



HAL
open science

Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest

Nicolas Pouvreau

► **To cite this version:**

Nicolas Pouvreau. Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest. Climatologie. Université de La Rochelle, 2008. Français. NNT : . tel-00353660

HAL Id: tel-00353660

<https://theses.hal.science/tel-00353660>

Submitted on 16 Jan 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LA ROCHELLE

Spécialité : géophysique

présentée par

Nicolas POUVREAU

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR de L'UNIVERSITÉ de LA ROCHELLE

Directeur de thèse : Guy Wöppelmann

Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest.

soutenue le 26 septembre 2008 devant le jury composé de

Paolo PIRAZZOLI	Rapporteur
Frédérique REMY	Rapporteuse
Guy BOISTEL	Examineur
Jean-Claude MERCIER	Examineur
Lucia PINEAU-GUILLOU	Examinatrice
Guy WÖPPELMANN	Directeur de thèse

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LA ROCHELLE

Spécialité : géophysique

présentée par

Nicolas POUVREAU

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ de LA ROCHELLE

Directeur de thèse : Guy Wöppelmann

Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest.

soutenue le 26 septembre 2008 devant le jury composé de

Paolo PIRAZZOLI	Rapporteur
Frédérique REMY	Rapporteuse
Guy BOISTEL	Examineur
Jean-Claude MERCIER	Examineur
Lucia PINEAU-GUILLOU	Examinatrice
Guy WÖPPELMANN	Directeur de thèse

Remerciements

Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu durant cette thèse.

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
TABLE DES FIGURES	11
LISTE DES TABLEAUX	17
INTRODUCTION	21
CHAPITRE 1. POURQUOI S'INTERESSER AUX OBSERVATIONS HISTORIQUES DU NIVEAU DE LA MER ?	25
1.1. Pourquoi observer la marée ?.....	26
1.1.1. Besoins en ingénierie.	26
1.1.1.1. Pour prédire la marée.....	27
1.1.1.2. Pour réduire les sondages bathymétriques.....	27
1.1.1.3. Pour la détermination du zéro hydrographique.....	27
1.1.1.4. Pour la calibration des mesures d'altimétrie satellitale.....	28
1.1.1.5. Pour la réalisation d'un réseau d'alerte aux tsunamis.....	28
1.1.2. Un Indicateur du changement climatique.....	29
1.1.2.1. Evolution du niveau moyen de la mer.	30
1.1.2.2. Causes et tendances de l'augmentation du niveau de la mer.	32
1.1.2.3. Pour l'étude des surcotes et des décotes.	32
1.2. Pourquoi s'intéresser aux mesures anciennes ?	33
1.3. Généralités sur la marée et sur son analyse.....	35
1.3.1. Description du phénomène de marée.	36
1.3.1.1. La théorie statique : force génératrice de la marée.	36
1.3.1.2. La théorie dynamique : onde de marée.....	36
1.3.2. Analyse harmonique de la marée.	37
1.3.2.1. Présentation.	37
1.3.2.2. MAS, logiciel pour analyser et prédire la marée.	39
1.4. Quelques définitions.	41
1.4.1. Naissance et essor de la marégraphie.....	41
1.4.1.1. Flux et reflux de la mer.	41
1.4.1.2. Tydologie.....	41
1.4.1.3. Marégraphie.....	42
1.4.2. Matériel utilisé pour mesurer le niveau marin.	44
1.4.2.1. Echelle de marée.	44
1.4.2.2. Marégraphe.....	45
1.4.2.3. Médimarémètre.	47
1.4.3. Niveaux moyens de la mer.....	47
1.4.3.1. Niveau moyen de la mer.....	48
1.4.3.2. Niveau moyen de mi-marée.....	51
1.4.3.3. Niveau moyen de mi-marnage.....	52
1.4.3.4. Niveau moyen de la pleine mer et niveau moyen de la basse mer.....	52

PARTIE I. Evolution des méthodes d'observation du niveau marin en France

CHAPITRE 2. DE L'ECLOSION DES ACADEMIES NAISSENT LES PREMIERS PROTOCOLES. 57

2.1.	1666 : Première procédure pour observer le niveau marin.	57
2.2.	1675 : Première description d'appareil et première spécification publiée dans un journal français.	60
2.3.	1679 : Premières mesures et première méthode confrontée au terrain.....	61
2.4.	Bilan au crépuscule du 17 ^{ème} siècle.....	63

CHAPITRE 3. POUVOIR ABSOLU DES SAVANTS DE L'ACADEMIE ROYALE DES SCIENCES SUR LES MESURES DU NIVEAU MARIN. 65

3.1.	Diffusion du premier manuel recommandé par l' <i>Académie Royale des Sciences</i> (1701) et réponses obtenues.	65
3.1.1.	Détails sur le mémoire.	66
3.1.2.	1701-1702 : Premiers résultats obtenus.	67
3.1.2.1.	Protocole suivi par Baërt à Dunkerque entre 1701 et 1702.	68
3.1.2.2.	Protocole retenu par Du Bocage au Havre en 1701 et 1702.	69
3.1.2.3.	Confrontations entre le mémoire et les réalités du terrain.	70
3.2.	Protocole modifié, nouvelles demandes et nouvelles observations.	70
3.2.1.	Détails sur le mémoire.	71
3.2.2.	Réactions aux demandes d'observation du niveau de la mer en 1710.	72
3.2.2.1.	Au Havre avec Champigny.....	72
3.2.2.2.	A Brest avec Coubard.....	73
3.2.3.	Observations faites à Brest entre 1711 et 1716.	74
3.2.4.	Autres sites d'observations.	75
3.3.	Protocole mis en place par Cassini II en 1716 : méthodes, réponses et observations.	76
3.3.1.	Principes du second imprimé, sur la manière d'observer les marées.	77
3.3.2.	Réactions aux demandes du mémoire et observations obtenues.	79
3.3.2.1.	Réponses reçues par M. de Luzancay à Nantes.	79
3.3.2.2.	Réaction de M. Champigny au Havre.....	81
3.3.2.3.	Observations réalisées à Lorient.....	81
3.3.2.4.	Autres observatoires.	82
3.3.3.	Bilan de cette seconde demande d'observation.....	82
3.4.	1720-1771 : Désintérêt des savants à observer le niveau marin ?.....	82
3.4.1.	Observations ponctuelles et personnelles du niveau de la mer.	82
3.4.1.1.	Nouvelles de Saint Malo en 1729.....	83
3.4.1.2.	Evénements notables au Havre en 1732.	85
3.4.2.	Singularités pour trois zones du royaume entre 1750 et 1772.....	86
3.4.2.1.	Premières observations en Méditerranée.	86
3.4.2.2.	de Fourcroy de Ramecourt, un ingénieur aux idées révolutionnaires.	87
3.4.2.3.	Observations faites à Fouras pour le compte de l'arsenal de Rochefort.	90
3.5.	Renouveau d'étudier le flux et reflux de la mer à la fin du 18 ^{ème} siècle.	91
3.5.1.	1763 : La "révélation" de Lalande.....	91
3.5.2.	1777 : Mémoire sur les observations à faire du Flux et Reflux de la Mer.	93
3.5.3.	Réactions et conséquences du mémoire pour différents ports de France.	97
3.5.3.1.	A Lorient.	97

3.5.3.2.	A Saint-Malo.	100
3.5.3.3.	Au Havre.	101
3.5.3.4.	A La Rochelle.	102
3.5.3.5.	A Toulon.	105
3.5.3.6.	A Brest.	107
3.5.3.7.	Bilan des mesures obtenues par l'Académie.	111
3.5.4.	Observations éparses entre 1780 jusqu'en 1803.	112
3.5.4.1.	Sur les côtes de basse Normandie.	112
3.5.4.2.	A Bordeaux.	113
3.5.4.3.	En Guadeloupe.	114
3.5.4.4.	A Brest.	115

CHAPITRE 4. L'INSTITUT DE FRANCE ET LE BUREAU DES LONGITUDES, NOUVEAUX COMMANDITAIRES D'OBSERVATIONS, POUR LE COMPTE DE LA REPUBLIQUE. 119

4.1.	Présentation des deux entités.	119
4.2.	Méthode proposée en prairial, an XI (avril-mai 1803) par la commission de l'Institut.	120
4.2.1.	Origine.	120
4.2.2.	Mémoire rédigé par Lévêque, Rochon et Laplace le 26 Floréal an XI.	121
4.3.	Réponses et portées de cette suite de recommandations.	129
4.4.	Suivi singulier des mesures faites au port de Brest par le Bureau des Longitudes.	132
4.4.1.	Demandes faites avant 1803.	132
4.4.2.	Traitement particulier de Brest dans le mémoire de 1803.	133
4.4.3.	Premier ouvrage portant exclusivement sur des observations du niveau de la mer.	133
4.5.	Bilan d'action des académiciens.	146

CHAPITRE 5. NOUVEAUX BESOINS DE LA MARINE : NAISSANCE DE L'HYDROGRAPHIE MODERNE. 149

5.1.	Naissance de la tydologie.	150
5.2.	Les hydrographes, ces marins qui mesurent la mer.	152
5.2.1.	Besoin de mesurer le niveau de la mer pour la réalisation des cartes bathymétriques.	153
5.2.2.	Comment observer le niveau marin lors des levés bathymétriques ?	154
5.3.	Chazallon, "père" du premier réseau marégraphique français.	157
5.3.1.	Biographie de l'hydrographe.	157
5.3.2.	Pourquoi un tel réseau ?	160
5.3.2.1.	Perfectionnement des connaissances sur la marée.	160
5.3.2.2.	Compétition "positive" avec les anglais.	162
5.3.2.3.	Limites des observations financées avec les fonds votés annuellement par l'Assemblée.	163
5.3.2.4.	Prédire et propager : naissance de <i>l'Annuaire des marées</i>	165
5.3.3.	Présentation de la structure.	167
5.3.3.1.	Sa mise en place.	167
5.3.3.2.	Son évolution.	174
5.3.3.3.	Les autres réseaux de mesures du niveau de la mer.	176
5.3.4.	Observatoires marégraphiques.	179
5.3.4.1.	Automatisation des observations grâce à l'invention du marégraphe.	179
5.3.4.2.	Pérennité des échelles de marée, la référence verticale.	182
5.3.4.3.	Les observateurs, garants de mesures précises.	182
5.3.4.4.	Réglages en temps des appareils.	190
5.3.4.5.	Principales erreurs liées aux mesures du MCM.	192

5.4.	Evolution des besoins de la marine depuis la fin de la première guerre mondiale.	193
5.4.1.	L'âge sombre de la marégraphie française : 1920 – 1980.....	193
5.4.1.1.	Situation mondiale.....	193
5.4.1.2.	Protocole établi en 1961 par le PSMSL.....	195
5.4.2.	Les années 1980 : Regain d'intérêt pour l'observation du niveau de la mer en France.	196
5.4.2.1.	Contexte.	197
5.4.2.2.	Inventaire des observatoires marégraphiques en France en 1984.....	198
5.4.2.3.	Position du SHOM vis-à-vis des programmes marégraphiques internationaux.	201
5.4.3.	Naissance du second réseau marégraphique français : RONIM.	202
5.4.3.1.	Eléments déclencheurs.	202
5.4.3.2.	RONIM.....	204
5.5.	Bilan de deux cents années d'intimes relations entre la Marine française et la marégraphie.	206

PARTIE II. Outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer.

CHAPITRE 6. PRESENTATION DE LA RADE DE BREST ET INVENTAIRE DES OBSERVATIONS MAREGRAPHIQUES. 211

6.1.	Portrait de la zone d'étude.	211
6.1.1.	Cadre géographique.	212
6.1.2.	Cadre géologique.	213
6.1.3.	Cadre géomorphologique.	214
6.1.4.	Cadre bathymétrique.	214
6.1.5.	Action anthropique.	215
6.1.6.	Cadre hydrologique.	219
6.1.6.1.	Présentation générale.	219
6.1.6.2.	Détails sur la Penfeld.	220
6.1.7.	Cadre hydrodynamique et météorologique.	222
6.1.7.1.	Marée.	222
6.1.7.2.	Courants.	223
6.1.7.3.	Houles et vagues.	223
6.2.	Synthèse des données.	226
6.2.1.	Hauteurs horaires.	226
6.2.1.1.	Présentation générale.	226
6.2.1.2.	Détail sur les marégraphes utilisés.	230
6.2.1.3.	Les puits de tranquillisation et leur effet sur les mesures.	233
6.2.1.4.	Eléments de réponses sur les lacunes d'observation.	237
6.2.1.5.	Listing du personnel en relation avec le marégraphe.	241
6.2.2.	Mesures des PM et des BM.	243
6.2.2.1.	Détail sur les observations.	243
6.2.2.2.	Techniques d'observation.	245
6.2.2.3.	Personnel ayant participé aux mesures.	247
6.2.3.	Présentation des différents observatoires.	248
6.2.3.1.	Le Jardin du roy – le rocher de la Rose.	250
6.2.3.2.	Le bassin de Brest – Bassin Tourville.	251
6.2.3.3.	La mâture.	256
6.2.3.4.	Bilan sur la localisation des observatoires depuis 1711.	260
6.3.	Pourquoi Brest ?	260
6.3.1.	Intérêt des scientifiques pour cette série marégraphique.	261
6.3.2.	Recouvrement temporel de la série.	262
6.3.3.	Métadonnées accompagnant les observations.	263
6.3.4.	Caractéristiques du site.	263

CHAPITRE 7. CONSTRUCTION D'UNE SERIE TEMPORELLE HOMOGENE ET CONTROLES DE LA QUALITE DES DONNEES..... 265

7.1.	Article paru en 2006 dans <i>Ocean Dynamics</i>	266
7.2.	Compléments d'information sur l'article.	278
7.2.1.	Correction à apporter dans la section "MSL vs MTL".	278
7.2.2.	Conversion des observations horaires en temps et hauteurs des PM et BM.	278
7.2.3.	Élément nouveau sur la localisation de l'observatoire entre 1711 et 1716.	279
7.2.4.	Référentiels temporels utilisés pour dater les mesures.	281
7.2.5.	Relations entre les différentes références verticales : continuité du zéro hydrographique.	282
7.2.5.1.	Année 1810 : observations à la mâture et au bassin de Brest.	282
7.2.5.2.	Année 1816 : au bassin de Brest et au lieu d'observation des réductions de sondes lors de la campagne bathymétrique aux abords de Brest.	283

7.2.5.3.	Années 1850 et 1851 : observations au bassin de Brest et au marégraphe.....	284
7.2.5.4.	Quelques réflexions sur le zéro hydrographique et l'échelle de Laplace.....	284
7.3.	Compléments sur les contrôles qualité des jeux de mesures.....	286
7.3.1.	Détection d'erreurs ponctuelles.....	286
7.3.1.1.	Mesures réalisées entre 1711 et 1716.....	287
7.3.1.2.	Mesures réalisées entre 1757 et 1792.....	289
7.3.1.3.	Mesures du BdL entre 1807 et 1837.....	290
7.3.1.4.	Mesures réalisées par les marégraphes mécaniques entre 1846 et 1993.....	290
7.3.2.	Distribution des valeurs en hauteur et en temps.....	292
7.3.2.1.	Pour le jeu de valeurs entre 1711 et 1716.....	293
7.3.2.2.	Pour le jeu de valeurs entre 1757 et 1792.....	294
7.3.2.3.	Pour le jeu de valeurs entre 1807 et 1811.....	294
7.3.2.4.	Pour le jeu de valeurs entre 1810 et 1835.....	296
7.3.3.	Distribution des résidus en hauteur et en temps.....	297
7.3.3.1.	Distribution des résidus en temps.....	298
7.3.3.2.	Distribution des résidus en hauteur.....	302
7.3.4.	Ecarts quadratiques moyens des résidus.....	307
7.3.4.1.	Présentation.....	307
7.3.4.2.	RMS calculés avec les résidus horaires.....	307
7.3.4.3.	RMS calculés avec les résidus des PBM.....	310
7.3.5.	Bilan sur la qualité des mesures.....	312

CHAPITRE 8. TENDANCES, ACCELERATION ET EVOLUTION DES COMPOSANTES DU NIVEAU DE LA MER DEPUIS 300 ANS A BREST..... 313

8.1.	Tendances et accélération.....	314
8.1.1.	Etat de l'art.....	314
8.1.1.1.	Méthodes de calcul.....	315
8.1.1.2.	Tendances du niveau de la mer.....	315
8.1.1.3.	Accélération du niveau de la mer.....	318
8.1.1.4.	Anomalies dans le NMa et NMm disponibles au PSMMSL.....	319
8.1.2.	Validité des moyennes du niveau de la mer utilisées pour le calcul des tendances et de l'accélération.....	320
8.1.2.1.	La référence : tendances et accélération calculées avec les MSL.....	320
8.1.2.2.	MTL calculés avec les observations de PM et de BM.....	321
8.1.2.3.	Contrôle des tendances et accélération calculées avec les MHW.....	324
8.1.2.4.	Contrôle des tendances et accélérations calculées avec les résidus des MHW _{diurnes}	326
8.1.2.5.	Contrôle des tendances et accélérations calculées avec les MLW _{diurnes} et les MLW _{rés. diurnes}	327
8.1.2.6.	Contrôle des tendances et accélérations calculées avec les MTL _{diurnes} et des MTL _{rés. diurnes}	329
8.1.2.7.	Comparaison des tendances et accélérations calculées en pondérant les moyennes annuelles en fonction de la qualité de celles-ci.....	330
8.1.2.8.	Bilan.....	331
8.1.3.	Tendances et accélérations obtenues avec les hauteurs d'eau observées à Brest depuis 300 ans. ...	333
8.1.3.1.	Evolution régulière depuis le début du 18 ^{ème} siècle.....	335
8.1.3.2.	Mise à jour des tendances publiées en 2006.....	338
8.1.4.	Comparaison des tendances et accélérations obtenues à Brest avec d'autres séries pluriséculaires.....	341
8.1.5.	Estimation de la hausse du niveau moyen de la mer à Brest en 2100.....	343
8.2.	Evolution des composantes de la marée.....	346
8.2.1.	CRAS paru en 2006.....	346
8.2.2.	Information complémentaire sur l'article.....	355

CONCLUSION	357
-------------------------	------------

ANNEXE A : INVENTAIRE DES OBSERVATIONS DU NIVEAU DE LA MER DEPUIS LA FIN DU 17^{EME} SIECLE SE TROUVANT EN FRANCE.....	365
---	------------

ANNEXE B : POURCENTAGES DES OBSERVATIONS DU NIVEAU DE LA MER DISPONIBLES AU FORMAT NUMERIQUE POUR BREST.....	423
---	------------

ANNEXE C : ERREURS DETECTEES DANS L'OUVRAGE CONTENANT LES OBSERVATIONS DES MAREES FAITES A LA MATURE ET AU BASSIN DANS LE PORT DE BREST 1807-1835 PUBLIEE PAR LE BUREAU DES LONGITUDES EN 1843.....	429
--	------------

ANNEXE D : ERREURS DANS LA TRANSMISSION DES NIVEAUX MOYENS MENSUELLES (NMM) ET NIVEAUX MOYENS ANNUELLES (NMA) DE LA SERIE DE BREST (190091) AU PSMSL. ANOMALIES DANS LE CALCUL DES NMM ET NMA.	437
--	------------

BIBLIOGRAPHIE GENERALE	443
-------------------------------------	------------

1. Sources imprimées	444
1.1. Sources antérieures à 1795	444
1.2. Sources comprises entre 1795 et 1941	446
1.3. Sources postérieures à 1941	450
1.3.1. Sources scientifiques	450
1.3.2. Sources secondaires	457
2. Sources manuscrites	459
2.1. Archives de l'Académie des Sciences	459
2.2. Bibliothèque de l'Observatoire de Paris	460
2.3. Bibliothèque Nationale de France	460
2.4. Centre d'Accueil et de Recherche des Archives Nationales (CARAN)	460
2.5. Services Historiques de la Défense - Marine.....	461
2.5.1. à Brest.....	461
2.5.2. à Rochefort	461
2.5.3. à Toulon.....	461
2.5.4. à Vincennes	461
2.6. Services historiques de la Défense – Armée de Terre - Vincennes	462
2.7. Bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (Marne-la-Vallée)	462
2.8. Archives départementales.....	462
2.8.1. de Charente-Maritime.....	462
2.8.2. d'Ille et Vilaine.....	462
2.8.3. de l'Hérault	462

ACRONYMES ET ABREVIATIONS.....	463
---------------------------------------	------------

Table des figures

Fig. 1.1 – Facteurs principaux des variations du niveau de la mer en fonction des échelles spatio-temporelles, d’après Pugh (2004).....	30
Fig. 1.2 – Estimations du niveau de la mer depuis 140 000 ans (par Lambeck et Chappell, 2001 ; Lambeck <i>et al.</i> , 2002). Les barres d’erreurs indiquent les limites des estimations à partir des données disponibles. Le carré rouge indique la période couverte dans b. D’après Church <i>et al.</i> (2008).....	31
Fig. 1.3 – Histogramme présentant le nombre de séries de mesures du niveau de la mer en fonction du nombre d’années d’enregistrement et la distribution cumulative en %, d’après Douglas (2001).	34
Fig. 1.4 – Niveau moyen de la mer (MSL) et niveau moyen de mi-marée (MTL) à Brest entre 1846 et 2007. Mesures disponibles sur SONEL.	52
Fig. 1.5 – Niveau moyen annuel de la pleine mer (MHW) et niveau moyen annuel de la basse mer (MLW) à Brest entre 1846 et 2007. Les lignes verticales continues et les lignes verticales en pointillés correspondent au moment du minimum (respectivement du maximum) de la déclinaison de la Lune. Valeurs des minimums et maximums de la déclinaison de la Lune d’après Pugh (2004).	53
Fig. 2.1 – Dessin de Perrault (1675), complété par les ajouts en couleur.	60
Fig. 3.1 – Appareil mesurant le niveau de la mer, d’après Cassini (1710b).	68
Fig. 3.2 – Observations du 5 janvier 1778 à Lorient, par Molard, lieutenant de Frégate. Source : SHD – Marine Vincennes, cote : SH 55.	98
Fig. 4.1 – Plan figuratif du port de Brest, modifié.	141
Fig. 5.1. – Portrait de Chazallon (date inconnue). Index biographique – Archives de l’Académie des Sciences.	159
Fig. 5.2. – Schéma de fonctionnement du marégraphe (Larousse, 1928).	179
Fig. 5.3. – Gravures du marégraphe de Chazallon (Archive SHOM, portefeuille 12-7.47)..	181
Fig. 5.4. – Variation annuelle de l’équation du temps (TSV – TSM) pour 2008. Le TSV dure exactement 24h00 les 4 jours de l’année où l’équation du temps est égale à 0.	190
Fig. 5.5 – Distribution temporelle pour chacune des 1984 stations disponibles au PSMSL de la première année de mesures.	194
Fig. 5.6 – Répartition des marégraphes en France pour chaque organisme en ayant la gestion.	199
Fig. 5.7 – Année d’installation des 80 marégraphes recensés en France en 1984 (manque l’observatoire de Brest débutant en 1846 et le site de Marseille démarrant en 1885). ..	200
Fig. 5.8. – Répartition des MCN en France pour chaque organisme en ayant la gestion (CT : Collectivités Territoriales).....	205
Fig. 6.1 – Carte de la rade de Brest (image satellite, source Google Earth, 2008/CNES/Spot).	212
Fig. 6.2 – Carte géologique de la rade de Brest, d’après Lardeux (1996). 1. Paléozoïque ; 2. Quartzophyllades de l’Elorn ; 3. Micaschistes du Conquet ; 4. Gneiss de Lesneven (=gneiss de Ploumoguier) ; 5. Gneiss de Brest ; 6. Granite de Saint-Renan-Kersaint ; 7. Trondhjémite de Trégana ; 8. Dolérite de Breterc’h ; 9. Failles.	213
Fig. 6.3 – SHOM. Carte bathymétrique de la rade de Brest (7400), publication 1995 (convention de stage n°U/2004/126). Légende : en vert profondeur inférieure à 0m ; en	

