_StMalo_valid.UTC.txt	Colonne 1 : horodate des pleines mers (PM) et basses mers (BM) extraites des séries continues de Saint-Malo/Saint-Servan entre 1850 et 2021 Colonne 2 : mesures des PM/BM en fonction du zéro hydrographique (ZH). Colonne 3 : Les PM sont indiquées avec le code 1 et les BM correspondent au code 0.