bleu foncé profondeur comprise entre 0 et 5m ; en bleu clair profondeur comprise entre 5 et 10m ; en blanc profondeur supérieure à 10m.	215
Fig. 6.4. – Constructions anthropiques aux abords de la Penfeld (photographie aérienne, source Google Earth, 18/03/2004).	216
Fig. 6.5 – Chronologie de construction des digues et jetées. En rouge [1839-1848], violet [1864-1889], bleu foncé [1889-1896], marron [1895-1900], vert [1900-1905], orange [avant 1919], jaune [1931-1933], bleu clair [années 1970] (Source Google Earth, 18/03/2004).	217
Fig. 6.6. – Hydrographie du bassin versant de la rade de Brest d’après Troadec <i>et al.</i> (1997), source IGN.	219
Fig. 6.7 – Spectre de marée à Brest calculé sur la période 2001 – 2007 avec MAS.	222
Fig. 6.8 – Localisation de la bouée CMO-CETMEF dans la rade de Brest par rapport au marégraphe (Source Google Earth, 18/03/2004).	224
Fig. 6.9 – Hauteurs significatives (Hs) et Période significative (Ts) mesurées avec la bouée installée au port du château de Brest. Mesures horaires (en noir) et moyennes mensuelles (en bleu). Mesures brutes fournies par le BMO et le CETMEF.	225
Fig. 6.10 – Distribution des hauteurs significatives (a) et périodes significatives (b) pour l’ensemble des observations. Echelle logarithmique pour l’axe des ordonnées.	225
Fig. 6.11 – Principaux MCM utilisés entre 1949 et 1992. Source : SHOM.	231
Fig. 6.12. – Schéma de l’Observatoire de Brest. Sources : a : Archives du SHOM, cote D818 ; b : modifié, d’après le SHOM. URL : http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/img/brest.gif (consulté le 5 octobre 2008).	234
Fig. 6.13. – Effet de la houle sur le niveau moyen à l’intérieur du puits de tranquillisation. a. construit après la seconde guerre mondiale à Brest (d’après la figure C.6B de Simon (2007)) ; b. construit sous l’ère Chazallon et fonctionnant jusqu’en 1944. Chaque courbe représente, pour une amplitude de houle déterminée, la variation du niveau moyen (en cm) dans le puits en fonction de la période du signal externe.	236
Fig. 6.14 – Localisation des différents observatoires de la marée à Brest depuis 1679. Fond cartographique extrait des travaux de Cloître et Bugat (1991).	249
Fig. 6.15 – Détail de l’élévation de l’entrée d’une des formes de Pontaniou. D’après Choquet (1757).	253
Fig. 6.16 – Bateau le <i>Louis XIV</i> dans la forme de Brest. Cliché pris en 1863 d’après Boulaire (2004). Source du cliché : Direction des Constructions Navales.	254
Fig. 6.17 – Nouvelle grue électrique, passerelle du Bassin de Brest, et échelle de marée (≈1910).	255
Fig. 6.18 – Photographie du bassin de Brest après sa libération en septembre 1944. Source <i>Le Télégramme</i>	255
Fig. 6.19. – Le port de Brest en 1854, par Morel-Fatio. Paris, Musée National de la Marine.	256
Fig. 6.20 – Le port de Brest en 1854, Léon Antoine Morel-Fatio [1810-1871] Détail. Paris, Musée National de la Marine.	257
Fig. 6.21 – Carte postale du port militaire de Brest et détail sur l’observatoire, au début du 20 ^{ème} siècle.	257
Fig. 6.22. – Carte postale du port militaire de Brest et détail sur l’observatoire, durant les années 1920-1930.	258
Fig. 6.23 – Carte postale du port militaire de Brest prise après 1954.	258
Fig. 6.24 – Photographies aériennes prises à différentes époques au dessus de l’abri du marégraphe. Les flèches montrent l’observatoire. Sources. A, B : Archives Municipales et Communautaires de Brest. Copyrights IFREMER, SHOM et Photothèque Nationale ;	

C : Google Earth ; D : Secrétariat diapos ; Etat aux Anciens Combattants (SEAC), n° 06_29_04777_NUC_A.....	259
Fig. 6.25 – Frise chronologique des observatoires du niveau de la mer à Brest depuis 1711.	260
Fig. 6.26. – Répartition temporelle des articles utilisant les mesures du niveau de la mer observées à Brest.....	261
Fig. 6.27 – Frise chronologique de la nature et du type des observations du niveau de la mer effectuées à Brest depuis 1711.....	262
Fig. 6.28 – Pourcentages des observations disponibles sous format numérique en 2004 (gris clair) et nouvellement numérisées depuis (en noir).	263
Fig. 7.1 – <i>Embarquement au Port de Brest. Dédié à l'Académie de Marine</i> par Ozanne l'ainé. Détail, SHD – Marine Brest, cote : OA 1994-1.	280
Fig. 7.2 – Distribution des valeurs en lignes et des pouces pour les hauteurs d'eau observées entre 1711 et 1716.....	293
Fig. 7.3 – Distribution des valeurs en minutes associées aux hauteurs d'eau observées entre 1711 et 1716.....	293
Fig. 7.4. – Distribution des valeurs en pouces pour les hauteurs d'eau observées entre 1757 et 1792.....	294
Fig. 7.5. – Distribution des valeurs en lignes et en pouces pour les hauteurs d'eau observées entre 1807 et 1811 à la mât.	295
Fig. 7.6 – Distribution des valeurs en minutes associées aux hauteurs d'eau observées entre 1807 et 1811 (en rouge : pics pour 0, 10, 20, 30, 40 et 50 minutes ; en bleu : pics pour 7, 17, 27, 37, 47 et 57 minutes ; gris pour les autres).....	295
Fig. 7.7. – Distribution des valeurs en lignes et des pouces pour les hauteurs d'eau observées entre 1810 et 1835.	296
Fig. 7.8. – Distribution des valeurs en minutes associées aux hauteurs d'eau observées entre 1810 et 1835 (en rouge : pics pour 0, 15, 30 et 45 minutes ; en bleu : pics pour 10, 20, 40 et 50 minutes ; gris pour les autres).....	297
Fig. 7.9.a – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1711 à 1716 (en minutes). 299	
Fig. 7.9.b – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1807 à 1811 (en minutes). 300	
Fig. 7.9.c – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1810 à 1835 (en minutes). 300	
Fig. 7.9.d – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1846 à 1857 (en minutes). 300	
Fig. 7.9.e – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1860 à 1944 (en minutes). 301	
Fig. 7.9.f – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1953 à 1992 (en minutes). 301	
Fig. 7.9.g – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1993 à 2007 (en minutes). 301	
Fig. 7.9.h – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1711 à 2007 (en minutes). 302	
Fig. 7.10.a – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1711 à 1716 (en cm). . 304	
Fig. 7.10.b – Distribution des résidus en hauteurs des PM entre 1757 à 1792 (en cm). 304	
Fig. 7.10.c – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1807 à 1811 (en cm). . 304	
Fig. 7.10.d – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1810 à 1835 (en cm). . 305	
Fig. 7.10.e – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1846 à 1857 (en cm). . 305	
Fig. 7.10.f – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1860 à 1944 (en cm)... 305	
Fig. 7.10.g – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1953 à 1992 (en cm).. 306	
Fig. 7.10.h – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1993 à 2007 (en cm).. 306	
Fig. 7.10.i – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1711 à 2007 (en cm)... 306	
Fig. 7.11 – RMS annuels des résidus calculées avec les hauteurs horaires (cm)..... 308	
Fig. 7.12 – Distribution des RMS annuels de 1846 à 2007 (a), de 1846 à 1944 (b), de 1953 à 1992 (c) et de 1993 à 2007 (d).	310
Fig. 7.13 – RMS annuels des résidus calculés avec les PBM (cm).....	311

Fig. 7.14 – Effets du décalage en temps sur des observations horaires du niveau de la mer. En bleu, la courbe de marée bien calée en temps, en violet celle décalée. En rouge, le décalage en hauteur introduit par la courbe de marée mal calée. L'encadrement, durant la BM montre que le décalage en temps n'affecte pas les résidus en hauteurs des BM ou PM.	312
Fig. 8.1 – Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2007) d'après Topex/Poseidon et Jason-1. URL : http://www.legos.obs-mip.fr/fr/equipes/gohs/resultats/b1_nivmer1 (consulté le 5 octobre 2008).	316
Fig. 8.1 – Les MSL à Brest entre 1846 et 2007. a : MSL observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).	321
Fig. 8.2 – Pourcentage d'observations de PM diurnes, PM nocturnes, BM diurnes et BM nocturnes.	322
Fig. 8.3 – Les $MTL_{m. jour.}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MTL_{m. jour.}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).	323
Fig. 8.4 – Les $MTL_{diurnes.}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MTL_{diurnes.}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).	323
Fig. 8.5 – Les $MHW_{m. jour.}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MHW_{m. jour.}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).	325
Fig. 8.6 – Les $MHW_{diurnes.}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MHW_{diurnes.}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).	325
Fig. 8.7 – Les $MHW_{rés. diurnes}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MHW_{rés. diurnes}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).	327
Fig. 8.8 – Les $MLW_{diurnes}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MLW_{diurnes}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).	328
Fig. 8.9 – Les $MLW_{rés. diurnes}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MLW_{rés. diurnes}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).	328
Fig. 8.10 – Les $MTL_{rés. diurnes}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MTL_{rés. diurnes}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).	329
Fig. 8.11 – Moyennes annuelles des niveaux de la mer à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{diurnes}$) ; b) moyennes diurnes de la marée ($MTL_{diurnes}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{diurnes}$).	333
Fig. 8.12 – Moyennes annuelles des résidus à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{rés. diurnes}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{rés. diurnes}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{rés. diurnes}$).	334
Fig. 8.13 – Moyennes annuelles des niveaux de la mer à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{diurnes}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{diurnes}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{diurnes}$). Tendances linéaires en rouge et régressions quadratiques en bleu.	336
Fig. 8.14 – Moyennes annuelles des résidus à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{rés. diurnes}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{rés. diurnes}$) ; c) basses mers	

diurnes ($MLW_{res. diurnes}$). Tendances linéaires en rouge et régression quadratiques en bleu.	337
Fig. 8.15 – Moyennes annuelles des niveaux de la mer à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{diurnes pond.}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{diurnes pond.}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{diurnes pond.}$). Tendances linéaires en rouge et régressions quadratiques en bleu pondérées.....	337
Fig. 8.16 – Moyennes annuelles des résidus à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{res. diurnes pond.}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{res. diurnes pond.}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{res. diurnes pond.}$). Tendances linéaires en rouge et régression quadratiques en bleu pondérées.....	338
Fig. 8.17 – Moyennes annuelles des niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{diurnes}$) à Brest depuis 1807. La droite rouge correspond à la tendance linéaire et la courbe bleue prend en compte une accélération. Les droites violettes correspondent aux tendances calculées pour : 1807-1892, 1892-1983, 1983-2004.	339
Fig. 8.18 – $MHW_{diurnes}$ et $MTL_{diurnes}$ de Brest comparés aux autres longues séries existantes du niveau de la mer. Les effets liés au rebond post-glaciaire ont été corrigés de la tendance pour Stockholm (Ekman, 1999). Les valeurs des MHW de Liverpool ont été ajustées (Woodworth, 1999).	341
L'accélération déterminée à Brest est cohérente avec les valeurs disponibles dans la littérature pour Stockholm et Liverpool à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 95%, ce qui n'est pas le cas pour Amsterdam, site présentant un écart équivalent entre 2 et 3 fois (95 - 99%) les limites des erreurs avec les MHW et MTL.	342
Fig. 8.19 – Résidus des $MHW_{diurnes}$ et résidus des $MTL_{diurnes}$ de Brest comparés aux autres longues séries existantes du niveau de la mer. Les effets liés au rebond post-glaciaire ont été corrigés de la tendance pour Stockholm (Ekman, 1999). Les valeurs des MHW de Liverpool ont été ajustées (Woodworth, 1999).	342
Fig. 8.20 – Hausse du niveau de la mer prédite pour le 21 ^{ème} siècle à partir des accélérations calculées avec les $MTL_{diurnes}$ et les $MTL_{res. diurnes}$ entre 1807 et 2004. Les chiffres à droite correspondent à la hausse du niveau de la mer entre 2001 et 2100 avec en gris les valeurs à \pm deux incertitudes, en noir à \pm une incertitude et en gras, à la valeur exacte de l'accélération.	344
Fig. 8.21 – Hausse du niveau de la mer prédit pour le 21 ^{ème} siècle à partir des accélérations calculées avec les $MHW_{diurnes}$ et les $MHW_{res. diurnes}$ entre 1711 et 2007. Les chiffres à droite correspondent à la hausse du niveau de la mer entre 2001 et 2100 avec en gris les valeurs à \pm deux incertitudes, en noir à \pm une incertitude et en gras à la valeur exacte de l'accélération.	345
Fig. 8.22 – Evolution des amplitudes (points noirs, échelle des ordonnées à gauche, exprimée en m) et des phases (croix, échelle des ordonnées à droite, exprimée en degré) pour les ondes M2 et O1 à Brest. D'après Cartwright, 1972 (les traits verticaux, rajoutés à la figure initiale sont les dates de transformation de la rade-abri de Brest donné par l'auteur).	347
Fig. 8.23 – Evolution de l'amplitude de l'onde de marée M2 à Brest (les carrés correspondent aux nouvelles amplitudes non disponibles lors de la rédaction de l'article pour les années 1915, 2006 et 2007). Les barres d'erreurs correspondent à $\pm 1\sigma$. La courbe sinusoidal provient de l'ajustement non linéaire des valeurs de Brest.	355
Fig. A.1. – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine.	368
Fig. A.2. – Localisation des observations du niveau de la mer dans le monde or France métropolitaine.....	372

Fig. A.3. – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine le long de la mer du Nord et de la Manche (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 25 années de données).	378
Fig. A.4. – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine le long de la cote Atlantique (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 25 années de données).....	384
Fig. A.5. – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine le long de la cote méditerranée (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 20 années de données).....	391
Fig. A.6. – Localisation des observations du niveau de la mer en Europe or France métropolitaine.....	394
Fig. A.7. – Localisation des observations du niveau de la mer en Afrique (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 4 années de données).	397
Fig. A.8. – Localisation des observations du niveau de la mer en Afrique du Nord.	399
Fig. A.9. – Localisation des observations du niveau de la mer en Afrique de l’Ouest.	401
Fig. A.10. – Localisation des observations du niveau de la mer le long de la cote Malgache et sur les îles de Mayotte et de la réunion.	404
Fig. A.11. – Localisation des observations du niveau de la mer le long de la cote asiatique (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 5 années de données).....	407
Fig. A.12. – Localisation des observations du niveau de la mer le long des îles du Pacifique (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 3 années de données).....	411
Fig. A.13. – Localisation des observations du niveau de la mer le long des cotes d’Amérique du Sud.....	414
Fig. A.14. – Localisation des observations du niveau de la mer le long des cotes d’Amérique du Nord.....	416
Fig. A.15. – Localisation des observations du niveau de la mer pour les TAAF.....	418

Liste des tableaux

Tab. 1.1 – Contributions à la montée du niveau de la mer basées sur les observations comparées aux modèles pour les quatre dernières décennies et pour la période de 1993 à 2003. D’après le rapport de l’IPCC (2007).	32
Tab. 1.2 – Principales composantes du potentiel lunaire et du potentiel solaire (respectivement L et S dans la colonne origine). D’après Simon (2007).	38
Tab. 1.3 – Comparaison entre les MCM et MCN.	46
Tab. 1.4 – Ecart moyen quadratique entre le NMm déterminé à partir du NMj calculées avec le filtre F168 et le NMm indiqué dans le tableau. Calcul à partir des mesures marégraphiques de Newlyn, d’après Pugh (1987).	49
Tab. 1.5 – Ecart moyen quadratique entre le NMm déterminé à partir du NMj calculées avec le filtre F168 et le NMm indiqué dans le tableau. Calcul à partir des mesures marégraphiques de Brest entre 1846 et 2007 disponible sur SONEL.	49
Tab. 1.6 – Ecart moyen quadratique entre le NMa déterminé à partir de NMm calculées avec les NMj utilisant un filtre F168 et le NMm indiqué dans le tableau. Calcul à partir des mesures marégraphiques de Brest entre 1846 et 2007 disponible sur SONEL.	50
Tab. 4.1 – Inventaire des expéditions des observations des marées faites à Brest entre 1806 et 1842.	145
Tab. 5.1. – Inventaire des marégraphes installés par Chazallon.	172
Tab. 5.2. – Inventaire des marégraphes en fonctionnement après l’ère Chazallon géré par le Service Hydrographique.	174
Tab. 5.3. – Inventaire des marégraphes gérés par le service des Ponts et Chaussées jusqu’en 1934.	176
Tab. 5.4. – Inventaire des médimarémètres installés en France en 1957 (les périodes entre crochets ne sont pas plus précises dans le texte de Descosy).	178
Tab. 5.5 – Principales sources d’erreurs sur les mesures causées par les MCM (Nature : A (Accidentelle) et S (Systématique) d’après Lucas et Le Goff (communication personnelle).	192
Tab. 5.6 – Liste des ports faisant partie de RONIM avec leur de la date d’installation et mention de l’organisme partenaire. D’après URL : http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/maree14.htm . (consulté le 5 octobre 2008).	204
Tab. 5.7 – Comparaison entre le réseau marégraphique "Chazallon" et RONIM.	207
Tab. 6.1 – Débit des fleuves tributaires de la Rade de Brest d’après Auffret (1983), Berthois et Auffret (1970b). Le Débit Caractéristique de Crue (D.C.C.) 10 équivaut à la dixième valeur annuelle prise dans la liste des débits moyens journaliers classés par ordre décroissant. Le Débit Caractéristique d’Etiage (D.C.E.) 10 équivaut à la dixième valeur annuelle prise dans la liste des débits moyens journaliers classés par ordre croissant. .	220
Tab. 6.2. – Débits de la Penfeld rapportées dans Merceron <i>et al.</i> (1978).	221
Tab. 6.3 – Amplitude d’ondes principales de marée observées à Brest.	223
Tab. 6.4 – Moyenne des hauteurs significatives et périodes significatives pour l’été et l’hiver.	225
Tab. 6.5 – Moyenne des hauteurs significatives et périodes significatives pour l’été et l’hiver.	226

Tab. 6.6 – Synthèse des observations horaires de marégraphie à Brest (R : Registre ; M : Marégramme ; N : Numérique).	227
Tab. 6.7 – Détail sur les nouvelles séries de hauteurs horaires disponibles.	228
Tab. 6.8. – Inventaire des MCM utilisés à Brest.	230
Tab. 6.9 – Inventaire des MCN utilisés à Brest.	232
Tab. 6.10 – Inventaire des caractéristiques du puits de tranquillisation et de l’orifice de communication.	235
Tab. 6.11 – Synthèse explicative des lacunes dans les observations du niveau marin à Brest.	239
Tab. 6.12 – Liste du personnel ayant eu la gestion, l’entretien et le suivi des marégraphes.	242
Tab. 6.13 – Synthèse des observations de PM et de BM à Brest.	245
Tab. 6.14 – Synthèse sur les techniques d’observation de PM et de BM à Brest.	246
Tab. 6.15 – Liste des observateurs des marées à Brest depuis 1679.	247
Tab. 6.16 – Liste des lieux d’observation depuis 1679.	248
Tab. 6.17 – Liste des principales modifications réalisées sur la forme de Brest.	252
Tab. 7.1 – Résidus en temps et résidus en hauteurs entre 3 méthodes de conversion des observations horaires en données de PM et de BM avec le registre des PM et de PM pour l’année 1856.	279
Tab. 7.2 – Inventaire des systèmes de temps utilisés pour les nouveaux jeux de mesures.	281
Tab. 7.3 – Nombre de mesures pour l’année 1810 réalisées aux deux observatoires.	282
Tab. 7.4 – Moyennes et écarts-types sur les moyennes des différences entre les hauteurs observées au bassin de Brest et celles mesurées à la mâturation.	283
Tab. 7.5 – Moyennes et écarts-types sur les moyennes des différences entre les hauteurs observées au bassin de Brest et celles mesurées pour réduire les sondes lors de la campagne bathymétrique aux abords de Brest.	283
Tab. 7.6 – Moyennes et écarts-types sur les moyennes des différences entre les hauteurs observées au bassin de Brest et celles mesurées avec le marégraphe.	284
Tab. 7.7 – Liste des corrections indiquées par Cartwright (1972) contrôlées (pi pour pieds et po pour pouces).	287
Tab. 7.8 – Liste des nouvelles corrections apportées (pi pour pieds, po pour pouces et lig pour lignes).	288
Tab. 7.9 – Inventaire des erreurs détectées pour les mesures acquises entre 1757 et 1792. ..	289
Tab. 7.10 – Détails sur chacune des hauteurs horaires corrigées (hauteurs données en cm, unité adoptée par le SHOM).	291
Tab. 7.11 – Tendances centrales et dispersion des résidus en temps (minute) pour les différents lots de données marégraphiques.	298
Tab. 7.12 – Tendances centrales et dispersion des résidus en hauteur (cm) pour les différents lots de données marégraphiques.	303
Tab. 7.13 – Tendances centrales du RMS et indications sur la dispersion en hauteur (cm) pour les différents lots de données marégraphiques.	308
Tab. 8.1 – Estimation des tendances et accélérations du niveau de la mer et prévisions pour la fin du 21 ^{ème} siècle.	314
Tab. 8.2 – Estimation de la hausse du niveau de la mer à partir des données marégraphiques (M), altimétriques (A) et avec des deux couplées (M A).	317
Tab. 8.3 – Estimation de l’accélération du niveau de la mer à partir de différentes études.	319
Tab. 8.4. – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et MTL à Brest (1846-2007). L’écart moyen quadratique des résidus est calculé à partir des différences des niveaux moyens annuelles entre les MTL et les MSL observées.	324

Tab. 8.5. – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et MHW à Brest (1846-2007). L'écart moyen quadratique des résidus est calculé à partir des différences des niveaux moyens annuelles entre les MHW et le MSL.	326
Tab. 8.6 – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et les MHW _{rés. diurnes} à Brest (1846-2007). L'écart moyen quadratique des résidus est calculé avec les différences des niveaux moyens annuelles entre le MHW et le MSL.....	327
Tab. 8.7. – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et les MLW _{diurnes} et MLW _{rés. diurnes} à Brest (1846-2007). L'écart moyen quadratique des résidus est calculé à partir des différences des niveaux moyens annuelles entre le MLW et le MSL.....	329
Tab. 8.8. – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et les MTL _{rés. diurnes} à Brest (1846-2007). L'écart moyen quadratique des résidus est calculé à partir des différences des niveaux moyens annuelles entre le MTL _{rés. diurnes} et le MSL.....	330
Tab. 8.9. – Tendances et accélérations pondérées et non pondérées calculées avec les différentes moyennes de Brest (1846-2007).	331
Tab. 8.10 – Tendances et accélérations pondérées et non pondérées calculées avec les différentes moyennes de Brest depuis 1711.....	335
Tab. 8.11. – Tendances calculées par Wöppelmann <i>et al.</i> (2006b).....	338
Tab. 8.12. – Tendances calculées par tronçons avec les MTL _{diurnes} et MTL _{rés. diurnes} entre 1807 et 2004.....	339
Tab. 8.13. – Tendances pondérées calculées par tronçons avec les MTL _{diurnes} et MTL _{rés. diurnes} entre 1807 et 2004.....	339
Tab. A.1. - Inventaire des observations du niveau de la mer en France métropolitaine.	371
Tab. A.2. - Inventaire des observations du niveau de la mer dans le monde or France métropolitaine.....	376
Tab. A.3. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer le long des cotes de la mer du Nord et de la Manche en France métropolitaine (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).	383
Tab. A.4. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer le long du littoral Atlantique français (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre)...	390
Tab. A.5. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer le long du littoral méditerranéen français (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).	392
Tab. A.6. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer le long du littoral européen (France excepté) (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).	395
Tab. A.7. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Mauritanie, en Somalie, à Djibouti et en Egypte (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).	398
Tab. A.8. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Afrique du Nord (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).....	401
Tab. A.9. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).....	403
Tab. A.10. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer à Madagascar, et pour les îles de Mayotte et la Réunion (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).	406
Tab. A.11. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Asie du Sud Est (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).....	410
Tab. A.12. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer dans les Îles du Pacifique (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).	413

Tab. A.13. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Amérique du Sud (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).....	415
Tab. A.14. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Amérique du Nord (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).....	417
Tab. A.15. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer pour les Terres Australes et Antarctiques Françaises (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).	418
Tab. B.1. – Pourcentages des mesures du niveau de la mer observées à Brest et disponibles au format numérique (code des couleurs / % d’observations. Blanc : entre 0 et 24% ; gris très clair : entre 25 et 49% ; gris : entre 50 et 74% ; gris foncé : 75 et 100%). Les années en gras signifient que 100% des observations sont disponibles.....	428
Tab. C.1. – Inventaire des erreurs détectées pour les observations réalisées entre 1807 et 1811 à la mâture (hauteurs exprimées en mètres).	430
Tab. C.2. – Inventaire des erreurs détectées pour les observations réalisées entre 1810 et 1835 au bassin de Brest (hauteurs exprimées en mètres).....	436
Tab. D.1. – NMa du PSMSL présentant des différences avec les NMa des registres du SHOM (cm). * problème d’arrondi indiqué précédemment.....	438
Tab. D.2. – NMm du PSMSL présentant des différences avec les NMm des registres du SHOM de 1937 à 1943 (cm). * problème d’arrondi indiqué précédemment.....	440
Tab. D.2. – NMm du PSMSL présentant des différences avec les NMm des registres du SHOM pour l’année 1930 (cm).....	441

Introduction

Le niveau de la mer est un paramètre important utilisé dans les études relatives au changement climatique. Les évaluations du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat [GIEC, en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC] résume l'état des connaissances sur les variations du niveau de la mer en relation avec les changements climatiques (IPCC, 2008 ; IPCC, 2001 ; IPCC, 1996). Douglas (2001) discute dans son ouvrage des difficultés des chercheurs au cours des dernières décennies à parvenir à un consensus pour déterminer précisément, à l'échelle mondiale, l'élévation du niveau des mers. Il souligne à plusieurs reprises (1997, 1992, 1991) l'importance de l'utilisation de très longues séries d'observations du niveau de la mer. Woodworth (2006) demande à la "communauté" (politique) de prendre des engagements pour mener des recherches dans les archives afin de retrouver tous documents en relation avec les mesures et l'observation du niveau de la mer. Ce dernier critique également le fait que les séries d'observation sont étudiées sans qu'il ne soit pris en compte leur qualité. Il s'avère donc important de revisiter les longues séries marégraphiques afin d'utiliser au mieux ce patrimoine scientifique devenu incontournable aujourd'hui dans l'étude et la compréhension des processus participant au changement climatique.

C'est dans ce contexte qu'un des objectifs initiaux de cette thèse était l'étude des séries anciennes du niveau de la mer le long de la côte charentaise. L'observatoire de Brest devant servir de "laboratoire test" dans la mise en place des outils d'analyse, de traitement et de contrôle des observations historiques du niveau de la mer. Finalement, au vu des questions et de la richesse des données trouvées pour ce port, l'essentiel du travail de thèse porte sur les observations du niveau de la mer mesurées à Brest. A mesure des avancements et des réflexions les accompagnant mais également par une prise de conscience des réalités du terrain, je réalisais toute l'étendue du sujet ainsi que ses complexités.

Lors de mes premiers contrôles d'observations du 18^{ème} siècle, la grande qualité des mesures réalisées avec une échelle de marée m'a frappé. Comment se pouvait-il, qu'avec un instrument aussi rudimentaire on puisse mesurer si précisément le niveau de la mer ? Ma question trouva sa réponse en juin 2004, lors de l'étalonnage des marégraphes installés à Marseille. Durant un cycle complet de marée ($\approx 12h25$) nous mesurions toutes les 10 minutes le niveau de la méditerranée à cet endroit avec plusieurs appareils, dont l'échelle de marée. C'est lors de cette inoubliable expérience que je pris la pleine mesure du potentiel des observations lues directement à partir d'échelles de marée.

Cette expérience me fit prendre conscience également de la grande abnégation de la plupart des observateurs. Comment pouvaient-ils, chaque jour de l'année, toutes les 6h00, rester entre 30 minutes et 1 heure devant une échelle de marée à surveiller et à noter l'heure et la hauteur de la basse mer (BM) ou de la pleine mer (PM) alors que moi, au bout de 12h00 le travail commençait à devenir pénible ? De plus ces observateurs n'étaient pas forcément rémunérés ! De retour à l'Université, je trouvais toute les ressources et la motivation nécessaires pour digitaliser plus de 200 000 données de hauteur trouvées dans différents

centres d'archivages rien que pour Brest (dont la moitié pour les observations horaires entre 1846 et 1857).

L'invention du marégraphe permit de résoudre les inconvénients naturels inhérents aux mesures visuelles du niveau de la mer. C'est durant cette période faste, l'âge d'or de la marégraphie en France, que le littoral français s'est paré d'observatoires. Durant cette période, qui se situerait dans les années 1840 – 1920, une personne travaillait à temps plein sur chaque observatoire. Il entretenait le marégraphe, il effectuait des contrôles journaliers en temps et en hauteur sur la bonne marche de l'appareil, dépouillait les marégrammes en inscrivant toutes les informations sur des registres et surtout, il était formé pour remplir au mieux son travail.

Malheureusement, à cette époque faste succéda une période plus sombre. Alors que j'étais habitué à me référer, aux documents sources pour chaque anomalie détectée afin de la corriger ou de l'expliquer, je pris conscience d'un réel changement dans la manière d'observer le niveau de la mer à Brest après la seconde guerre mondiale. Excité par la découverte de marégrammes inédits réalisés à Brest entre 1949 et 1952, j'ai réalisé que ces feuilles, pourtant porteuses des variations du niveau de la mer avec les courbes caractéristiques de la marée, seraient difficilement exploitables car sans aucune métadonnée (cf. 6.3.3. pour notre définition de ce terme) les accompagnant. Quelle déconvenue, moi qui pensais naïvement que les observations acquises par les marégraphe étaient dignes de confiance ! Cette naïveté était nourrie de mon expérience unique avec les données marégraphiques de Brest, antérieures à 1944 qui ne souffraient pas de dysfonctionnement.

Avec le regain d'intérêt de la marégraphie depuis les années 1990, et les nouvelles générations de marégraphe numériques, plus autonomes et moins dépendants des contrôles quasi-journaliers, la qualité des mesures du niveau de la mer est aujourd'hui supérieure à ce qu'elle était durant "l'âge d'or". De plus, l'ère numérique a l'autre avantage de récupérer rapidement les données (temps réel), de les valider puis de les diffuser de manière simple et pratique via Internet (exemple de SONEL, <http://www.sonel.org/>).

Cette thèse s'inscrit dans cet ensemble d'évolution des mesures depuis quatre siècles : elle parcourt l'évolution des méthodes d'observations du niveau marin en métropole depuis la fin du 17^{ème} siècle ; elle apporte, à la communauté scientifique mondiale une série temporelle de marégraphie unique à cheval sur quatre siècles, obtenue à partir des mesures et contrôlée à partir des métadonnées "sources" ; elle participe au débat scientifique sur l'accélération du niveau marin ainsi que sur l'étude de l'évolution des autres composantes du niveau de la mer ; elle contribue aussi à dresser un inventaire sur le potentiel des archives marégraphiques en France disponible aujourd'hui (cf. annexe A).

Le chapitre 1 présente le contexte général. Il explique les intérêts scientifiques à s'intéresser aux longues séries marégraphiques. Les chapitres 2 à 5, où s'entremêlent histoire des sciences et histoire des techniques constituent la **première partie**. Ils sont indispensables pour la compréhension des processus d'observation du niveau de la mer au cours des différentes époques, mais surtout pour mieux appréhender la qualité, la précision et l'incertitude des mesures en fonction du protocole en usage. Les chapitres, se succèdent de manière chronologique : le chapitre 2 explique les premières observations guidées par la naissance des académies ; le chapitre 3 couvre la période allant du 18^{ème} siècle à la révolution française ; il met en avant la complexité d'obtenir des observations de qualité, malgré l'appui des hauts dignitaires de la monarchie et le réseau des professeurs d'hydrographie installés

dans les villes côtières ; le chapitre 4 commence avec la création des nouvelles institutions républicaines usant des mêmes stratégies que par le passé (ou presque) afin d'obtenir des données indispensables à toute recherche ; en parallèle à cette époque, l'hydrographie moderne apparaît. Le chapitre 5 dresse le portrait de cette naissance en la développant jusqu'à nos jours. Lors des levés bathymétriques, l'intérêt d'observer le niveau de la mer devient indispensable. L'apparition de l'annuaire des marées en 1839 porté par Chazallon appelle aux observations afin de prédire précisément la marée. Enfin, le regain d'intérêt de la marégraphie dans les années 1980 est détaillé. Les progrès techniques et l'évolution des sociétés montrent qu'une nouvelle ère marégraphique est en route.

Ces chapitres sont composés d'un certain nombre de textes provenant d'écrits et d'imprimés d'époque, lesquels sont retranscrits ici de manière la plus fidèle possible en respectant la ponctuation et les diverses fautes orthographiques. Ce choix de reprendre bon nombre d'écrits vient en écho à deux éminents savants : de Fourcroy de Ramecourt [1715-1791] et Lalande [1732-1807]. Ces deux savants sont à ma connaissance les premiers à s'être souciés de la pérennité des observations et de leurs métadonnées. Retranscrire ici des informations originales contribue ainsi à pérenniser et à rendre plus accessibles ces précieuses sources d'informations pour les chercheurs d'aujourd'hui et de demain. Pour en faciliter l'identification (et aider à la lecture globale du mémoire), les transcriptions sont présentées en italique sur trame de fond grise. Des compléments d'information ont été insérés entre crochets au sein de ces transcriptions pour en faciliter la compréhension. Enfin, les notes de bas de page renvoient aux cotes et localisations des documents originaux.

Cette première partie pourra sembler parfois déroutante car à notre connaissance, jamais un tel exercice n'a été entrepris dans ce domaine de l'hydrographie. Les méthodes d'observation et les matériels utilisés pour les observations marégraphiques ont évolué durant les quatre derniers siècles. Ces derniers, une fois connus et replacés dans leur contexte historique et scientifique ont alors permis l'élaboration d'une longue série temporelle homogène à Brest.

Les chapitres 6 à 8 composent la **deuxième partie**. Ils s'intéressent aux observations réalisées au port de Brest depuis 300 ans, et plus particulièrement aux outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer. Le chapitre 6 dresse le portrait de la zone d'étude ainsi qu'un inventaire complet sur les données disponibles et inédites. La lumière est faite sur le choix du site de Brest plutôt que d'un autre. Le chapitre 7 présente quant à lui toutes les étapes indispensables à la formation d'une série cohérente de mesures du niveau de la mer à partir de différents jeux de mesures hétérogènes aussi bien sur le plan des temps, des référentiels en hauteur que des types d'observations utilisés. Enfin, le chapitre 8 expose les résultats obtenus avec cette série de données depuis l'étude des tendances et le calcul de l'accélération jusqu'à l'évolution des autres composantes du niveau de la mer. De nouvelles grandeurs moyennes du niveau de la mer sont proposées afin de palier les limites des observations historiques du niveau de la mer. Les différentes tendances et accélérations ainsi obtenues sont comparées. Ces dernières sont ensuite confrontées avec d'autres longues séries européennes du niveau de la mer.

Chapitre 1. Pourquoi s'intéresser aux observations historiques du niveau de la mer ?

"Les paysans bretons sont si ignorants qu'ils croient à l'influence de la lune sur les marées". Francisque Sarcey [1827-1899], critique dramatique, ex-élève de l'Ecole Normale Supérieure.

De nombreuses études trouvent leur essence dans les observations marégraphiques. Aujourd'hui, la communauté scientifique, n'a, faute de temps, d'autre alternative que d'utiliser des données disponibles et exploitables immédiatement.

Plusieurs centres à travers le monde (PSMSL¹ (Permanent Service for Mean Sea Level), GLOSS² (Global sea Level Observing SyStem), UHSLC³ (University of Hawaii Sea Level Center), BODC⁴ (British Oceanographic Data Centre), ESEAS⁵ (European SEA level Service), SONEL⁶ (Système d'Observation du niveau des Eaux Littorales)) collectent, archivent, gèrent et fournissent aux chercheurs cette inestimable banque de données.

Ces centres ne sont enrichis qu'avec des observations nouvellement acquises année après année. Pourtant, une partie des séries marégraphiques se trouvant dans les bases de données sont incomplètes. En effet, pour quelques sites, des mesures du niveau de la mer débutent au 18^{ème} siècle. Naturellement, les observations acquises il y a 300 ans n'avaient pas les mêmes applications que les mesures actuelles (cf. 1.1). Pourtant, l'étude de séries temporelles couvrant quatre siècles reste encore exceptionnelle (cf. 1.2).

¹ URL : <http://www.pol.ac.uk/psmsl/> (consulté le 5 octobre 2008).

² URL : <http://www.gloss-sealevel.org/> (consulté le 5 octobre 2008).

³ URL : <http://www.soest.hawaii.edu/UHSLC/> (consulté le 5 octobre 2008).

⁴ URL : <http://www.bodc.ac.uk/> (consulté le 5 octobre 2008).

⁵ URL : <http://www.eseas.org/> (consulté le 5 octobre 2008).

⁶ URL : <http://www.sonel.org/> (consulté le 5 octobre 2008).

1.1. Pourquoi observer la marée ?

La marée, d'après la définition donnée par Simon (2007) est *"la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil, astres dont les mouvements peuvent être calculés avec précision sur des périodes de plusieurs milliers d'année. L'un des buts de but principaux de l'étude des marées est la recherche des relations existant entre le mouvement des astres et la réponse des océans à l'action des forces gravitationnelles afin d'établir des formules de prédiction"*.

D'après Cartwright (1999), Les mécanismes de génération de la marée sont connus et décrits depuis de nombreuses décennies grâce aux apports successifs de nombreux savants : Newton [1643-1727] (cf. 2.4.) ; Laplace [1749-1827] (cf. 1.4.1.2.) ; Whewell [1794-1866] (cf. 5.3.2.1.) ; Kelvin¹ [1773-1829], Darwin [1809-1882] et Doodson [1890-1968] sont à l'origine du développement de la méthode harmonique ; Poincaré [1854-1912], Harris [1863-1918] et Hansen [1909-1991] proposent de résoudre directement le problème physique de la formation de l'onde de marée d'une manière globale, dans son milieu réel.

Alors pourquoi observer la marée si l'on connaît les processus qui la génèrent et si l'on est capable de reproduire le phénomène ?

La connaissance précise du niveau moyen de la mer le long des côtes est prépondérante tant dans les domaines de l'ingénierie que pour les études portant sur l'environnement océanique et plus largement sur les variations climatiques (COI, 1985). Le **niveau moyen de la mer**, selon un usage bien établi en marégraphie est *"le résultat d'une opération sur les hauteurs mesurées tendant à éliminer la marée astronomique"* (Simon, 2007). La section 1.4.3 détaillera les différents niveaux moyens utilisés.

1.1.1. Besoins en ingénierie.

L'attraction des zones littorales et le développement portuaire ont accru nos besoins d'observations du niveau de la mer. Les prédictions de marée, la réalisation de cartes bathymétriques réduites à une même hauteur de référence, le zéro hydrographique et la calibration des mesures d'altimétrie satellitale sont autant de besoins d'ingénierie qui peuvent être déterminés grâce à de telles observations.

¹ William Thomson plus connu sous le nom de lord Kelvin, titre attribué en 1892.

1.1.1.1. Pour prédire la marée.

L'observation des variations du niveau marin permet de calculer les composantes constituant la marée locale via l'analyse harmonique (cf. 1.3.2). Ces constantes harmoniques sont ensuite utilisées pour prédire la marée. C'est de cette manière que le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) établit ses *Annuaire de Marées*. Naturellement, plus les mesures marégraphiques sont longues et de qualité, meilleures sont les composantes harmoniques calculées et, de fait, les prédictions déduites seront plus précises.

D'après Simon (2007), une année d'observations horaires permet de calculer une prédiction suffisante pour les besoins de la navigation. En revanche, lorsque les sites d'observation se trouvent à l'intérieur d'estuaires ou tout autre zone réclamant à l'onde de marée de progresser par faibles fonds sur de grandes distances, plus de quatre années de mesures sont nécessaires.

L'analyse des jeux d'observations horaires permet l'exploration des composantes harmoniques jusqu'aux douzièmes diurnes. Néanmoins, certaines marées fluviales, nécessitent des cadences d'échantillonnage supérieures vu que de l'énergie est perceptible au-delà des trentième diurnes.

1.1.1.2. Pour réduire les sondages bathymétriques.

Le développement de la navigation a accru les besoins en sécurité maritime. Pour dresser une carte bathymétrique homogène, deux types de mesures complémentaires à la sonde sont indispensables : localisation précise de la sonde où est mesurée la hauteur de la tranche d'eau à un instant donné ; correction de la profondeur de la sonde avec les données marégraphiques obtenues à proximité. Pour chaque sonde, chaque hauteur d'eau est réduite des effets de la marée. Ainsi les cartes bathymétriques dressées sont alors indépendantes du moment où sont réalisées les sondes et donc affranchies des effets de la marée (cf. 5.2.1).

1.1.1.3. Pour la détermination du zéro hydrographique.

Les profondeurs corrigées sur les cartes bathymétriques (cf. 1.1.1.2) sont rapportées à un niveau de référence nommé zéro hydrographique. Ce zéro hydrographique, ou zéro des cartes est le niveau de référence à partir duquel sont données les profondeurs des cartes marines (Wöppelmann *et al*, 1999). Ce niveau de référence est aussi commun avec les hauteurs d'eau prédites dans les *Annuaire des marées*.

En France, le zéro hydrographique est le niveau atteint par les plus basses mers astronomiques ainsi que le recommande le conseil de l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI). Comme l'expliquent Wöppelmann *et al* (1999), sa détermination passe

par l'analyse d'au moins 19 années de mesures marégraphiques continues. D'après le décret n°2006-272 du 3 mars 2006 : *"La cote du zéro hydrographique dans chaque zone de marée est définie à la côte par le service hydrographique et océanographique de la marine dans les systèmes de référence altimétriques"*.

A proximité des marégraphes, dans les ports, sont fixés des repères de marée. Ils doivent être en nombre suffisant et correctement espacés afin d'éviter qu'ils puissent être tous détruits simultanément. Ces repères sont cotés verticalement les uns par rapport aux autres par nivellement géométrique (cf. 5.4.1.2). Ils sont également tous cotés par rapport au zéro hydrographique généralement confondu avec le zéro de l'échelle de marée présent pour tout observatoire marégraphique.

1.1.1.4. Pour la calibration des mesures d'altimétrie satellitale.

Le lancement en 1992 du satellite franco-américain Topex-Poséidon, marque un tournant dans l'étude de la circulation océanique. Les observations altimétriques fournies par ce dernier, suivi par le satellite Jason-1 et Jason-2¹, mesurent le niveau moyen des océans, grâce à une couverture quasi complète du domaine océanique, inaccessible par les moyens terrestres.

Pour autant, les observations altimétriques ont besoin d'être contrôlée afin de vérifier la bonne marche de l'appareil embarqué mesurant la hauteur d'eau à la surface. D'après Mitchum (1998), ces contrôles sont réalisés avec les hauteurs observées par les marégraphes côtiers. Ainsi l'observation altimétrique est-elle tributaire des stations marégraphiques terrestres.

1.1.1.5. Pour la réalisation d'un réseau d'alerte aux tsunamis.

Lorsque le tsunami frappa l'Océan Indien, le 26 décembre 2004, la communauté mondiale prit rapidement conscience de l'intérêt vital, au vu des 220 000 disparus, de créer un réseau d'alerte aux tsunamis pour différents bassins mondiaux (cf. 5.4.3.2). Les données du niveau de la mer sont l'une des composantes principales de ce système d'alerte. Pour ce faire, d'après Schindelé (2008), les mesures marégraphiques doivent être diffusées et traitées en temps réel suivant une cadence suffisante se situant entre quelques dizaines de secondes et une minute, cette cadence semblant optimale pour distinguer les vagues de tsunami. En outre, il est indispensable de tenir, le réseau marégraphique en condition opérationnelle en effectuant un suivi et un maintien très rigoureux.

Malheureusement, le constat dressé par le sénateur Courteau dans son rapport sur *"L'évaluation et la prévention du risque du tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer"* est sombre (OPECST, 2007), *"La France à travers ses départements et territoires*

¹ lancé avec succès le 20/06/2008.

Outre-mer est présente dans tous les océans, ce qui devrait la pousser à jouer un rôle moteur dans l'instauration des systèmes d'alerte aux tsunamis. En réalité, une fois l'émotion liée à la catastrophe de Sumatra passée, la volonté politique s'est émoussée, laissant les services techniques assumer seuls et sans moyens les engagements pris par la France il y a à peine deux ans". Pourtant, comme le rapport le souligne, "la France dispose d'organismes d'excellente qualité qui peuvent contribuer activement à l'efficacité des systèmes d'alerte aux tsunamis, à condition de leur en donner les moyens", la liste exhaustive des organismes étant : le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), l'Institut Français de Recherche pour l'Exploration de la MER (IFREMER) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

A noter également qu'il existe aussi, un réseau d'alerte des ondes de tempête couvrant les côtes orientales de Grande-Bretagne et des Pays-Bas géré par le Proudman Oceanographic Laboratory¹.

1.1.2. Un Indicateur du changement climatique.

Les observations directes des changements climatiques récents sont rares et précieuses. Niveau de la mer et changement climatique sont deux ensembles liés et les informations concernant l'un ou l'autre fournissent des informations fondamentales sur les fluctuations du climat de notre planète.

Le niveau de la mer est affecté par des processus d'échelles spatio-temporelles très diverses comme Pugh (2004) le montre (fig. 1.1). Les principaux facteurs des variations du niveau de la mer présentent principalement deux ensembles temporels :

- Relation entre l'action gravitaire de la Lune et du Soleil sur les masses d'eau terrestre pour la période inférieure ou égale au jour ; à l'origine des marées semi-diurnes en faisant varier par deux fois, le niveau de la mer de manière régionale à travers le monde ;
- Episode géologique durant au minimum un million d'années pour les mouvements tectoniques de la croûte terrestre affectant le contour des bassins océaniques, lesquels modifient globalement le niveau de la mer.

¹ URL : <http://www.pol.ac.uk/> (consulté le 5 octobre 2008).

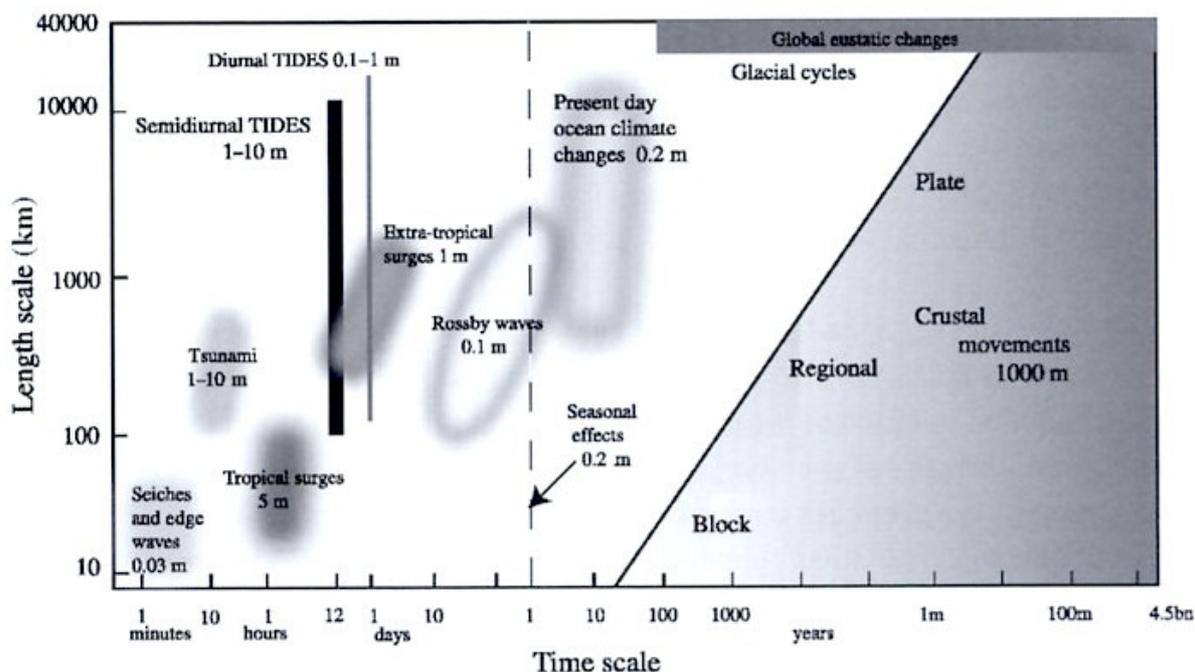


Fig. 1.1 – Facteurs principaux des variations du niveau de la mer en fonction des échelles spatio-temporelles, d’après Pugh (2004).

Les variations du niveau de la mer, liées aux changements climatiques, sont visibles dans des échelles temporelles annuelles, décennales et séculaires. Grâce à 300 années d’observations du niveau de la mer à Brest, l’estimation du changement climatique sur le niveau de la mer ne sera que meilleure.

1.1.2.1. Evolution du niveau moyen de la mer.

Depuis 600 millions d’années, le niveau de la mer a beaucoup évolué, en relation avec des cycles sédimentaires successifs (Vail *et al.*, 1977). Malgré des estimations de changements très lents, de l’ordre de 0,001 mm/an, le niveau marin a déjà connu des variations de plus ou moins 200m par rapport au niveau actuel, avec une valeur moyenne plus élevée qu’aujourd’hui.

Au cours du Quaternaire, 17 cycles glaciaires et interglaciaires s’étalant de quelques milliers à plusieurs centaines de milliers d’années sont dénombrés. Lors de ces épisodes, les variations du niveau de la mer sont principalement gouvernées par les variations du volume des glaces continentales impliquées par les cycles de Milankovitch (1938).

Depuis la dernière période glaciaire (de Würm), d’après Church *et al.* (2008), le niveau moyen de la mer varie de -160m jusqu’au niveau actuel avec, entre -20 000 et -7 000 ans, une augmentation rapide de la température qui désintégra de larges calottes de glaces continentales entraînant une élévation accéléré du niveau moyen de l’ordre de 10 mm/an (1m

par siècle) jusqu'à 40 mm/an (4m par siècle). Depuis -7000 ans, le niveau de la mer continue de s'élever, mais beaucoup plus lentement (fig. 1.2) : au cours des derniers 2 000 ans et avant le 20^{ème} siècle, le taux de variation du niveau de la mer semble inférieur à 0,2 mm/an (Lambeck *et al.*, 2004 ; Lambeck, 2002).

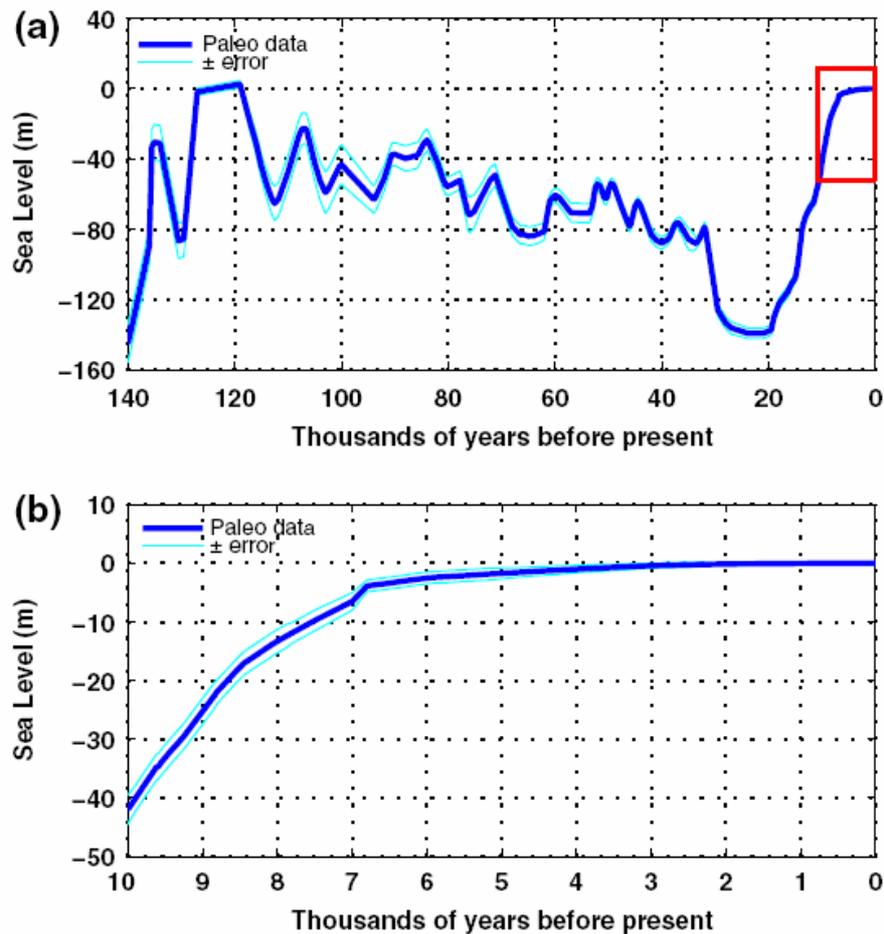


Fig. 1.2 – Estimations du niveau de la mer depuis 140 000 ans (par Lambeck et Chappell, 2001 ; Lambeck *et al.*, 2002). Les barres d'erreurs indiquent les limites des estimations à partir des données disponibles. Le carré rouge indique la période couverte dans b. D'après Church *et al.* (2008).

Contrairement à cette élévation lente du niveau de la mer depuis 2000 ans, toutes les analyses scientifiques du 20^{ème} siècle s'appuyant sur les mesures marégraphiques indiquent une hausse moyenne du niveau de la mer d'environ 1,5 à 2,0 mm/an (Jevrejeva *et al.*, 2006 ; Lambeck *et al.*, 2004 ; Church *et al.*, 2004 ; Holgate et Woodworth, 2004). Cette hausse, fait l'objet de nombreuses études pour la compréhension des variations climatiques récentes du niveau marin (cf. 8.1.1.2).

1.1.2.2. Causes et tendances de l'augmentation du niveau de la mer.

Selon le *Quatrième rapport d'évaluation* de l'IPCC (2007), tableau 1.1, deux sources majeures, agissant de manières diverses, sont à l'origine de l'élévation du niveau de la mer :

- Les apports d'eau douce à l'Océan par fonte de glaces stockées sur les continents ;
- La dilatation thermique de l'Océan causée par l'augmentation globale de température.

La tendance du niveau de la mer est étudiée sur deux périodes (tab. 1.1) : la première s'étalant entre 1961 et 2003 utilise des mesures marégraphiques tandis que la seconde, démarrant en 1993, s'appuie principalement avec les données altimétriques.

Source de l'élévation du niveau de la mer.	Elévation du niveau de la mer (mm/an)			
	1961-2003		1993-2003	
	Observé	Modélisé	Observé	Modélisé
Dilatation thermique	0,42 ± 0,12	0,5 ± 0,2	1,6 ± 0,5	1,5 ± 0,7
Glaciers et calottes glaciaires	0,50 ± 0,18	0,5 ± 0,2	0,77 ± 0,22	0,7 ± 0,3
Nappe glaciaire du Groënland	0,05 ± 0,12		0,21 ± 0,07	
Nappe glaciaire de l'Antarctique	0,14 ± 0,41		0,21 ± 0,35	
Somme des contributions	= 1,1 ± 0,5	= 1,2 ± 0,5	= 2,8 ± 0,7	= 2,6 ± 0,8
Elévation totale observée du niveau de la mer	1,8 ± 0,5 (marégraphes)	/	3,1 ± 0,7 (altimètres satellites)	2,6 ± 0,8

Tab. 1.1 – Contributions à la montée du niveau de la mer basées sur les observations comparées aux modèles pour les quatre dernières décennies et pour la période de 1993 à 2003. D'après le rapport de l'IPCC (2007).

La tendance calculée depuis 1993 est presque 2 fois plus rapide que celle déterminée à partir de 1961 avec respectivement $3,1 \pm 0,7$ mm/an et $1,8 \pm 0,5$ mm/an. Alors que pour les deux périodes de temps, les apports en eau douce à l'Océan sont sensiblement identiques, l'apport de la dilatation thermique sur la hausse du niveau de la mer est 3 à 4 fois plus important pour la période 1993-2003 par rapport à celle de 1961-2003.

1.1.2.3. Pour l'étude des surcotes et des décotes.

Le niveau de la mer est la résultante de deux phénomènes indépendants : la marée astronomique et les phénomènes météorologiques. Le premier phénomène, la marée, est un signal déterministe parfaitement connu, prédictible est donc reproductible. Au contraire, le second facteur, liés aux influences météorologiques, est un signal aléatoire qui ne peut-être traité que de manière statistique selon Simon, 1994.

Depuis quelques années, un regain d'intérêt pour l'étude des surcotes et des décotes est constaté. Ces études sont liées à un certain nombre d'attentes :

- Détermination des hauteurs d'eau extrêmes pour la délimitation précise du Domaine Public Maritime (Simon, 1996). Il s'agit d'une réflexion préliminaire au Décret n° 2004-309 du 29 mars 2004 *"relatif à la procédure de délimitation du rivage de la mer, des lais et relais de la mer et des limites transversales de la mer à l'embouchure des fleuves et rivières"*¹ ;
- Détermination des hauteurs des Basses Mers (BM) et Pleines Mers (PM) extrêmes pour une meilleure prise en compte lors de la construction des ouvrages d'arts et prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire pour ceux déjà existants (Barbot, 1998) ;
- Statistique et évolution de la reproductibilité des phénomènes extrêmes en relation avec le changement climatique (Bouligand et Pirazzoli, 1998) ;

D'après Pugh (2004), une manière simple d'étudier les surcotes et les décotes est l'étude des résidus, différences entre les hauteurs d'eau observées et les hauteurs d'eau prédites. Dans la marée prédite est inclu la marée astronomique causée par les actions gravitationnelles de la Lune et du Soleil et une composante dite "radiationnelle" due aux effets atmosphériques cycliques (essentiellement saisonniers et diurnes). Les données ne représentent alors plus que les variations de hauteurs d'eau liée uniquement aux effets météorologiques (pression, vent, etc ...).

Le SHOM a développé un programme permettant de déterminer les hauteurs de marée atteintes le long des côtes de France, avec une période de retour donnée, à partir d'observations marégraphiques (Simon, 1994). Naturellement, plus les mesures sont longues et denses, meilleurs seront les résultats obtenus.

1.2. Pourquoi s'intéresser aux mesures anciennes ?

Bon nombre d'observatoires marégraphiques actuels n'existent que depuis quelques dizaines d'années. Comme il a été dit précédemment (cf. 1.1.1 et cf. 1.1.2) les observations du niveau marin sont indispensables pour travailler sur de multiples problématiques. Or plus les données sont denses, complètes et précises, meilleurs sont les résultats obtenus.

Pour dégager des tendances à long terme sur les composantes du niveau de la mer, il est indispensable de disposer d'observations de durée suffisamment longue et aussi continues possible, afin de s'affranchir des fluctuations décennales et inter-décennales. Ainsi, d'après Douglas (2001), les séries marégraphiques de moins de 70 années sont inexploitable pour l'estimation de ces composantes. Or, à peine une centaine de jeux ne dépasse le siècle, les séries dépassant 150 ans sont, tant qu'à elles, vraiment exceptionnelles (fig. 1.3). L'histogramme de la figure 1.3 montre que la plupart des jeux de mesures du niveau de la mer sont inférieures à 30 années, ce qui rend difficile l'étude des tendances à long terme. D'où tout l'intérêt des observations historiques du niveau de la mer qui peuvent compléter les séries de mesures actuellement en cours d'acquisition.

¹ URL : <http://admi.net/jo/textes/ld.html> (consulté le 5 octobre 2008).

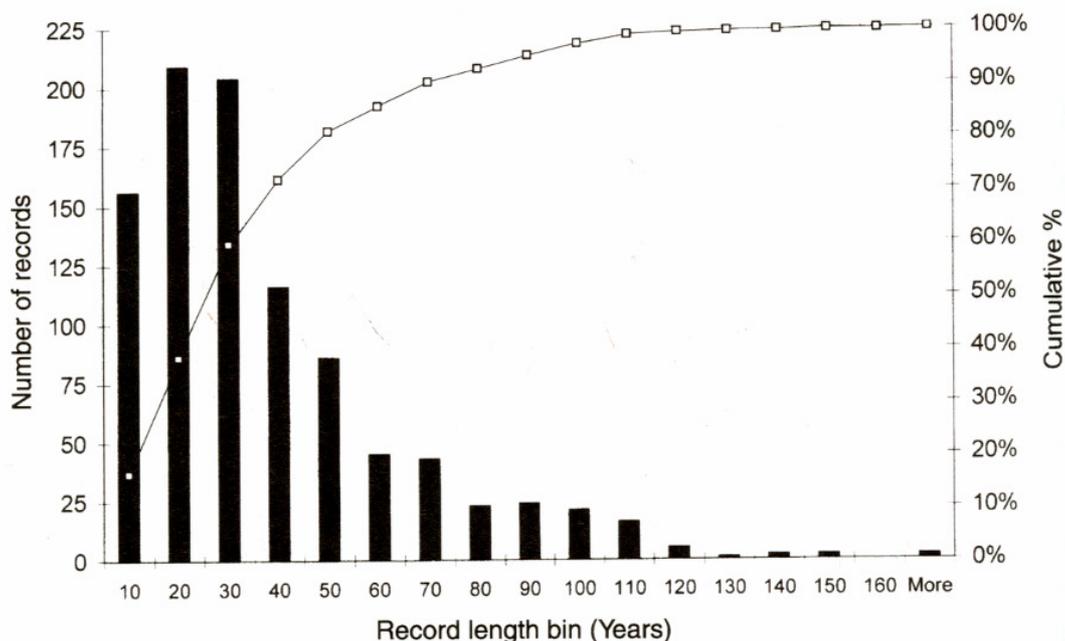


Fig. 1.3 – Histogramme présentant le nombre de séries de mesures du niveau de la mer en fonction du nombre d’années d’enregistrement et la distribution cumulative en %, d’après Douglas (2001).

La recherche d’observations anciennes du niveau de la mer est primordiale afin de densifier et prolonger les séries de mesures actuelles sans omettre de vérifier et contrôler leur qualité (Woodworth, 2006). Aujourd’hui, il est délicat, avec la majorité des jeux de mesures, si l’on suit les recommandations de Douglas (2001), d’étudier les tendances à long terme du niveau de la mer. Une solution est d’attendre encore durant une quarantaine d’années afin d’avoir les 70 années de mesures minimales à toute analyse. Une autre idée est la recherche de mesures historiques oubliées afin d’étendre le plus loin possible dans le passé les séries de données.

C’est lors de la 6^{ème} session de la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) du Groupe des Experts GLOSS (GE-GLOSS) en 1999 et durant 16^{ème} session du comité de la COI de l’International Oceanographic Data and Information Exchange (IODE) en l’an 2000 que le projet GLOSS Sea-Level Data Archeology vu le jour¹. Le 23 août 2001, le projet, coordonné par Dr. Lesley Richards visant à sauver les données du niveau de la mer sous forme papier (registre, marégramme, etc) en les numérisant est lancé². L’OHI relaie la demande du groupe existant d’experts du GLOSS le 20 septembre 2001 en expliquant que *"retrouver et numériser les enregistrements et les tabulations historiques [...] représentent une importante valeur potentielle pour l’ensemble des personnes chargées de surveiller le niveau de la mer"*.

Van Veen (1945,1954) a été le premier à s’intéresser aux mesures "historiques" du niveau de la mer en construisant la série d’observations Amsterdam. Dans les années 1970,

¹ URL : <http://www.gloss-sealevel.org/data> (consulté le 5 octobre 2008).

² URL : http://www.gloss-sealevel.org/data/documents/data_archaeology.pdf (consulté le 5 octobre 2008).

Cartwright (1971, 1972) s'intéressa également à ce type de mesures afin d'étudier les variations séculaires des composantes de marée. A la fin des années 1980, Hannah (1988, 1990) reconstruisit pour plusieurs ports situées en Nouvelle-Zélande, les séries d'observations. En 1988 encore, les moyennes annuelles du niveau de la mer à Stockholm sont publiées par Eckman. La communauté s'enrichit à la fin des années 1990 de nouvelles séries pluriséculaires avec Liverpool (Woodworth, 1999a et 1999b) et Kronstadt (Bogdanov *et al.*, 2000).

La France n'est pas en reste. Le pays possède un patrimoine inestimable d'observations du niveau marin. C'est en 1679 que les astronomes La Hire et Picard réalisèrent les premières mesures systématiques de cette grandeur à Brest (cf. 2.3) avant de renouveler l'opération en 1693 afin d'étudier la marée. Encouragées par l'Académie Royale des Sciences, les mesures se généralisèrent aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles (cf. chapitres 3 et 4). A partir de 1842, la mise au point du marégraphe par Chazallon [1802-1870] permet d'enregistrer en continu et de manière automatique la courbe de hauteur d'eau sur des marégrammes (cf. 5.3). Dormant dans les archives, la France possède un patrimoine scientifique inestimable qui n'appelle qu'à être exploité pour la compréhension des variations climatiques du niveau marin.

Dans le cadre de cette thèse, appuyé grâce à aux financements du Groupement de Recherches de Géodésie – Géophysique (GDR G2) et du Groupement de Recherches en Géodésie Spatiale (GRGS), j'ai enquêté durant 3 années, dans plus de 30 centres d'archivages français. La totalité de ce travail d'inventaire rassemblant les observations de la mer depuis la fin du 17^{ème} siècle se trouve dans l'annexe A.

1.3. Généralités sur la marée et sur son analyse.

Lorsque Voltaire [1694-1778] rédige les Lettres anglaise en 1728¹, critiques directes de la société française, ce dernier dévoile dans les lettres XIV à XVII son opinion sur Newton, sur Descartes, et de leurs lois. Pour ce faire, il s'appuie entre autre sur l'origine de la marée qui fait alors débat des deux côtés de la Manche : *"Un français qui arrive à Londres trouve les choses bien changées en philosophie comme dans tout le reste. [...] Chez nous, c'est la pression de la Lune qui cause le flux de la mer ; chez les anglais, c'est la mer qui gravite vers la Lune, de façon que, quand vous croyez que la Lune devrait nous donner marée haute, ces messieurs croient qu'on doit avoir marée basse [...] Vous remarquerez encore que le soleil, qui en France n'entre pour rien dans cette affaire, y contribue ici environ pour son quart. Chez vos cartésiens tout se fait par une impulsion qu'on ne comprend guère, chez M. Newton c'est par une attraction dont on ne connaît pas mieux la cause"*. Il faudra attendre la fin du 18^{ème} siècle pour qu'un progrès décisif permette d'expliquer et de prédire le phénomène grâce à Laplace en 1790.

¹ Lettres anglaises condamnées dès leur sortie en France en dépit du nouveau nom : les Lettres philosophiques. URL : <http://fsoso.free.fr/conferences/confer8/Docs8/VoltaireBiographie.pdf> (consulté le 5 octobre 2008).

1.3.1. Description du phénomène de marée.

La description du phénomène de marée a nettement évolué au fur et à mesure que des observations précises du niveau de la mer devenaient disponibles auprès des savants. Après une première approche statique par Newton (1687), la théorie dynamique, proposée par Laplace (1790) est à la base de tous les développements ultérieurs.

1.3.1.1. La théorie statique : force génératrice de la marée.

La marée est un incessant va-et-vient de la mer, manifestation de l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur la Terre. Newton (1687), grâce à sa découverte des lois de l'attraction universelle donne une explication scientifique à ce phénomène. La force génératrice de la marée, résultante de la force d'attraction gravitationnelle et de la force centrifuge de chacun des deux astres présentent plusieurs caractéristiques (Simon, 2007) :

- La force génératrice de la marée est proportionnelle à la masse de l'astre distant et à l'inverse du cube de sa distance avec la Terre.
- La part de la force génératrice due à la Lune est 2,18 fois supérieure à celle du Soleil.

Les mouvements de la Terre, de la Lune et du Soleil sont parfaitement connus et prédictibles. Ainsi, on peut calculer leurs mouvements avec précision sur des périodes pluriséculaires.

La théorie statique de Newton souffre pourtant d'un défaut majeur : l'inertie de la mer est négligée. La surface de l'eau ne prend pas un état d'équilibre suivant la direction de l'astre considéré.

1.3.1.2. La théorie dynamique : onde de marée.

Dans son *Traité de mécanique céleste* (tome 2 - livre 4, 1799 et tome 5 - livre 5, 1825) Laplace énonce la théorie dynamique de la marée. Dans cet ouvrage, il définit les équations de la marée pour le port de Brest. Ces équations ont été utilisées par le SHOM jusqu'au début des années 1990 (Simon, 2007). La réponse de la mer à la force génératrice de la marée prend la forme d'ondes élémentaires générées de manière diffuse à travers les océans. Chaque onde se propage avec une vitesse dépendant de la profondeur et en fonction du milieu de propagation ; chaque onde est réfractée, réfléchie, dissipée. En chaque point, la marée est donc le résultat de la superposition de toutes ces ondes élémentaires arrivant de l'ensemble du globe en ayant rencontré des conditions de propagation différentes. En outre, les ondes peuvent naturellement interférer entre elles, atténuant ou renforçant certaines fréquences.

1.3.2. Analyse harmonique de la marée.

La théorie dynamique de Laplace n'est pas concluante pour prédire les marées à fortes inégalités diurnes. La *British Association for the Advancement of Science* interpelle la communauté scientifique pour résoudre ce problème. S'appuyant sur les travaux précurseurs du savant français, Thomson¹ (1868) introduit l'opération mathématique nommée *analyse harmonique*, perfectionnée par la suite par Darwin et Doodson. A partir d'observations du niveau de la mer, il devient alors possible d'extraire pour le site considéré, les constantes harmoniques, pour prédire la marée astronomique et la composante dite "radiationnelle".

1.3.2.1. Présentation.

L'analyse harmonique s'appuie sur la décomposition du potentiel de la force génératrice des marées en une somme d'ondes élémentaires strictement périodiques : les composantes harmoniques. C'est Darwin (1883) qui identifie les principales composantes harmoniques auxquelles il attribue des noms universellement utilisés depuis. Les principales composantes avec leurs caractéristiques sont reportées dans le tableau 1.2.

¹ Thomson n'obtiendra son titre de Lord Kelvin qu'en 1892.

	Symbole	Désignation	Origine	Vitesse angulaire (degrés/heure)	Période (jours j ou heures h)	Coefficient du potentiel ($u * 10^3$)	
Longues périodes	M ₀	terme constant	L	0,00000000		50458	
	S ₀	terme constant	S	0,00000000		23411	
	Sa	annuelle	S	0,04106864	365,24218966 j	$u < 10^{-5}$	
	Ssa	semi-annuelle	S	0,08213728	182,62109375 j	7245	
	Mm	mensuelle	L	0,54437468	27,55455017 j	8253	
	Msf	variationnelle	L	1,01589576	14,76529408 j	1367	
Composantes diurnes	Mf	bimensuelle	L	1,09803304	13,66079044 j	15640	
	2Q ₁	elliptique 2 ^{ème} ordre	L	12,85428623	28,00622177 h	952	
	Q ₁	elliptique majeure	L	13,39866092	26,86835670 h	7206	
	ρ ₁	evectionnelle	L	13,47151452	26,72305298 h	1368	
	O ₁	lunaire principale	L	13,94303560	25,81934166 h	37689	
	M ₁	elliptique mineure	L	14,49669396	24,83324814 h	2961	
	P ₁	solaire principale	S	14,95893136	24,06588936 h	16817	
	S ₁	radioationnelle	S	15,00000000	24,00000000 h	$u < 10^{-5}$	
	K ₁	declinationnelle	L	15,04106864	23,93446922 h	36232	
	K ₁	declinationnelle	S	15,04106864	23,93446922 h	16124	
	J ₁	elliptique secondaire	L	15,58544332	23,09847641 h	2959	
	OO ₁	lunaire 2 ^{ème} ordre	L	16,13910168	22,30607414 h	1615	
	Composantes semi-diurnes	2N ₂	elliptique 2 ^{ème} ordre	L	27,89535487	12,90537453 h	2300
		μ ₂	variationnelle	L	27,96820848	12,87175751 h	2777
N ₂		elliptique majeure	L	28,43972956	12,65834808 h	17391	
NU ₂		evectionnelle majeure	L	28,51258316	12,62600422 h	3302	
M ₂		lunaire moyenne	L	28,98410424	12,42060089 h	90812	
λ ₂		evectionnelle mineure	L	29,45562532	12,22177410 h	669	
L ₂		elliptique mineure	L	29,52847892	12,19161987 h	2567	
T ₂		elliptique majeure	S	29,95893332	12,01644897 h	2472	
S ₂		solaire moyenne	S	30,00000000	12,00000000 h	42286	
R ₂		elliptique mineure	S	30,04106668	11,98359585 h	437	
K ₂		declinationnelle	L	30,08213728	11,96723461 h	7852	
Tiers-diurne	M ₃		L	43,47615636	08,28040123 h	1188	

Tab. 1.2 – Principales composantes du potentiel lunaire et du potentiel solaire (respectivement L et S dans la colonne origine). D’après Simon (2007).

Les coefficients du tableau 1.2 sont ceux du développement plus complet de Doodson (1921). Néanmoins ils diffèrent peu des coefficients calculés par Darwin. Les indices des ondes correspondent à leur période : 0 pour les longues périodes, 1 pour les composantes diurnes, 2 pour les composantes semi-diurnes, 3 pour les composantes tiers-diurnes etc... Les seules ondes : M₂, S₂, O₁, N₂, K₁, P₁, Q₁, K₂ permettent à elles seules de bien caractériser la marée d’un lieu car elles contiennent l’essentiel de l’énergie du signal de marée. Pour les composantes de longues périodes de la marée seules les ondes Sa et Ssa traduisent, d’après Simon (2007), les variations saisonnières de la marée liées à l’action thermique du rayonnement solaire sur l’atmosphère et l’océan.

Chaque constante harmonique est une sinusoïde dont l’amplitude et la phase ne dépendent que du lieu d’observation. D’après la formule suivante, la hauteur du niveau de la mer à un

instant t est calculée en effectuant la somme de chaque sinusoïde déterminée précédemment (Pugh, 1987 ; Simon, 2007) :

$$h(t) = Z_0 + \sum_{i=1}^n [H_i \cos(\sigma_i t - g_n)] + \varepsilon(t)$$

avec :

Z_0 : niveau moyen rapporté au zéro des cartes autour duquel oscille le niveau de la mer (mètre) ;

t : temps (jours) ;

σ_i : vitesse angulaire donné dans le tableau 1.2. (exprimée en radian) ;

H_i : amplitude de l'onde i (mètre) ;

g_i : phase de l'onde i (exprimée en radian) ;

$\varepsilon(t)$: fonction aléatoire nommée surcotes-décotes par le SHOM (mètre).

1.3.2.2. MAS, logiciel pour analyser et prédire la marée.

Le SHOM dispose d'un logiciel pour analyser et prédire les hauteurs du niveau de la mer nommé MAS, pour MARée Simon¹. C'est grâce à ce logiciel que sont calculées les prédictions officielles du niveau de la mer en France (Créach *et al*, 2007). D'après la documentation de MAS (SHOM, 2007), l'analyse harmonique peut être effectuée dès l'obtention de 15 jours d'observations avec ou sans lacunes. MAS est conçu pour traiter les hauteurs horaires d'observation du niveau de la mer et les heures et hauteurs des PM et BM suivant un format de fichier spécifique : (27i4), pour le fichier des Hauteurs HoraireS (hhs). Le programme MAS est constitué de différentes sous-routines numérotées de 1 à 31. L'exécution d'une suite de sous-routines permet de réaliser un type d'analyse.

Pour nos besoins, les suites de sous-routines suivantes ont été utilisées :

- Procédure 1 [P1] : 1 2 5 11
- Procédure 2 [P2] : 1 3 5 13
- Procédure 3 [P3] : 14 18
- Procédure 4 [P4] : 14 7
- Procédure 5 [P5] : 1 6

Pour les procédures P1 et P2, il faut un fichier en entrée :

- un fichier des hauteurs horaires du niveau de la mer,

complétée par un autre fichier pour la procédure P2 :

¹ Communication personnelle Bernard Simon.

- un fichier contenant une liste de 541 composantes désignées par leur numéro de Doodson littéral étendu.

Les procédures P3 et P4 requièrent le fichier des constantes harmoniques de la marée obtenu grâce aux procédures P1 ou P2.

La procédure P1 permet d'effectuer une analyse harmonique avec une liste standard de 143 composantes harmoniques définies par le SHOM et désignées par leur numéro de Doodson. S'il n'existe pas de lacunes dans le fichier des hauteurs analysées, la Transformée de Fourier Rapide [TFR ; Fast Fourier Transform FFT en anglais] des vecteurs réduits permet de tracer les spectres. Dans le cas contraire, la subroutine n°5 réalisant cette opération est ignorée par MAS.

La procédure P2 permet d'effectuer l'analyse harmonique avec la liste des 541 composantes désignées aussi par leur numéro de Doodson. Ces numéros sont -soit affectés d'un coefficient correspondant dans le développement du potentiel -soit affectés d'un coefficient relatif rapporté à un maximum égal à 1000. Des regroupements sont effectués automatiquement avant de procéder aux analyses en fonction des longueurs d'observations. Un fichier des constantes harmoniques de la marée est ainsi obtenu. S'il n'existe pas de lacunes dans le fichier des hauteurs analysées, la Transformée de Fourier Rapide [TFR ; Fast Fourier Transform FFT en anglais] des vecteurs réduits permet de tracer les spectres. Dans le cas contraire, la subroutine n°5 réalisant cette opération est ignorée par MAS, comme précédemment.

La procédure P3 permet, grâce au fichier de constantes harmoniques (obtenu grâce à P1 ou P2) de prédire à cadence régulière définie par l'utilisateur les hauteurs d'eau. Les vecteurs réduits par jour lunaire sont calculés puis utilisés par une FFT inverse afin de calculer les hauteurs réduites. Enfin, les hauteurs sont ramenées aux fractions de jours solaires choisies.

La procédure P4 est identique à la procédure P3 sauf qu'ici, on cherche à obtenir les heures et hauteurs des PM et des BM par jour solaire.

La procédure P5 permet de convertir un fichier d'observations horaire en un nouveau fichier constitué par les heures et hauteurs de PM et de BM. Il s'agit d'une simple interpolation parabolique sur les trois valeurs entourant chaque valeur extrême et recherche du sommet de la parabole en heure et en hauteur (communication personnelle, B. Simon).

Le logiciel MAS est parfaitement conçu pour réaliser des analyses harmoniques quelle que soit la durée d'observation, de 15 jours jusqu'à plus de 200 années, avec ou sans lacunes. Il a été préféré au logiciel T_TIDE, développé par Pawlowicz *et al.* (2002) et universellement utilisé aujourd'hui¹ pour des raisons pratiques : une partie de mon travail ayant été réalisé au SHOM, j'ai très tôt utilisé MAS. Pour autant, des études comparatives entre les deux logiciels ont été réalisées en 2006 et les résultats brièvement présentés dans l'article publié dans le CRAS (cf. 8.2.1.) validant MAS.

¹ En effet, les études publiées pour au moins 121 articles de rang A l'ont été grâce à T_Tide (source scopus, mars 2008).

1.4. Quelques définitions.

1.4.1. Naissance et essor de la marégraphie.

Au cours des âges, les termes utilisés pour l'étude de la marée ont évolué ainsi que les limites scientifiques du champ de compétence. Avant d'aller plus loin, il convient de définir les principaux concepts :

1.4.1.1. Flux et reflux de la mer.

Vial de Clairbois, dans l'*Encyclopédie méthodique Marine* (1787) définit le flux et reflux comme un "*mouvement journalier, régulier & périodique, qu'on observe dans les eaux de la mer, & dont le détail & les causes*"¹ sont étudiés. Jusqu'au début du 19^{ème} siècle, toutes les réflexions portant sur ce sujet incluent dans leur titre "*flux et reflux*". Les écrits portant sur le flux et le reflux de la mer à cette période discutent de l'origine, des causes et du fonctionnement de la marée en essayant de prédire en hauteur et en temps les oscillations du niveau marin.

1.4.1.2. Tydologie.

Jusqu'en 1810, étudier la marée revient à travailler sur le flux et reflux de la mer. Un français exilé en Angleterre, le Chevalier de Sade [1753-1832] proposa le terme de tydologie pour désigner la science des marées dans son ouvrage "*De la tydologie ou de la science des marées ; mémoire en forme d'instruction*". L'inventeur s'explique sur ce nom : "*parce que chaque science exige un nom propre qui la désigne spécialement. Si la science est nouvelle, il faut de toute nécessité, faire un nom nouveau qui lui soit affecté. Il faut en outre que ce mot soit, autant que possible, court, sonore et suivant le génie de la langue dans laquelle on l'écrit, n'importe ensuite la composition et l'étymologie qu'on voudra lui donner. Celle de tydologie vient du mot Anglois tide, qui signifie marée, et en considération des hellénistes, je l'écris avec un y.*" D'après le *Merriam-Webster*², tide peut avoir plusieurs origines : du moyen-anglais *time* ; du vieil-anglais *tīd* ; du vieil allemand *zīt*, le temps ; peut-être du grec *daiesthai*, diviser. Pour de Sade, *tide* vient du grec. Il termine ce nom en ajoutant "-logie", provenant du grec *logos*, la raison (la science).

Ce dernier s'applique à nous fournir les champs de compétence de cette nouvelle science : "*Les sciences sont toutes dépendantes les unes des autres : la tydologie le sera de l'astronomie par les forces attractives du Soleil et de la Lune ; de l'hydrodynamique, par les*

¹ Tome second, pp. 355-364.

² URL : <http://www.merriam-webster.com/dictionary/tide> (consulté le 5 octobre 2008).

lois du mouvement des fluides ; de la **géographie**, par la configuration des côtes sur les fonds de la mer ; de la **physique** enfin, par l'adhésion qu'ont entr'elles les molécules d'eau, les forces d'inerties qu'elles opposent aux différents mouvements qu'on veut leur donner, et par les **circonstances météorologiques**, qui ont une si grande influence sur ses résultats". La tydologie est une science interdisciplinaire. Pour l'étudier, il faut avoir des connaissances dans différents domaines : l'astronomie, l'hydrodynamique, la géographie, la physique et la météorologie.

Pourtant, de Sade conseille de "*calculer la marée*" de différentes manières en distinguant :

- les causes astronomiques qui sont bien connues et définies en 1790 grâce à Laplace ;
- les causes terrestres qui, pour l'auteur, sont le produit de la configuration des côtes et des mouvements de la mer ; par exemple, deux sites proches ne présentent pas les mêmes mouvements marins ;
- les causes météorologiques dont la connaissance est la moins avancée d'après l'auteur, car la météorologie est elle-même mal connue et donc difficile à relier à la tydologie.

En guise de conclusion, l'auteur termine par : "*La tydologie est donc une science compliquée ; mais avec de la persévérance et du génie, de quoi l'homme ne vient-il pas à bout ?*"

Ce terme tydologie se retrouve dans différents documents tels que les *Annales encyclopédiques* rédigées en 1817 par Millin. Un dictionnaire de Jourdan paru en 1837 en donne la définition suivante : "*Tydologie, tydologia. Désigne sous ce nom la science qui embrasse la totalité des faites et des calculs relatifs aux marées*". L'utilisation du mot tydologie disparaîtra de la langue française au début des années 1840.

1.4.1.3. Marégraphie.

Les termes "marégraphie", "marégraphique" sont aujourd'hui répandus dans diverses publications scientifiques et communications orales. Pourtant, aucune encyclopédie ni dictionnaire n'en donne une définition. Etymologiquement, le mot marégraphie est composé de deux racines : "maré-" qui vient du mot latin *mare* se traduisant par la mer et "-graphie" qui vient du mot grec *graphein* qui signifie écrire. L'ensemble donnant simplement : **écrire la mer**. En approfondissant, "maré-" est une contraction du mot *marée* signifiant le mouvement de la mer et "-graphie" exprimant en linguistique, la représentation écrite. Le nom marégraphie exprime donc **la représentation écrite du mouvement de la mer**. Etant donné qu'aucune définition n'existe, Simon et Wöppelmann proposèrent chacune la leur en 2007 :

Simon (2007) interprète ainsi le nom marégraphie : "*Par son étymologie, le terme marégraphie se rapporte à la description du phénomène de marée et aux instruments qui, par leurs mesures, en ont permis une meilleure connaissance*". Cette explication dépasse la définition précédente tiré de l'étude des racines du nom. Heureusement, les mots ne sont pas figés dans un carcan étymologique, leur définition évolue. C'est le cas pour la marégraphie.

Pour Wöppelmann (2007), la définition de Simon est incomplète. Il indique qu'elle "*mériterait une extension aux autres phénomènes qui affectent aussi la grandeur mesurée par les marégraphes*". Son analyse porte également sur l' "archéo-marégraphie", terme désignant "*la préhistoire de la marégraphie, l'époque antérieure à la mesure automatique*". Woodworth

en est involontairement à l'origine. En effet ce dernier parle souvent de "data archaeology" : dans ses articles en 1999a, 1999b, 2006, dans une lettre de GLOSS¹, et durant nos échanges sur les observations du 18^{ème} siècle à Brest. Rapidement, "data archaeology" fut rapidement dévié en archéo-marégraphie par le "cercle des passionnés". Comme Wöppelmann le suggère, la marégraphie "*n'exclut pas pour autant la période d'écriture manuelle des mesures*". Etant d'accord sur ce point, l' "archéo-marégraphie" n'a plus de raison d'être. Néanmoins, il était nécessaire d'en laisser une trace écrite car entre 2004 et 2007, des documents produits en interne portent cette appellation.

L'invention du marégraphe date de la fin du 19^{ème} siècle. La première trace écrite retrouvée de "marégraphique" remonte à 1882, dans une note sur les marégraphes français de Marx². Dans cet écrit, l'adjectif qualifie les substantifs "échelle" (échelles marégraphiques) et "poste" ("postes marégraphiques"). La première utilisation écrite du nom féminin "marégraphie", date de 1911, dans un ouvrage de Eijman : *L'internationalisme scientifique*. Il sert à dénommer un des domaines utilisés par l'Association Internationale de Géodésie.

Le terme "marégraphie" dérive du nom masculin "marégraphe", appareil mécanique mesurant et enregistrant le niveau de la mer (cf. 5.3.4.1.). Le cheminement vers ce nom s'est accompli en différentes étapes, plusieurs noms se succédant pour désigner cet appareil. Entre 1840 et 1843, la machine fut baptisée "maréomètre"³, signifiant étymologiquement "*mesurer la mer*". Puis, jusqu'au début des années 1850, l'instrument a été appelé "maréographe"⁴ avant de voir disparaître le "o" et d'être nommé depuis, "marégraphe". C'est à Chazallon, concepteur de l'appareil en France, que l'on doit son nom définitif. Il l'explique en 1854 : "[...] j[e l] 'ai dénommé marégraphe parce qu'il trace la courbe des marées."

Dans cette étude, sauf indication explicite, la marégraphie et son adjectif dérivé se rapporteront, sans distinction dans le temps, aux instruments (échelles de marée, échelle flottante, marégraphe mécanique, marégraphe numérique), aux observatoires, aux mesures (registres papiers, marégrammes, fichiers numérisés) et à la description du phénomène des marées.

¹ URL : http://www.gloss-sealevel.org/data/documents/data_archaeology.pdf (consulté le 5 octobre 2008).

² Marx. Note sur les marégraphes français, Paris le 3 décembre 1882. Publié dans l'ouvrage de Lallemand et Prévot, 1927.

³ Chazallon R. Rapport du 5/8/1840 au vice-amiral Halgan. Archives Nationales, MAR/10/JJ/503.

⁴ Chazallon R. (1844). Sur l'installation d'un maréographe à Toulon, et sur les marées d'Akaroa (Nouvelle-Zélande). Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences, t.19, 1307-1312.

1.4.2. Matériel utilisé pour mesurer le niveau marin.

De prime abord facile à réaliser, la mesure du niveau marin est chose délicate quand on recherche la précision. Différents instruments, depuis la simple échelle de marée utilisée au commencement jusqu'aux marégraphes électroniques modernes, se sont succédés.

1.4.2.1. Echelle de marée.

Depuis les premières mesures du niveau de la mer, l'échelle de marée est restée l'élément indispensable pour obtenir la hauteur d'eau de manière rapide, instantanée et à tout moment. Constituée d'une mire ou perche graduée en bois ou en plastique, verticale ou quasi-verticale, l'échelle de marée plonge dans l'eau en un emplacement convenablement protégé du clapot et de la houle. Les premières mesures du niveau de la mer furent lues grâce à ce système simple qui reste encore indispensable. En effet, d'après les normes définies par la COI (1985), un observatoire permanent de mesure du niveau de la mer doit comporter obligatoirement une échelle de marée. Celle-ci constitue le seul moyen de lecture rapide directe de hauteur d'eau externe au puits, ce qui assure le contrôle du niveau d'eau mesuré dans le puits. L'échelle doit être placée à proximité de l'observatoire, dans une zone protégée de risques de destructions ou détériorations.

Chazallon mène en 1854, des études sur les meilleurs matériaux à utiliser pour la réalisation d'échelles de marée (cf. 5.3.4.2). Naturellement, des règles de bon sens doivent être suivies. L'échelle doit résister à la corrosion et être facilement nettoyable afin de distinguer facilement les graduations lors de la lecture. Quand il est impossible d'installer l'échelle de marée sur une structure verticale (lorsque les quais ou jetées présentent un fruit), les graduations établies doivent restituer les hauteurs réelles.

En règle générale, d'après Simon (2007), l'ajustement du zéro de l'échelle des marées doit être confondu avec celui du zéro hydrographique afin d'éviter toute mauvaise interprétation de la part d'usagers non avertis. D'après les normes du COI (1985), la cote de l'échelle de marée est établie par rapport à trois repères fixes au sol (cf. 1.1.1.3).

Dans certains sites présentant de fortes amplitudes de marée, il est parfois impossible qu'une seule échelle couvre la totalité du marnage. Deux échelles au moins sont alors indispensables.

Simon (2007) explique que lorsque les vagues sont importantes, il est d'usage de prendre la moyenne des valeurs successives extrêmes. Néanmoins, comme le profil des vagues a davantage une forme trochoïdale (la cote des crêtes étant supérieure à la décote des creux) que sinusoïdale, la moyenne obtenue donne une valeur supérieure à celle du niveau réel.

1.4.2.2. Marégraphe.

La conception du premier marégraphe à flotteur à enregistrement automatique est l'œuvre d'un ingénieur anglais, H. Palmer qui décrit l'appareil dans le journal *Philosophical Transactions* de 1831. Son premier lieu d'implantation fut à Sheerness, sur la côte Est de l'Angleterre. Le "Graphical Registrar of Tides and Winds" ne restera qu'à l'état de prototype, en raison d'une utilisation trop ponctuelle de l'appareil (cf. 5.3.2.1.). Il faudra attendre 1842 pour voir les côtes françaises équipée du premier marégraphe mis au point par l'ingénieur hydrographe Chazallon (cf. 5.3.4.1).

Aujourd'hui encore, malgré l'évolution technologique, les Marégraphes Côtiers Mécaniques (MCM), sont très répandus à travers le monde. Ils fonctionnent suivant le même principe défini 177 ans plus tôt (cf. 5.3.4.1). Malgré tout, depuis les années 1980, une nouvelle génération d'appareils, tend de plus en plus à supplanter les MCM. Il s'agit des Marégraphes Côtiers Numériques (MCN) (cf. 5.4.3). Les plus répandus fonctionnent avec des sondes aériennes soit en émettant des ultrasons, soit en produisant des signaux de nature électromagnétique (radar ultrafréquence). Les systèmes précédents ainsi que d'autres appareils de mesures sont décrits avec plus de précisions dans le chapitre II de l'ouvrage de Simon (2007).

Le tableau 1.3 fait état des avantages et inconvénients des deux types de marégraphes en dissociant les MCN ultrasoniques et MCN radar. Indéniablement, les atouts des MCN démontrent pourquoi les MCM sont progressivement abandonnés pour cette nouvelle génération d'appareils (Wöppelmann et Pirazzoli, 2005).

	MCM	MCN	
		Ultrasonique	Radars ultrafréquence
Mesures	Analogique (marégrammes)	Numérique (central d'acquisition)	
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - appareil robuste et fiable ; - changement des marégrammes tous les 15 jours au maximum ; - existence de l'appareil depuis plus de 170 années ; - nécessite un personnel peu qualifié pour l'entretien ; - sauvegarde papier (marégramme) ; 	<ul style="list-style-type: none"> - propagation des ondes sonores dans un tube lisse en PVC ; 	<ul style="list-style-type: none"> - propagation des ondes présente une célérité variable ; - grande précision dans les mesures ;
		<ul style="list-style-type: none"> - construction d'un conduit et d'un abri au coût modeste (en règle générale, il existe des contre-exemples comme à Liverpool (Woodworth, 2003) ; - possibilité de récupérer les mesures en temps réels sur n'importe quel poste connecté (suivant les centrales d'acquisition) ; 	
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - construction d'un puits de tranquillisation surmonté d'un abri ; - blocage ou frottements du flotteur faussant les hauteurs ; - chevauchement de spires sur l'enrouleur de câble entraînant à une certaine hauteur un changement de facteur d'échelle ; - mauvais calage en temps ou en hauteur des feuilles lors d'un changement ; - variations du papier sous l'effet de l'humidité ou de la température ; - problème avec la marche irrégulière de l'horloge ; - contrôle régulier de la bonne marche de l'appareil (pour chaque marégramme) ; - codage du signal analogique en données numériques entraînant un coup en temps et pouvant affecter des erreurs supplémentaires ; 	<ul style="list-style-type: none"> - influence du gradient de température le long du conduit faisant varier la célérité (Gonella et Simon, 2002 ; Devauchelle, 2002) ; 	
		<ul style="list-style-type: none"> - temps indépendant d'une pendule... mais dépendant d'un ordinateur ; - branchement au réseau électrique (en règle générale, possibilité de fonctionnement avec des énergies renouvelables : panneaux solaire, éolienne...et ; - connexion à une ligne téléphonique (en règle générale sauf communication satellitaire + abonnement Internet pour la récupération des mesures ; - durée de vie limitée à 20 ans ; - installation d'un MCN demande de nombreuses connaissances ; - coûts du MCN et de la central d'acquisition supérieurs à un MCM ; 	

Tab. 1.3 – Comparaison entre les MCM et MCN.

L'arrivée de cette nouvelle génération de marégraphes au début des années 1980 n'est pas anodine. Elle correspond à un important regain d'intérêt pour la marégraphie (cf. 5.4.2). Avec le développement informatique, les besoins en données numériques du niveau de la mer explosent. C'est d'ailleurs à cette époque que paraissent des études sur la manière de numériser les marégrammes comme celle de Graff et Karunaratne (1980). La totalité des données contenues sur un marégramme devant être réduite au minimum en échantillonnant de

la meilleure façon en évitant toutefois l'aliasing. Finalement, l'échantillonnage horaire des hauteurs fut retenu.

1.4.2.3. Médimarémètre.

Le *Larousse Universel* de 1928, introduit une erreur en regroupant sous une même définition, les noms de médimarémètre et de marégraphe en ramenant leur principe de fonctionnement à celui de ce dernier.

Contrairement au marégraphe, le médimarémètre, appareil inventé par Lallemand en 1888, n'enregistre pas à chaque instant la hauteur d'eau, mais mesure uniquement le niveau moyen de la mer. Les relevés peuvent être journaliers, hebdomadaires, mensuels, annuels. Le but de cet appareil : simplifier l'obtention des niveaux moyens de la mer par rapport aux fastidieux dépouillements de marégrammes, coûteux aussi bien en temps qu'en personnel.

Lallemand (1888b) en explique ainsi son fonctionnement : un tube étanche est en communication avec un plongeur continuellement immergé. Divisé en deux parties, le plongeur se compose, pour la partie inférieure d'un compartiment rempli de sable et percé de trous pour l'accès de l'eau. La tranche supérieure est constituée d'une "*paroi poreuse en porcelaine déglourdie*" réglée de manière à ce que la marée soit filtrée. Lallemand (1910) et Vignal (1945) montrent les limites des mesures obtenues par cet appareil. Bessero (1985) confirme que les moyennes obtenues avec les médimarémètres ne peuvent être exploitées, à cause de l'usure de la porcelaine qui altère son rôle de filtrage. Cette réalité est d'autant plus dommageable pour les études utilisant les niveaux moyens de la mer que le patrimoine existant sur les mesures médimarémétriques conservé à l'Institut Géographique National (IGN) est important (communication personnelle Alain Boulaire). Un descriptif détaillé des lieux de mesures des médimarémètres en France est présenté dans la section 5.3.3.3.

1.4.3. Niveaux moyens de la mer.

Les hauteurs obtenues par les marégraphes n'enregistrent pas que les niveaux instantanés du niveau de la mer. Lorsque les appareils sont mal calibrés, des incohérences dans les mesures se manifestent. Les variations isostatiques introduisent des mouvements de la croûte terrestre qui affectent également les hauteurs.

Qu'est-ce que le niveau moyen ? Comme Wöppelmann (1997) l'explique, la notion de niveau moyen de la mer, bien que largement utilisée, n'en reste pas moins vague. Dès à présent, une clarification des différentes expressions de niveaux moyens va permettre de s'accorder sur les définitions données pour la suite.

1.4.3.1. Niveau moyen de la mer.

La 5^{ème} édition du dictionnaire hydrographique édité par l'OHI¹ définit le **niveau moyen de la mer** ainsi : "*Moyenne des hauteurs de marée (hauteur de la surface de la mer, à un instant donné, rapportée au zéro des cartes) observées à un endroit déterminé pendant un intervalle de temps donné, les hauteurs de marée étant prises au moins toutes les heures et mesurées à partir d'un niveau de référence prédéterminé (zéro des cartes)*". D'après Wöppelmann (1997), l'ambiguïté du "niveau moyen de la mer" vient en partie de la notion même de moyenne des hauteurs prises à pas de temps réguliers. Or, l'imprécision de la définition de l'OHI sur ce point est grande : les hauteurs utilisées pour effectuer la moyenne devant être "*prises au moins toutes les heures*" laissent place à une multitude de possibilités dans le choix des cadences des mesures pour en calculer le niveau moyen.

D'après Simon (2007), un usage bien établi en marégraphie convient de nommer **niveau moyen**, "*le résultat d'une opération sur les hauteurs mesurées tendant à éliminer la marée astronomique*". Le calcul des **niveaux moyens (journalier, mensuel et annuel) de la mer**, peut s'effectuer de différentes manières :

- **Niveau Moyen journalier de la mer (NMj)**. Comme la durée des composantes diurnes et semi-diurnes de la marée ($T_{M1} \approx 2T_{M2} \approx 24,84$ h) n'est pas identique à la durée du jour du Temps Solaire Moyen (TSM, égal à 24 h), calculer la moyenne des 24 hauteurs journalières introduit de fait, des composantes de marées incommodes pour les études sur cette entité. Pour palier cette gêne, plusieurs filtres numériques de type passe-bas existent : W25, Doodson, Munk, Godin, Demerliac utilisant respectivement 25, 39, 49, 71 ou 72 hauteurs horaires réparties symétriquement de part et d'autre de l'heure centrale voulue, classiquement midi pour le jour souhaité (Bessero, 1985). Simon (2007) explique dans son ouvrage la méthodologie des différents filtres et démontre également leur efficacité en les jugeant d'après leur aptitude à éliminer les composantes de marée. Les filtres passe-bas de Munk, Godin et Demerliac présentent des coefficients de résidu pour les ondes principales de marée les plus faibles. Dans le cadre de cette thèse, seul le filtre de Demerliac, utilisé par le SHOM depuis 1973² sera utilisé pour le calcul des NMj. Le manuel de l'UNESCO (COI, 1985), recommande qu'avant tout calcul du NMj, les lacunes des hauteurs horaires soient "*comblées par interpolation, si possible avant le calcul des moyennes mensuelles et annuelles*". Une fois encore, le manque de précision met en déroute le lecteur. Combien de valeurs horaires peuvent être comblés ? Quelle méthode d'interpolation doit-on utiliser ? Comment réaliser l'interpolation ?
- **Niveau Moyen mensuel de la mer (NMm)**. Contrairement au NMj, le NMm est obtenu de manière simple en effectuant la moyenne arithmétique des NMJ. Lorsque plus de 15 jours manquent sur un mois, le COI (1985) préconise de ne pas calculer le NMm. Pour le calcul du NMm, quelle valeur de NMj doit-on utiliser ? Pugh (1987), à partir des mesures marégraphiques obtenues à Newlyn, a comparé l'écart moyen quadratique des différences entre des NMm en prenant d'une part, un filtre complexe utilisant 337 valeurs horaires (filtre F168 soit $168*2+1$) et en utilisant d'autre part, le filtre de Doodson et la simple moyenne arithmétique. Les résultats sont rapportés dans le tableau 1.4.

¹ OHI (1998). Dictionnaire Hydrographique. Cinquième édition, publication spéciale n°32, Monaco.

² Demerliac A. (20 décembre 1973). Le niveau moyen de la mer, calcul du niveau moyen journalier. SHOM.

NMm déterminés à partir :	du NMj calculés avec un filtre 72 soit 145 heures.	du NMj calculés avec le filtre de Doodson.	de la moyenne arithmétique des hauteurs horaires.
Ecart moyen quadratique	0,2 mm	1,5 mm	2 mm

Tab. 1.4 – Ecart moyen quadratique entre le NMm déterminé à partir du NMj calculées avec le filtre F168 et le NMm indiqué dans le tableau. Calcul à partir des mesures marégraphiques de Newlyn, d’après Pugh (1987).

L’écart moyen quadratique le plus important est de 2mm. Cet écart provient de l’élimination incomplète des composantes diurnes et semi-diurnes de la marée par la moyenne arithmétique, contrairement au filtre F168. Malgré l’écart maximum de 2mm, Pugh ne justifie pas l’utilisation de filtres dans la plupart des applications. Ce qui est obtenu à Newlyn est-il applicable pour Brest ? Le même exercice a été entrepris avec les mesures marégraphiques brestoises en comparant davantage de NMm avec la moyenne du NMm calculée avec le filtre F168 (tableau 1.5) :

NMm déterminé à partir :	du NMj calculé avec le filtre de Demerliac.	du NMj calculé avec le filtre de Godin.	du NMj calculé avec le filtre de Munk.	du NMj calculé avec le filtre de Doodson.	du NMj calculé avec le filtre W25.	de la moyenne arithmétique des hauteurs horaires.
Ecart moyen quadratique	0,6 mm	0,6 mm	0,5 mm	0,6 mm	5,6 mm	1,9 mm

Tab. 1.5 – Ecart moyen quadratique entre le NMm déterminé à partir du NMj calculées avec le filtre F168 et le NMm indiqué dans le tableau. Calcul à partir des mesures marégraphiques de Brest entre 1846 et 2007 disponible sur SONEL.

Les résultats obtenus par Pugh avec Newlyn sont comparables à ceux obtenus pour Brest avec l’écart moyen quadratique entre le filtre F168 et la moyenne arithmétique (respectivement 2 et 1,9 mm). Par contre, des différences d’un facteur 3 apparaissent pour les séries de Newlyn et Brest avec un écart moyen quadratique respectif entre le filtre F168 et le filtre de Doodson de 1,5 et 0,6mm. Les écarts moyens quadratiques calculés avec les mesures faites à Brest donnent la même valeur avec les filtres de Demerliac, de Godin, de Munk et de Doodson soit 0,6 mm. Pourtant, le nombre de hauteurs utilisées lors du calcul du NMJ est différent d’un filtre à l’autre (respectivement 71, 71, 49, 39 heures).

Pour les études ultérieures, le NMm utilisé pour Brest sera celui obtenu à partir de la moyenne arithmétique des hauteurs horaires pour plusieurs raisons :

- Lors des différents calculs des NMj, 53838 jours d’observations ont été utilisés avec la simple moyenne arithmétique contre 53738 jours avec les filtres de Godin et Demerliac et seulement 53163 jours avec le filtre F168. La raison de cette différence du nombre de jours utilisé est simple : avec le filtre F168, il faut 337 hauteurs horaires à la suite, soit 14 jours. Si au moins l’une d’entre-elle manque, le calcul est impossible, sauf si la lacune est comblée par interpolation avec celles l’entourant. Etant donné que la série marégraphique

de Brest est incomplète à plusieurs moments, il est impossible de calculer les NMj avec le F338 7 jours avant et après la lacune d'observation. Ce qui explique alors aisément la différence du nombre de jours de mesures utilisés pour le NMJ entre la moyenne arithmétique et l'utilisation du F168 avec 675 jours soit presque 2 années ! Il est alors dommage de ne pas exploiter les 675 jours d'observations avec NMj utilisant le filtre F338 alors que la NMj calculé avec la moyenne arithmétique prend en compte toutes les hauteurs horaires.

- Avec un écart moyen quadratique maximum de 2mm, Pugh ne justifie pas l'utilisation de filtres pour la plupart des applications. Pour Brest, la moyenne arithmétique (1,9 mm) se trouve à l'intérieur de cette limite, prouvant qu'il n'est pas indispensable d'utiliser un NMm filtré.

- **Niveau Moyen annuel de la mer (NMa).** Généralement, le NMa est calculé à partir des NMm en pondérant ces dernières du nombre de jours pour lesquels les mesures ont été faites. A partir des données marégraphiques brestoises, la comparaison de l'écart moyen quadratique des différences entre des NMa suivant le même principe que pour les NMm, en prenant d'une part, le filtre F168 et en utilisant d'autre part, les mêmes filtres que précédemment et la simple moyenne arithmétique. Pour tous, les écarts moyens sont proches ou inférieurs à 0,4mm prouvant, si l'on suit les recommandations de Pugh (1987), que calculer le NMa, à partir des NMm utilisant des NMj filtrés n'est pas indispensable (tableau 1.6).

NMa déterminé à partir :	du NMm calculé avec le filtre de Demerliac.	du NMm calculé avec le filtre de Godin.	du NMm calculé avec le filtre de Munk.	du NMm calculé avec le filtre de Doodson.	du NMm calculé avec le filtre W25.	de la moyenne arithmétique des hauteurs horaires.
Ecart moyen quadratique (mm)	0,05 mm	0,05 mm	0,05 mm	0,12 mm	0,27 mm	0,41 mm

Tab. 1.6 – Ecart moyen quadratique entre le NMa déterminé à partir de NMm calculées avec les NMj utilisant un filtre F168 et le NMm indiqué dans le tableau. Calcul à partir des mesures marégraphiques de Brest entre 1846 et 2007 disponible sur SONEL.

Comme expliqué pour le NMm, le NMa utilisé par la suite, sera celui calculé à partir des moyennes annuelles des observations horaires (identique au NMm pondéré en fonction du nombre de jours pour chaque mois). Ultérieurement, sauf indication contraire, lorsqu'on parlera de Niveau Moyen de la Mer (NMM) il s'agira en fait du NMa de la mer. De même les acronymes NMa et MSL (En anglais, Mean Sea Level) seront utilisés sans différence.

1.4.3.2. Niveau moyen de mi-marée.

Le niveau moyen de mi-marée, Mean Tide Level (MTL) en anglais se calcule de la manière suivante :

$$MTL = \frac{MHW + MLW}{2} \text{ (cf. 1.4.3.4 pour la définition du MHW et MLW).}$$

Pour Pugh (1987), le niveau moyen de mi-marée doit être calculé sur une période suffisamment longue, au minimum un mois. Le manuel édité par le COI (1985) recommande, en outre, pour calculer le niveau moyen de mi-marée, d'utiliser un nombre égal de hauteurs de PM et de hauteurs de BM. Pourtant, lors des calculs du niveau moyen mensuel de la marée, il arrive souvent de ne pas avoir un nombre identique de PM et de BM. Malheureusement, le manuel du COI ne nous explique pas comment obtenir un nombre identique de PM et de BM. Par la suite, pour désigner le niveau moyen de mi-marée, seul l'acronyme anglais sera utilisé, MTL.

L'étude du MTL est incontournable pour toute analyse de série marégraphique très longue (supérieure à 160 ans). En effet, les mesures de PM et de BM sont les premières et les plus anciennes observations du niveau de la mer relevées dans le monde (cf. chapitres 2, 3 et 4). De plus, d'après Pugh (2004), le MTL n'est pas identique au MSL à cause des composantes harmoniques de courtes périodes, en particulier M_4 et dans une moindre mesure M_8 , qui s'introduisent dans le développement harmonique de la marée prédite (cf. 1.3.2) par suite du changement de forme de l'onde de marée dans les eaux peu profondes.

Le calcul de la différence entre le MTL et le MSL peut s'obtenir de manière empirique ou de façon analytique. En prenant toujours comme exemple, la série marégraphique de Brest, la méthode empirique, consistant à calculer la différence des moyennes annuelles des MTL avec les MSL (fig. 1.4) donne comme valeur : $MTL - MSL = -2,61 \pm 0,31$ cm. La différence systématique peut être également calculée algébriquement à partir de l'équation suivante, découlant de la théorie de l'analyse harmonique de marée (Pugh, 1987 ou Simon, 2007) :

$$MTL - MSL = A_{M_4} \cdot \cos(2 \cdot g_{M_2} - g_{M_4}) + A_{M_8} \cdot \cos(4 \cdot g_{M_2} - g_{M_8})$$

A_{M_4} et A_{M_8} sont les amplitudes des constituants de marée pour M_4 et M_8 . G_{M_2} , G_{M_4} et G_{M_8} sont les phases de décalage de Greenwich pour les ondes de marée respectives de M_2 , M_4 et M_8 . L'analyse harmonique (cf. 1.3.2) des hauteurs horaires de Brest s'étalant entre 1846 et 2007, le logiciel MAS (cf. 1.3.2.2) permet de calculer comme différence -2,86cm. Enfin, Bouquet de la Grye (1890) fait état d'une différence de -2,9cm entre le MTL et le MSL sans expliquer comment il obtient ladite valeur (cf. 7.1)

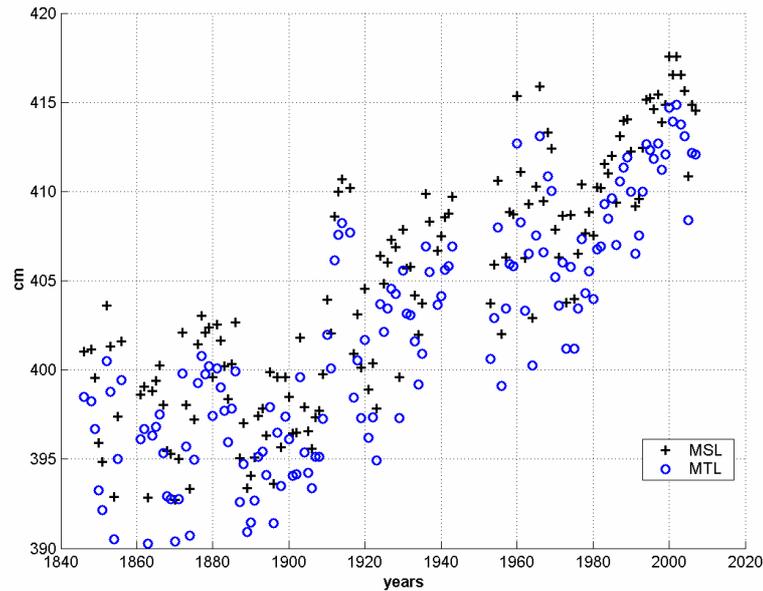


Fig. 1.4 – Niveau moyen de la mer (MSL) et niveau moyen de mi-marée (MTL) à Brest entre 1846 et 2007. Mesures disponibles sur SONEL.

1.4.3.3. Niveau moyen de mi-marnage.

Le niveau moyen de mi-marnage, autrement dit en anglais le Mean Tidal Range (MTR), est d’après Marmer (1951), la différence entre la moyenne des Pleines Mers et la moyenne des Basses Mers).

$$MTR = MHW - MLW \text{ (cf. 1.4.3.4 pour la définition du MHW et MLW).}$$

Peu utilisé en France contrairement aux pays anglo-saxons notamment, le niveau du marnage moyen ne sera pas utilisé ultérieurement. Il est juste indiqué ici dans un but informatif.

1.4.3.4. Niveau moyen de la pleine mer et niveau moyen de la basse mer.

Le niveau moyen de la pleine mer et le niveau moyen de la basse mer, respectivement Mean High Water (MHW) et Mean Low Water (MLW) en anglais, sont obtenus en calculant la moyenne des hauteurs de PM et de BM observées sur une période suffisamment longue.

La marée à Brest est de type semi-diurne ce qui implique 2 PM et 2 BM par jour. L’ensemble de 2 hauteurs journalières de PM ou de PM est donc utilisé pour le calcul respectif du MHW ou MLW. Les moyennes annuelles des MHW et MLW semblent avoir un aspect "bruité" (fig. 1.5). En effet, les moyennes annuelles contiennent les cycles nodaux de la Lune de 18,61 années. Son amplitude est estimée, à partir des données de 1846 à 2007 à $6,6 \pm$

0,4 cm contre 10cm par exemple pour les mesures obtenues à Liverpool d'après Woodworth (1999a). Un cycle parfait de 18,6 ans est difficile à obtenir (fig. 1.5) étant donné que les valeurs annuelles du MHW et MLW sont intimement liées aux variations météorologiques et océanographiques, comme par exemple les ondes de tempête inter-annuels et les variations stériques de l'Atlantique Nord inter-décennales.

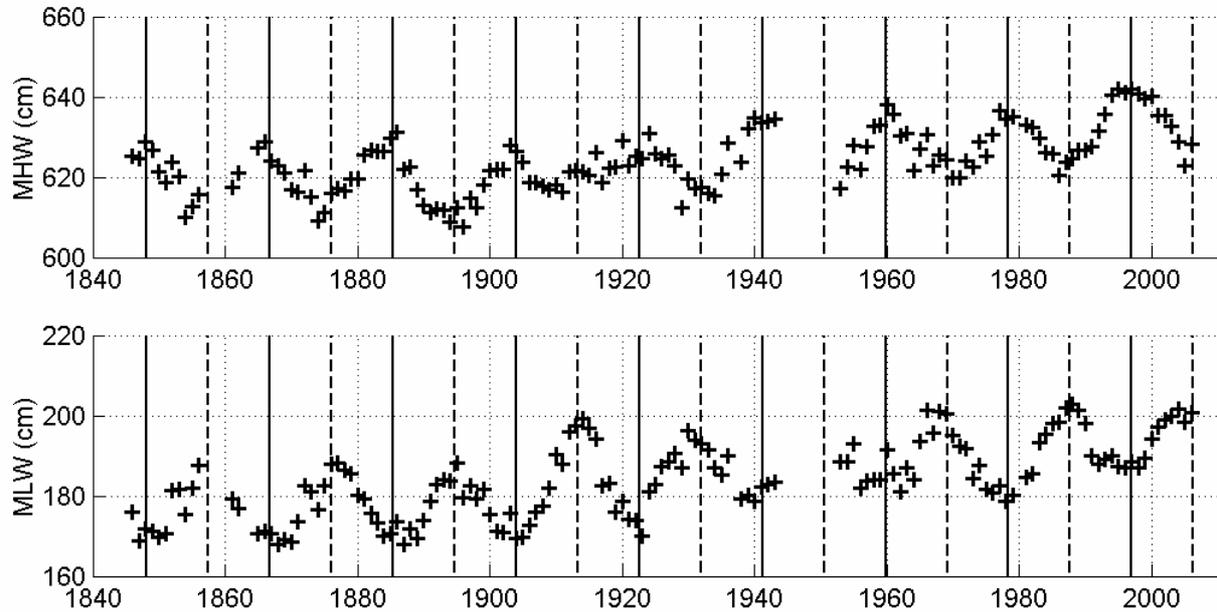


Fig. 1.5 – Niveau moyen annuel de la pleine mer (MHW) et niveau moyen annuel de la basse mer (MLW) à Brest entre 1846 et 2007. Les lignes verticales continues et les lignes verticales en pointillés correspondent au moment du minimum (respectivement du maximum) de la déclinaison de la Lune. Valeurs des minimums et maximums de la déclinaison de la Lune d'après Pugh (2004).

Partie I. Evolution des méthodes
d'observation du niveau marin en France.

Chapitre 2. De l'éclosion des Académies naissent les premiers protocoles.

"Toutes ces eaux se balancent vers le haut et vers le bas, comme un balancier placé à l'intérieur de la Terre". Platon, Phedon (≈ 370 avant J.C.).

2.1. 1666 : Première procédure pour observer le niveau marin.

Le plus ancien protocole pour observer de manière rigoureuse le niveau de la mer remonte à 1666. Elle est l'œuvre de Sir Moray [1609-1673], militaire écossais, mais surtout un des fondateurs de la Royal Society of London for the Improvement of Natural Knowledge, en 1660. Pour vérifier les théories émises par les savants, des observations précises et continues du niveau marin font cruellement défaut. John Wallis [1616-1703], autre membre fondateur de la Royal Society fait état de ses hypothèses en 1666 sur le flux et reflux de la mer. Cette même année, dans le prolongement du travail de son pair, Moray profite de l'occasion pour édicter un protocole sur la manière d'observer le niveau marin dont l'extrait est repris ci-dessous dans l'anglais de l'époque :

Yet, because'tis worthwhile, to learn as much of it, as may be, the Proposer and many others do desire, That observations be constantly made of all these Particulars for some Months, and, if it may be, years together, And because such Observations will be the more easily and exactly made, where the Tides rise highest, it is presumed, that a fit Apparatus being made for the purpose, they may be made about Bristol or Cheap flow [Chepstow], best of any places in England, because the Tides are said thereabout to rise to ten or twelve fathoms; as upon the coast of Britanny in France, they do to thirteen and fourteen.

In order to which, this following Apparatus is proposed to be made use of In some convenient place upon a Wall, Rock, or Bridge, &c. let there be an Observatory standing, as neer as may be to the brink of the Sea, or upon some wall; and if it cannot be weel placed just where the Low water is, there may be a Channel out from the Low water to the bottom of the Wall, Rock, &c. The Observatory is to be raised above the High water 18 [$\approx 5,18m^1$], or 20 foot [$\approx 6,10m$]; and a Pump², of any reasonable dimension, placed perpendicularly by the Wall, reaching above the High Water as high as conveniently may be. Upon the top of the Pump a Pulley is to be fastned, for letting down into the Pump a piece of floating wood, which, as the water comes in, may rise and fall with'it. And because the rising and falling of the water amounts to 60 [$\approx 18,30m$] or 70 foot [$\approx 21,35m$], the Counterpoise

¹ Pour cet extrait uniquement, les conversions en mètres sont basées sur une valeur du pied anglais égale à 0,3048m [d'après Woodworth, 1999b].

² D'après Cartwright (1999), ce que Moray nomme Pump est en fait, le puits de tranquillisation.

of the weight, that goes into the Pump, is to hang upon as many Pulleys, as may serve to make it rise & fall within the space, by which the height of the Pump exceeds the height of the Water. And because by this means the Counterpoise will rise and fall flower, and consequently by less proportions, than the weight it self, the first Pulley may have upon it a Wheele or two, to turn Indexes at any proportion required, so as to give the minute parts of the motion, and degrees of risings and fallings. All which is to be observed by Pendulum-watches that have Minutes and Seconds, with Cheeks according to Mr. Hugens's way.

And because if the Hole, by which the water is let into the Pump, be as large as the Bore of the Pump it self, the weight that is raised by the water, will rise and fall with an Undulation, according to the inequality of the Sea's Surface, twill therefore be fit, that the Hole, by with the water enters, be less than half as bigg as the Bore of the Pump; any inconvenience that may follow thereupon, as to the Periods and Stations of the Floud and Ebb, not being considerable.

And to the end, that it may appear the better, what are the Particular Observations, desired to be made, near Bristol or Cheap-stow bridg, it was thought not amiss, to set them down distinctly by themselves.

1. The degrees of the Rising and Falling of the water every quarter of an hour (or as often as conveniently may be) from the Periods of the Tides and Ebbs; to be observed night and day for 2 or 3 months.

2. The degrees of the velocity of the Water every quarter of an hour for some whole Tides together; to be observed by a second Pendul-watch; and a logg fastened to a line of some 50 fathoms [$\approx 80,47\text{m}$], wound about a wheel.

3. The exact measures of the Heights of every utmost High water and Low water, from one Spring-tide to another, for some Months or rather Years.

4. The exact Heights of Spring-tides and Spring-Ebbs for some Years together.

5. The Position of the Wind at every observation of the Tides; and the times of its Changes.

6. The State of the Weather, as to Rain, Hail, Mist, Haziness, &c. and times of its Changes.

7. At the times of observation of the Tides, the height of the Thermometer; the height of the Bariscope; the height of the Hygroscope; the Ages of the Moon, and her Azimuths; and her place in all respects; And lastly the Sun's place ; all these to minutes.

And it would be convenient, to keep Journal Tables, for all these Observations, each answering to its day of the Month.

For the Apparatus of all these observations, there will be particularly necessary.

A good Pendulum-watch,

A Vane shewing Azimuths to minute parts,

An Instrument to measure the strength of the Winde,

A large and good needle shewing Azimuths to degrees, Thermometer, Barometers, hygrosopes.

These Observations being thought very considerable as well as curious, as hoped, that those who have conveniency, will give encouragement and assistance for the making of them and withal oblige the publick by imparting, what they shall have observed of this kind: The Publisher intending, that when ever such observations shall be communicated to him, he will give notice of it to the publick, and take care of the improvement thereof to the best use and advantage A Pattern of the Table, proposed to be made for observing the Tides, is intended to be published the next opportunity, God permitting.

Moray présente tout d'abord l'observatoire devant être construit. Plusieurs éléments tendent à montrer que l'auteur n'est resté qu'au stade de la théorie avec son appareil. Installer cette machine aurait occasionné pour l'époque un coût important. En effet, l'appareil doit se trouver entre 5 et 7 mètres de hauteur ce qui signifie qu'il doit être installé au 2^{ème} étage d'un bâtiment. De plus, le flotteur doit être en permanence en contact avec le niveau de la mer. Cette condition sine qua non implique de fait, suivant les sites, le creusement d'un canal horizontal permettant une communication permanente avec la mer. Malheureusement, suivant les conditions locales, ce conduit pourra par exemple, être comblé, avec des sédiments.

Viennent ensuite les problèmes pratiques : l'utilisation d'une corde depuis le flotteur jusqu'au contrepoids représente un cordage d'au moins 80 à 90 pieds [\approx 26-29 mètres]. Avec une telle longueur, le cordage de chanvre par exemple, se serait distendu au cours du temps.

En revanche, bien des éléments décrits ici sont les bases du fonctionnement des MCM : Le système de flotteur fixé à une corde suspendue à une série de poulies et d'un contrepoids est le premier des deux mécanismes principaux des MCM (le second étant le couplage de ce mécanisme avec un tambour tournant à vitesse régulière). Le flotteur de l'appareil se trouve dans le puits de tranquillisation. Ce puits permet d'après Simon (2007), de filtrer les fluctuations de la hauteur d'eau liée aux vagues et à la houle. Un détail portant sur la longueur du puits est à souligner : ce tuyau doit mesurer entre 19,5 et 22,7 mètres et ne doit jamais être complètement émergé, ni entièrement immergé. D'après Simon et Lahaye-Collomb (1997), le marnage atteint 15m en Manche et au Canada ; en baie de Fundy où le marnage est le plus important du monde, il peut atteindre 17m. Est-ce le fruit d'une heureuse coïncidence ou connaissait-il les plus importants marnages du monde ? Moray, durant sa carrière militaire a opéré plusieurs voyages entre la France et le Royaume-Uni. Peut-être s'est-il trouvé en escale à proximité de la baie du Mont Saint-Michel ? Cela expliquerait alors la longueur du tuyau choisi par le savant.

Moray propose deux sites d'observation : l'un à Bristol et l'autre à Chepstow. D'après la notice, les hauteurs du niveau de la mer doivent être mesurées tous les quarts d'heure, de jour comme de nuit, durant deux à trois mois (point n°1 de la notice). Le point n°2 s'attarde à expliquer le mécanisme d'une machine pouvant mesurer les vitesses des courants de marée. Les points n°3 et 4 invitent les observateurs à observer précisément les heures et hauteurs pour les PM et les BM. Enfin, les points n°5 à 7 décrivent les mesures météorologiques à noter en complément des observations du niveau marin, c'est-à-dire, les conditions météorologiques, la direction et la force du vent, la température, la pression et le taux d'humidité.

Cette première description d'appareil et les instructions données par Moray pour observer le niveau marin posent certains fondements, notamment pour les MCM, mais il est très probable que l'auteur a écrit cette notice sans avoir mis en application son propre protocole. Un article du capitaine Samuel Sturmy, paru en 1668 dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* indique que des observations furent réalisées à 4 miles (\approx 6,5km) de Bristol. Le mémoire par contre ne contient aucune mesure. Une lettre de Henry Philips à John Wallis [1616-1703], paru dans la même revue et la même année, signale des observations réalisées à Londres. Là encore, aucune méthode ni aucune donnée n'a été jointe au document. Même si les observations n'ont pas été publiées dans ce journal, Childrey [1623-1670] semble avoir réuni de nombreux jeux de mesures comme l'indique une correspondance avec Wallis publiée dans le *Dictionary of National Biography* (édition 1887) au nom de Joshua Childrey. Ce dernier devait les remettre à la Royal Society, mais il mourut peu de temps avant et les données semblent aujourd'hui perdues ("*but they seem to have been lost*").

Contrairement aux observations britanniques, les premières mesures du niveau de la mer réalisées en France furent publiées. L'ensemble des extraits suivants est exclusivement tiré de documents français. Cette restriction à ce seul pays est commandée par les observations étudiées par la suite dans ce mémoire, lesquelles ont toutes été réalisées en France.

2.2. 1675 : Première description d'appareil et première spécification publiée dans un journal français.

La description théorique du premier observatoire du niveau de la mer dans un journal français se trouve dans le tome 10 du *Journal des Sçavans* (1675). Il s'agit d'un extrait traduit du *Journal d'Italie* (non retrouvé malgré mes recherches¹). Voici ce qui y est décrit pour la machine :

Il faut mettre un observatoire sur un mur, sur un rocher, ou un pont le plus près qu'on pourra du rivage de la Mer ; & si on ne peut pas le mettre si juste auprès du lieu où la basse marée cesse de monter, il faut faire un canal horizontal du Plan de la marée au bas du mur, du rocher, ou du pont. Dans cet observatoire qui doit être plus haut que la haute marée d'environ dix-huit [≈ 5,85m] ou vingt pieds [≈ 6,50m], il faudra élever perpendiculairement au mur un tuyau d'une largeur convenable attachant au haut une poulie par le moyen de laquelle un morceau de bois flottant puisse s'élever & s'abaisser à mesure que l'eau entrera dans le Tuyau. Et parce que l'eau s'élève jusqu'à la hauteur de 60. [≈ 19,50m] ou 70. pieds [≈ 22,75m], & s'abaisse de même, il faudra que le contrepoids qu'on donnera au bois flottant soit suspendu par plusieurs poulies, afin qu'il puisse s'élever & s'abaisser dans l'espace par lequel le Tuyau surmonte la hauteur d'eau. Ce nombre de poulies redoublé servira encore pour faire que le contrepoids en montant & descendant parcoure un moindre espace que n'est celui que le morceau de bois qui est dans le Tuyau parcourt en montant & descendant.

On attachera ensuite à une des poulies un Index, par le moyen duquel on pourra connoître jusqu'à la moindre partie du mouvement & les degrez de la hauteur ou de l'abaissement de l'eau.

Mais parce que le bois qui flotte dans le tuyau s'éleveroit & s'abaisseroit suivant l'inégalité que les vagues donneroient à la superficie de la Mer si le trou par lequel l'eau entre dans le tuyau étoit aussi large que la bouche même du tuyau, il sera bon de le faire plus petit de la moitié ; & par là il ne peut arriver aucun inconvénient considérable qui puisse empêcher de remarquer les différens périodes & la différente hauteur du flux & du reflux. [...]

[...] La figure [fig. 2.1 ci-contre] fera encore mieux comprendre toute l'æconomie du dessein. Elle n'est pas dans le Journal d'Italie, & c'est à M. Perrault à qui je la dois avec la description de toutes ses parties qu'il a eu la bonté de dresser sur l'idée qui en est donné dans l'Italien.

A. est la corde qui soutient le morceau de bois nageant sur l'eau qui monte & qui baisse dans le tuyau G.

B. est le contrepoids qui tirant le moufle E. descend & monte à mesure que le morceau de bois descend ou monte dans le tuyau : & il arrive par le redoublement de la corde sur les poulies, que lors que le morceau de bois monte 70. pieds, le contrepoids ne descend que 20. pieds.

C. est la première poulie à laquelle l'index D. est attaché, qui fait voir sur le cadran D.

F. les degrez de l'élevation ou de la descente de l'eau dans le tuyau.

G. le haut du tuyau qui est long de 70. pieds, & qui descend aussi bas que la Mer dans les marées les plus basses.

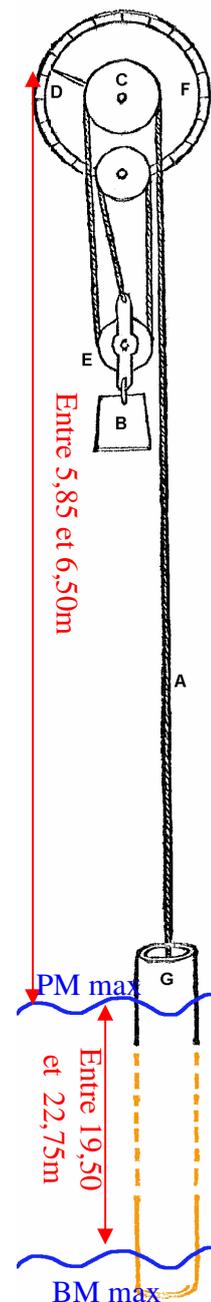


Fig. 2.1 – Dessin de Perrault (1675), complété par les ajouts en couleur.

¹ et celles menées par P. Pirazzoli et G. Wöppelmann lors de la rédaction de l'article Tide Gauges pour le compte de l'*Encyclopédia of Coastal Science* (2005). Communication personnelle G. Wöppelmann.

En considérant que la traduction reste fidèle au document original, la similitude avec la notice de Moray est incontestable. Toutes les explications du savant écossais sont reprises très fidèlement jusqu'aux différentes hauteurs exprimées. Il est alors simple de comprendre pourquoi un journal italien parle de marnage compris entre 5,85 et 6,50m alors qu'en Italie, il est inférieur à 1m d'après Simon et Lahaye-Collomb (1997). Seule la figure réalisée par Perrault (1675) apporte une originalité par rapport à l'écrit de 1666. Accompagnant cette description d'appareil, se trouve associé l'exposé d'une méthode pour observer le niveau marin :

La machine étant disposé comme nous venons de la décrire, il faudra observer à chaque quart d'heure, & plus souvent même si on le peu commodement, pendant plusieurs mois & plusieurs années ce qui suit.

- 1. Les degrez de la hauteur & de l'abaissement de l'eau pendant les périodes du flux & du reflux.*
- 2. Les degrez de la rapidité du mouvement de l'eau successivement pendant plusieurs marées entières, avec une horloge à pendule & une pièce de bois attachée à une corde de quarantes aunes [≈47,50m], & plus longue encore, laquelle s'entortillera à une rouë.*
- 3. L'exacte mesure, de la plus grande ou de la plus petite hauteur de l'eau d'un flux à l'autre de ceux qui arrivent sept jours avant la nouvelle & la pleine Lune, que les Anglois appellent Spring-tides.*
- 4. La véritable hauteur du flux & reflux pendant plusieurs années de suite.*
- 5. Le costé d'où vient le vent pendant qu'on observe chaque marée, le temps de son changement ; & les degrez de l'impetuositè avec laquelle il souffle.*
- 6. L'état présent du temps auquel se fait l'observation : sçavoir s'il est tourné à la pluye, à la neige, à la grêle, aux broüillards, & le temps de ces changemens.*
- 7. Dans le temps de l'observation de la marée il faut remarquer la hauteur des Thermomètres, des Baroscopes. Les jours de la Lune, ses azimuts, le lieu dans tous les aspects où elle se trouve, & enfin le lieu du Soleil.*

Pour toutes ces observations, il seroit à propos d'avoir diverses tables dont chacune répondît à chaque jour du mois, comme aussi d'avoir des instrumens preparez ; Sçavoir une bonne horloge à pendule, une banderole pour montrer les azimuts pendant toutes les minutes, un instrument pour mesurer la force du vent, & enfin des Thermomètres, des Baroscopes, & des Hygrosopes pour toutes les altérations de l'air.

L'ensemble de ces points reprend dans le détail la présentation de Moray. Il s'agit donc d'un plagiat aujourd'hui mis à jour : le mémoire paru dans le *Journal des Sçavans* est l'œuvre de Sir Moray. En revanche, la figure de Perrault (1675) ajoute un apport indéniable à la réflexion du savant écossais.

2.3. 1679 : Premières mesures et première méthode confrontée au terrain.

Les premières observations du niveau de la mer furent réalisées en marge d'un grand projet de la fin du 17^{ème} siècle : corriger la carte de France en connaissant la valeur du degré de méridien. Philippe de La Hire [1640-1718] la publia en 1683 sous le nom de *Carte de France corrigée par ordre du Roi sur les Observations de M^{rs} de l'Académie des Sciences*. Ce document est la conclusion de la première étude géodésique des côtes du pays. Entre 1679 et 1681, La Hire accompagné de Jean Picard [1620-1682], déterminèrent par des observations astronomiques, les coordonnées géographiques des villes de Brest et Nantes en 1679, puis de

Bayonne, Bordeaux, Royan et Cordouan en 1680, pour finir par Saint-Malo, le Mont Saint-Michel, Cherbourg, Caen, Dunkerque et Calais en 1681. Leurs travaux furent rédigés entre 1666 et 1698 et publiés en 1729 (1729a, 1729b, 1729c). Les deux astronomes profitèrent de chacune de leurs escales (hormis Nantes, Bordeaux, Royan, Cherbourg, Caen, Dunkerque et Calais) pour réaliser différentes mesures annexes dont des "*observations pour les marées*". Ces premières mesures sont toutes identiques : pour chaque port, un tableau subdivisé en jours. Les colonnes y indiquent les heures, minutes et secondes du Soleil, les heures — minutes — secondes de la Lune, si la mer est haute ou basse et, enfin, la direction du vent. Il n'y a donc pas ici, de mesures de hauteur d'eau mais juste les heures des PM et BM en fonction du Soleil et de la Lune. En conséquence, l'ensemble de ces mesures n'est pas intégré à l'annexe A portant sur l'inventaire des hauteurs du niveau de la mer depuis la fin du 17^{ème} siècle.

Un court descriptif accompagne les premières observations faites à Brest. Il est écrit que pour s'affranchir des étales où il est souvent difficile de déterminer précisément l'heure de la PM ou BM, les astronomes prenaient "*deux temps éloignez devant & après, ausquels elle [le niveau de la mer] se trouvoit à certaine hauteur précise qui duroit si peu que nous n'avons point fait de difficulté de marquer jusques aux secondes*". Pour des raisons financières, les travaux de Picard et La Hire (1729a, 1729b, 1729c) ne paraîtront qu'en 1729 alors que ce premier descriptif d'observations de la marée trouve naissance à la fin du 17^{ème} siècle.

Cette même année quelques observations sont réalisées sur l'île de Gorée par de Glos, Varin et Deshayes¹ ; seules les heures de PM et BM y sont indiquées. En 1685, Vidé de la Bavanière envoie à l'Académie Royale des Sciences, un mémoire d'observations suivies sur le flux et reflux touchant les diverses hauteurs des marées à Saint Malo avec les recommandations mises en place pour les obtenir^{2 3 4}. Trois ans plus tard, en 1688, Vidé de la Bavanière présente aux académiciens, ses observations faites à Saint Malo, en différentes saisons de l'année et en divers âges de la Lune sur l'inégalité des marées⁵. En 1692, 4 mois de PM ont été observés à Brest, au rocher de la Rose, à l'entrée et à l'intérieur du Port d'après Cassini II (1713b)⁶. Ce dernier n'indique rien concernant la méthode mise en œuvre pour l'obtention des valeurs. Seules, des heures de PM et BM observées du 18 au 29 septembre 1692 sont conservées à l'Observatoire de Paris⁷. Dans ce manuscrit, où les observations astronomiques représentent la majorité des mesures, les heures sont indiquées en temps solaire vrai, mais aucune procédure pour les mesurer ne les accompagne. La localisation de l'observatoire, à la maison du Jardin du Roy est en revanche indiquée dans l'écrit contrairement au nom du savant ayant entrepris cette campagne de mesures. Il est possible que le savant se soit trompé d'année car des données identiques à celles décrites par Cassini existent aux Archives Nationales, pour les 4 premiers mois de l'année 1693 (et non 1692)

¹ Observations faites en l'Isle de Gorée proche le Cap Vert en Afrique (1681), Tome 7-2, p.4452-453.

² PV de l'Académie Royale des Sciences, 1683-1686, tome 11, séance du samedi 22 décembre 1685.

³ Diverses observations de physique générale. Histoire de l'Académie des Sciences (1685), Tome 1, p.427.

⁴ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1701, tome 20, séance du samedi 08 janvier 1701.

⁵ Diverses observations de physique générale. Histoire de l'Académie des Sciences (1688), édité en 1688, Tome 2, p.42.

⁶ Jacques Cassini dit Cassini II [1677-1756] appartient à la deuxième génération d'une dynastie de 4 savants s'étalant entre 1671 et 1793. D'abord astronomes puis géographes, tous participeront au perfectionnement de la cartographie française. Cassini II obtient sa charge à l'Observatoire de Paris au décès de son père qu'il gardera jusqu'en 1740 année où il abandonne ses activités scientifiques, comprenant l'inutilité de son opposition aux idées nouvelles, au profit de Cassini de Thury, son fils. Par la suite, l'utilisation du nom Cassini se limitera au seul savant Cassini II.

⁷ Observations faites à Brest en l'année 1692, 8pages. Observatoire de Paris, B.5.9.

avec, en supplément, des indications concernant la température de l'air et les conditions de vent¹.

2.4. Bilan au crépuscule du 17^{ème} siècle.

Le regain d'intérêt pour l'étude du flux et du reflux de la mer au 17^{ème} siècle est indissociable de la création des académies royales de Londres et Paris. Avec l'émergence de ces institutions et la publication par Newton de son ouvrage intitulé *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687) dans lequel il livre sa théorie de l'attraction universelle, jamais l'explication sur les phénomènes des marées n'avaient été autant à la portée des savants. Ces derniers se rendirent rapidement compte, que des observations précises du niveau marin n'existaient pas. Sans mesures, leurs théories ne servaient pas à grand-chose car il était impossible de les vérifier. En 1666, Moray fut le premier à proposer un protocole théorique sur la manière d'observer le niveau d'eau. En 1679, c'est au tour de La Hire et de Picard de proposer leur méthode pour mesurer l'heure des PM. Les observations alors réalisées, quelques valeurs sporadiques pour autant qu'elles nous sont parvenues au travers des *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, ne pouvaient naturellement pas contenter et surtout aider les savants dans leur quête du savoir et de la connaissance.

¹ Mémoire de la quantité d'eau qui s'est trouvée, de pleine mer sur Rose, roche située à l'entrée et au-dedans du port de Brest pendant les quatre premiers mois de l'année 1693. Signé par Coubard. Archives Nationales, MAR/3/JJ/151, fol n°7.

Chapitre 3. Pouvoir absolu des savants de l'Académie Royale des Sciences sur les mesures du niveau marin.

"Passer de l'histoire romancée du climat à son histoire scientifique, tout comme on est passé jadis, dans un autre domaine, de l'alchimie à la chimie". Emmanuel Le Roy Ladurie. Histoire du climat depuis l'an mil (1967).

Durant le Siècle des Lumières jusqu'à l'aube de la Révolution Française, les académiciens, furent commanditaires d'observations du niveau de la mer ; n'hésitant pas — sous l'aval de hauts dirigeants — à publier des manuels méthodologiques envoyés aux personnes les plus à même de réaliser les mesures : les professeurs d'hydrographie. Suite aux mesures et aux observations produites par ces derniers et cherchant à obtenir des données toujours de plus en plus précises, les savants améliorèrent sans cesse la manière de mesurer les hauteurs du flux et reflux.

3.1. Diffusion du premier manuel recommandé par l'Académie Royale des Sciences (1701) et réponses obtenues.

En 1701, un premier mémoire, publié dans l'*Histoire de l'Académie Royale des Sciences* est envoyé sous l'autorité du comte de Pontchartrain [1643-1727], secrétaire d'état à la Marine entre 1699 à 1714, à l'ensemble des autorités portuaires de France. Il s'agit d'une notice précisant le protocole à suivre pour les mesures du niveau de la mer à effectuer en vue de leur confrontation à la théorie des marées de Descartes [1596-1650] afin de vérifier l'exactitude de cette dernière¹. Etonnant lorsque l'on sait que la théorie des marées de Newton est postérieure à celle de Descartes. D'ailleurs dans ce document, on s'étonne que "*ce qui pourra paraître surprenant, on peut plutôt se flatter d'avoir le Système, que s'assurer d'avoir les Phénomènes avec assez d'exactitude*". En d'autres termes, la physique du phénomène est déterminée mais sa vérification, fautes d'observations précises, ne l'est pas. Des observations venant des ports de Dunkerque et du Havre arriveront à l'Académie dès la fin de l'année 1701.

¹ Gouye T., P de la Hire Sur le flux et le reflux. MHARS 1701 (Paris, 1743), p.11-13.

3.1.1. Détails sur le mémoire.

Le père Thomas Göüye, s.j. [1650-1725] et Philippe de La Hire sous l'aval du comte de Ponchartrain⁵, rédigent ce premier "*Mémoire de la manière d'observer dans les ports le flux et le reflux de la mer*". Le Procès Verbal de l'Académie du 08 janvier 1701¹ nous apprend que Göüye a repris en partie le mémoire d'observations sur le flux et reflux de Videll de la Bavanière de 1685, alors que les deux savants ont omis de mentionner jusqu'à son nom dans le document final. Voici en intégralité cette notice présentée le mercredi 09 février 1701 aux académiciens² :

Mémoire de la manière d'observer dans les ports le flux et le reflux de la mer

I.

On choisira dans le Port un lieu, & où la Mer n'ait d'autre mouvement que celui du Flux & du Reflux. On y plantera un Poteau qui surpasse la plus grande hauteur, où, au rapport des Mariniers, la Mer puisse monter en ce lieu-là.

II.

Ce poteau sera gradué de demi-pouce [$\approx 1,35\text{cm}$] en demi-pouce, à commencer à compter depuis la ligne du terrain, & l'on y marquera à chaque division des Lignes parallèles.

III.

A chaque Marée, on marquera dans un Journal à quelle Ligne du Poteau la Mer tout-à-fait haute, ou tout-à-fait basse, aura donné ; & si elle a donné entre deux Lignes, on estimera à peu près cet intervalle.

IV.

On marquera aussi par le moyen d'une Montre bien réglée, à quelle heure & à quelle minute la Mer aura paru le Poteau tout-à-fait haute, ou tout-à-fait basse.

V.

Si la Mer basse se retirait du Poteau, on se contentera de marquer tous les jours la Ligne où la Mer la plus haute aura monté, & le temps.

VI.

On observera quand on le pourra, le temps précis où la Mer aura donné à la même Ligne, tant en montant qu'en descendant.

VII.

On observera le vent qui régnera pendant que la Mer montera, & qu'elle descendra, & à quel air de vent porte la Marée, soit en montant, soit en descendant.

VIII.

On marquera le vent Traversier de la Rade ; & celui qui enfile l'entrée du Port.

IX.

Quelquefois dans l'année, on observera en Rade, si entre le temps où la Mer monte, & celui où elle descend, il y a quelque repos. Pour cette observation un Chaloupe mouillera en Rade en temps calme ; on placera sur les bords de la Chaloupe en travers un petit Essieu de bois bien arrondi, & propre à tourner aisément. Il y aura à chaque bout de cet essieu un petit Moulinet, dont les ailes entreront de 5 ou 6 pouces dans l'eau.

On marquera, si entre les deux mouvements – contraires de la Mer, ce Moulinet est quelque temps sans tourner, & combien dure ce repos, en cas qu'il y en ait un.

¹ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1701, tome 20, séance du samedi 08 janvier 1701.

² PV de l'Académie Royale des Sciences, 1701, tome 20, séance du mercredi 09 février 1701.

Ces explications suggèrent que les auteurs s'étaient déjà confrontés au problème de l'observation du niveau de la mer. Certes P. de La Hire l'avait déjà été mais les améliorations sont considérables par rapport à ce qui avait été exprimé en 1679. Bien que ses notes n'aient pu être retrouvées pour en apporter la preuve, ce bond méthodologique est certainement l'œuvre de Vidé de la Bavanière,

Ce mémoire pose les bases de l'observation du niveau de la mer. Les articles 1 et 2 invitent l'observateur à choisir un endroit le moins exposé possible à la houle et aux clapots pour y placer l'échelle de marée et à graduer celle-ci tous les 1,35cm, graduations très fines si l'on se réfère à celles des échelles du SHOM (un carré tous les 10cm). Les articles 3-5, 7-8 donnent des indications sur les informations à conserver, tant concernant les observations du niveau de la mer avec les indications horaires (art. 3 à 5), que les observations météorologiques (force et direction du vent ; art 7 et 8). L'article 6 reprend le procédé détaillé par Picard et La Hire (1729a) (cf. 2.3.). Enfin, le dernier article développe les premières spécifications connues pour observer les courants de marée.

3.1.2. 1701-1702 : Premiers résultats obtenus.

Les premières observations faites à Dunkerque¹² (1701-1702) et au Havre³ (1701-1702), respectivement par Baërt et du Bocage, professeurs en hydrographie, sont envoyées à l'Académie. Götye, de La Hire et Cassini sont chargés par les académiciens de les examiner. Seul Cassini II utilisera les données en signant des articles dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* (présentés en 1710a, 1710b, 1710c mais imprimés en 1732). Accompagnant les mesures envoyées à l'Académie, les professeurs d'hydrographie y adjoignent leurs propres recommandations.

¹ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1701, tome 20, séance du mardi 29 novembre 1701.

² PV de l'Académie Royale des Sciences, 1702, tome 21, séance du mercredi 28 janvier 1702.

³ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1702, tome 21, séance du samedi 03 juin 1702.

3.1.2.1. Protocole suivi par Baërt à Dunkerque entre 1701 et 1702.

La lettre par laquelle Baërt présente son protocole à Gouÿe n'a pas été retrouvée, mais Cassini (1710b) en reprend de larges extraits dans les *Mémoires de l'Académie Royale de Sciences* :

L'observatoire.

Baert fit construire une petite guérite dans une zone abritée du port pour être protégé des conditions météorologiques et n' "être point détourné dans ses observations".

Le matériel utilisé pour déterminer les hauteurs.

Accompagnant l'écrit de Cassini (1710b), une figure présente l'appareil fabriqué pour mesurer la hauteur de la mer (fig 3.1). Baërt a installé un tuyau carré fixe (EFGH), composé de quatre planches de bois, perpendiculaires à la surface de la mer. Cet ensemble est ouvert en bas (HG) permettant ainsi à l'eau de monter et de descendre librement, tout en étant fermé en haut (EF) par un couvercle percé en A d'un trou de 14 lignes ($\approx 3,16\text{cm}$) de diamètre. Passant par cette ouverture, une tige en bois (TK) ayant son extrémité inférieure K fixée à une planchette carrée (LM) et un peu arrondie sur les bords afin de minimiser les frottements avec EFGH. Fixée sous cette planchette, une plaque de liège de 4 pouces ($\approx 11\text{cm}$) d'épaisseur permet de faire flotter la tige en bois graduée en pieds et en pouces à la surface de l'eau. Les hauteurs de la mer sont alors lues sur la tige graduée en prenant comme référence le dessus du couvercle EF.

La méthode de mesure des hauteurs et du temps.

Pour avoir l'heure, une horloge à minutes était réglée "de tems en tems" grâce à une ligne méridienne "tracé avec beaucoup de circonspection". Pour connaître le temps de la PM ou de la BM, Baërt appliqua la règle n°3 édictée en 1701 par P. Gouÿe et P. de La Hire mais en prenant "deux observations faites à la même hauteur le plus proche de la haute Mer, l'une avant & l'autre après ; ce qu'il a jugé plus à propos de faire qu'à des distances plus éloignées". C'est grâce à l'expérience acquise jour après jour, lorsqu'il effectuait les mesures que cette amélioration fut certainement acquise.

Informations diverses.

L'ensemble des hauteurs mesurées est rattaché à une référence verticale, ici constituée par un point fixe "de niveau avec le dessus des tablettes qui bordent le Quay proche l'Ecluse du Bassin, directement à la Montée du côté de la Citadelle qui est un endroit du Quay que la mer ne surmonte jamais". De plus, les conditions de vent et la température de l'air étaient mesurées et consignées pour chaque journée.

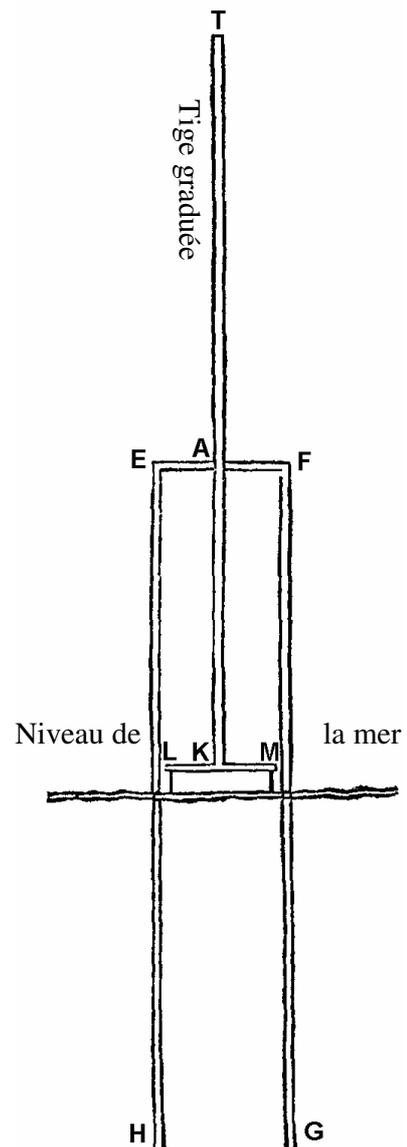


Fig. 3.1 – Appareil mesurant le niveau de la mer, d'après Cassini (1710b).

Une note, accompagnant le registre des mesures du niveau de la mer a été retrouvée à l'Observatoire de Paris. Compte tenu de son intérêt, elle est retranscrite en partie ci-dessous¹. Il n'est jamais question d'une quelconque machine pour mesurer les hauteurs d'eau. Baërt décrit tout au plus le site choisi pour réaliser les observations, la spécificité d'obtenir l'heure de la PM ou de la BM et la méthode pour consigner les données :

Pour observer le flux et reflux de la mer a Dunkerque j'ay choisi un lieu dans le parq de la Marine a scavoir dans la cale ou git la chaloupe de Monsieur l'intendant a costé de la Sale de construction qui est un endroit couvert et a l'abry ou la mer n'a d'autre mouvement remarquable que celui du flux et reflux, la où j'ay trouve un poteau commode sur lequel j'ay cherché un point de niveau [illisible] le dessus des Tablettes quy bordent le quay proche de l'Ecluse du Bassin directement a la montée du costé de la citadelle, qui est un endroit du quay que la mer ne surmonte jamais et quy est plus haut que le dessus de l'heurtoir de la ditte Ecluse de 25 pieds 5 pouces. ainsi ce point du poteau est toujours plus haut que la plus haute Marée. J'ai fixé ce point pour terme et commencement des pieds et pouces que j'ay marqué sur le dit poteau en augmentant en nombre vers en bas afin de trouver le rapport de toutes les hauteurs de marées que je devoir observée. ensuite j'ay trassé avec beaucoup de circonspection un ligne meridienne pour de temps en temps regler et coriger les horloges a minutes qui me servent a observer les temps des marées. quand aux vents je me suis réglé sur le coq de la grande Tour et pour exprimer sa force je me suis servi des termes des mariniers scavoir petit vent, Beaufrais, Echars, Grand vent, vent forcé, Tourmente, Calme. Or ensuivant le memoire de la Cour j'ay observé le Temps précis et le lieu du poteau on a donné la mer tant en montant qu'en descendant. J'avois premedité de prendre le milieu entre ces deux temps pour le vray temps de la haute mer et cela sur la superposition que la mer dans un même jour Croit et décroît en temps égaux espacés égaux : mais voiant par toutes les experiences qu'elle descend un peu plus tardivement qu'elle ne monte j'ay esté d'avis de ne prendre pour le temps de haute mer que le moien, proportionel arihmetique des deux temps quy repondent au point du poteau le plus pres le plus haut point. Comme on peut voir dans l'Etat ey apres, n'ayant rien osée deduire pour le Temps que la mer Etale, quy est quelque fois de 12, 15, 20 ou de 30 minutes. [...]

J'avois pensé rendre mes observations simplement comme j'ay fait au premier essay : mais croiant que peuestre la Curiosité me pouroit ynciter a la Contemplation des Causes de l'yregularité qye j'ay reconnu, j'avois préparé en ordre les choses que je pensois avoir besoin pour l'envisager de tous Costez, et coians que cela ne peut nuire, je les rends dans le même Etat comme je les avois rédigé pour moy même [...]

La lettre où Baërt décrit sa machine n'a pas été retrouvée. Quelle confiance peut-on alors apporter aux écrits de Cassini ? Des éléments de réponses se trouvent dans la description de l'observatoire du Havre.

3.1.2.2. Protocole retenu par Du Bocage au Havre en 1701 et 1702.

Dans ses observations faites au Havre et à l'opposé des initiatives prises par Baërt à Dunkerque, Du Bocage n'a semble-t-il, nullement innové par rapport aux règles édictées en 1701 par Gouÿe et de La Hire. Cassini (1710c) explique que Du Bocage a choisi le lieu le plus à l'abri du port pour y faire les observations. Une planche de 10 pieds et $\frac{1}{2}$ ($\approx 3,41$ m) divisée

¹ Pour observe le flux et reflux de la mer à Dunkerque. Observatoire de Paris, B.5.9.

en pieds et en pouces installée contre une muraille du port servait pour les mesures. Seuls les PM de jour étaient observées par manque de commodité la nuit. Le temps était mesuré grâce à une montre et les indications du vent indiquées durant le flux et le reflux. Aucune information n'est disponible concernant la méthode mise en place pour les mesures de la hauteur et du temps.

La comparaison entre les explications de Cassini (1710c) et le préambule du Journal des Observations rédigé par Du Bocage¹ (transcrite ci-dessous) prouve que l'astronome n'a pas travesti les indications qu'il a reprises dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*.

Journal des Observations faites dans le port du Havre sur le flux et reflux de la mer a une planche attachée contre une muraille la plus a l'abry du port, graduée de pouces en pouces, et longue seulement de 10 pieds et 1/2 a cause que la mer se retire du pied de la muraille ou on n'a observé que les marées de jour n'estant possible de prendre celles de la nuit par le peu de commodité du lieu choisy pour ce. La Mer en montant porte au Sud Est, et au Nord Ouest en baissant.

3.1.2.3. Confrontations entre le mémoire et les réalités du terrain.

En 1702, les académiciens, — grâce à l'impulsion qu'ils ont su donner, mais surtout grâce au secrétaire de la Marine, le comte de Pontchartrain —, ont à leur disposition deux jeux d'observations obtenus par deux professeurs en hydrographie, l'un à Dunkerque et l'autre au Havre. Alors que Du Bocage a suivi à la lettre les recommandations écrites de l'Académie sans chercher à les améliorer, Baërt y introduisit quelques innovations :

- Lecture de la hauteur d'eau sur une tige graduée flottante au sein d'un appareil ;
- Contrôle régulier de la montre grâce au traçage d'une méridienne à proximité de l'observatoire ;
- Utilisation du même procédé que Picard et de La Hire (1679) pour déterminer l'heure des PM et BM.

3.2. Protocole modifié, nouvelles demandes et nouvelles observations.

Suite aux premières observations réalisées, un nouveau mémoire fut rédigé par Cassini (3.2.1) afin de prendre en compte diverses remarques formulées par les professeurs en hydrographie. De nouvelles mesures du niveau de la mer furent demandées par le Comte de Pontchartrain, aux professeurs d'hydrographie du Havre et de Brest en 1710. Tous deux y répondirent.

¹ Journal des Observations au Havre. Observatoire de Paris, B.5.9.

3.2.1. Détails sur le mémoire.

Une recommandation manuscrite¹, retranscrite ci-après a été retrouvée dans les archives de l'Observatoire de Paris.

Mémoire

L'Académie Royale des Sciences ayant examiné les Observations qui ont été faites sur les marées à Dunquerque par M^r Baert et au Havre par M^r du Bocage pendant plus d'une année, a trouvé des règles plus exactes que celles que l'on avoit eu jusqu'à présent pour déterminer dans ces deux ports l'heure de la Pleine Mer et les jours des grandes et des petites marées.

Comme il est important de scavoir si ces regles qui conviennent à ces deux ports peuvent s'appliquer aux autres ports de l'Océan, il seroit à souhaiter qu'il plust à Mons.^{sr} le Comte de Ponchartrain d'ordonner aux professeurs d'Hydrographie entretenus par Sa Majesté dans les ports qui sont sur l'Océan d'y Observer le flux et le reflux de la Mer pendant plusieurs mois de suite et d'envoyer tous les mois le journal de leurs observations.

1) Ils auront soin d'abord de tracer un Cadran Solaire avec le plus d'exactitude qu'ils pourront afin de regler de temps en temps leur pendules ou montre a minutes, pour avoir le temps précis de leur Observations.

2) Ils choisiront pour faire leur Observations l'endroit du Port qui est le plus a l'abry ou ils attacheront en quelque lieu fixe une perche ou planche de bois de Chene graduée en pieds et en pouces.

3) Ils se rendront au lieu de l'Observation quelque temps avant l'heure de la Pleine Mer et ils marqueront de temps en temps a mesure que la mer monte l'endroit de la planche ou La Mer se trouve et l'heure precise de chacune de ces Observations. Lorsque la Mer cessera de monter ils marqueront a quel endroit de la planche elle sera arrivée et l'heure de la Pleine Mer.

4) Ils auront ensuite soin de marquer l'heure a laquelle la Mer se trouve en descendant aux memes hauteurs ou elle avoit été en montant

5) Ils feront ces observations le plus souvent qu'il leur sera possible et principalement les jours des nouvelles et Pleines Lunes et des quadratures. Ils observeront aussy de temps en temps les Marées de douze heures en douze heures, l'heure de la basse Mer et la hauteur de la Mer pour ce temps.

6) Ils marqueront aussy dans leur journal la température de l'air, la situation des vents et leur force et ils donneront une description abregée du lieu ou ils auront fait leur Observations et a quelle distance il se trouve de l'entrée du Port.

Dans cette nouvelle notice, les points 1, 3 et 4 sont directement issus des innovations suggérées par Baërt. Les points 2, 5 et 6 complètent les instructions de l'ancien mémoire de 1701.

Ce document n'est pas signé. Il est certainement l'œuvre de Cassini : d'une part, il est rangé parmi ses papiers à l'Observatoire de Paris et, d'autre part, seul Cassini a étudié et rédigé sur les observations de Dunquerque et du Havre qui sont ici explicitement citées. Le document est probablement à dater entre 1702 et 1710 : l'année 1702 correspond à la fin des observations pour ces deux ports ; pour l'année 1710, un doute subsiste car deux lettres, l'une venant du Havre², l'autre de Brest³, confirme la réception d'un mémoire d'observation du niveau de la mer envoyé par Pontchartrain. Mais s'agissait-il du mémoire manuscrit ou de celui de 1701 ?

¹ Mémoire manuscrit retrouvé dans les archives de Cassini II à l'Observatoire de Paris, cote D-2.42.

² Champigny Lettre du 24/12/1710 au Comte de Pontchartrain. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°11.

³ Coubard. Lettre du 26/12/1710 au Comte de Pontchartrain. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°11.

3.2.2. Réactions aux demandes d'observation du niveau de la mer en 1710.

Alors qu'aucune observation du niveau de la mer n'avait été effectuée en France depuis 1702, les professeurs d'hydrographie reçurent en 1710 une lettre du secrétaire d'état de la Marine accompagnée d'un descriptif du protocole à appliquer pour réaliser de nouvelles mesures. Seuls les réponses de deux professeurs ont été retrouvées. D'autres professeurs en hydrographie furent certainement contactés comme le relate Cassini (1712b), en particulier Fortin, lequel envoya des mesures de hauteurs observées à Bordeaux et à Royan en 1711.

3.2.2.1. Au Havre avec Champigny.

Le port du Havre, au début du 18^{ème} siècle, est l'un des deux sites où des observations des marées furent réalisées et dont les données furent transmises à l'Académie Royale des Sciences. Pourtant, la lettre de Champigny envoyée au Comte de Pontchartrain le 24 décembre 1710, prouve que l'Académie Royale des Sciences, par l'intermédiaire du secrétaire d'état à la Marine, cherche toujours à obtenir de nouvelles observations du niveau de la mer :

Au havre le 24 décembre 1710.

Monseigneur

Je me donne l'honneur de vous marquer en réponse de la lettre que nous avez eu agréable de m'écrire le 17 de ce mois au sujet des observations du flux et du reflux de la mer dans les ports. Que c'est la première fois que vous m'avez envoyé des ordres sur cela, qu'apparemment ça esté au Sieur M. de Lonigny acquis vous les avez donnez, ayant appris qu'on a travaillé à ces observations depuis le 9 avril 1701 jusqu'au 26 may 1702 don il a esté sur un journal qui vous a esté envoyé le même jour le 26 may, duquel il est resté autant jay, que je seray copier pour vous le remettre si vous le souhaitez le S Dubocage mr Hyrographe en ce port en est le depositaire, nous aurons remarqué pour la vérification que nous aurons faite de ce journal un mémoire qui estoit joint à votre lettre, que l'article 9 qui est dans ce mémoire n'a pas encore esté exécuté, si vous voulez Monseigneur, il ira en rade est temps calme, avec une chaloupe pour faire l'observation qui est contenûe dans cet article, j'atens vos ordres sur le ton pour les exécuter.

J'ay l'honneur avec les plus profonds respects.

Monseigneur

Votre humble et très obéissant serviteur Champigny.

La lettre de Champigny indique que le Comte de Pontchartrain lui a écrit le 17 décembre 1710. Très certainement, le secrétaire d'état à la Marine a envoyé un pareil ordre à l'ensemble des professeurs d'hydrographie, tout comme en 1701. Champigny écrit également qu'un mémoire accompagnait la lettre reçue le 17 en précisant que l'article 9 n'était pas encore exécuté mais que, par temps calme, une chaloupe irait se disposer au milieu de la rade pour réaliser les mesures demandées. Aucun doute ne subsiste alors sur le protocole envoyé par Pontchartrain : il s'agit du mémoire rédigé par P. Gouÿe et P. de La Hire en 1701.

3.2.2.2. A Brest avec Coubard.

Tout comme Champigny pour le port du Havre, Coubard, professeur d'hydrographie de Brest envoya une réponse au secrétaire d'état de la Marine. Cette lettre diffère complètement de celle de Champigny. Elle souligne de nombreuses limites à la réalisation des observations demandées comme le montre la transcription ci-dessous :

Réflexions sur le mémoire envoyé par Monseigneur de Pontchartrain pour faire des observations sur les marées.

J'ai l'honneur de représenter à Monseigneur de Pontchartrain les différences qu'il peut y avoir à faire d'une manière exacte et suivie dans le port de Brest les observations contenues au dit mémoire.

1° Il n'y a presque pas un quay, j'entends de ceux qui sont à pic et contre lesquels on puisse ajuster perpendiculairement un poteau gradué dont le pied ne découvre les uns du moins aux grandes marées et les autres presque à toutes les marées : ainsi on n'y pourra y faire d'observations suivies des basses marées à un même poteau.

2° Les vents de N.O. et de S.O. qui ont prise aux deux extrémités du port, sont si fréquents et si violents à Brest, qu'il y a toujours quelques mouvements d'eau qui ne permettra pas souvent de faire son observation à des lignes près comme le demande le mémoire.

3° Comme le service des vaisseaux ne permet pas que personne loge sur le bord de l'eau, comment un observateur qui en sera logé à quelque distance, quand ce ne seroit que de la largeur du quay pourrait-il faire des observations suivies jour et nuit particulièrement pendant sept à huit mois de l'année à savoir depuis le mois de septembre jusques au mois de may, qu'il ne fait que pleuvoir et venter. Il y aura mêmes bien des jours au milieu de l'été qu'il ne pourra pas en plein midi se tenir sur un quay une demi heure qui est le moins de tems qui soit nécessaire pour avoir le moment de la pleine mer à savoir un quart d'heure avant et un quart d'heure après. Que seroit ce donc s'il entreprenoit d'observer plusieurs hauteurs pour en comparer l'heure à celle de pareilles hauteurs des jours précédents.

4° Si Monseigneur de Pontchartrain souhaite absolument que les dites observations se fassent au port de Brest, je ne crois pas si on veut les avoir un peu justes et suivies, qu'on puisse se dispenser 1° de choisir le quay le plus à l'abri et le plus éloigné du service ordinaire du port. 2° de choisir sur ce quay l'endroit ou il y auroit le plus de profondeur d'eau et y appliquant un poteau bien à plomb et bien gradué. 3° De construire une baraque comme pour loger un gardien tout sur le bord de l'eau et joignant le poteau. 4° de choisir une personne sage et assez intelligente, car tout le monde n'est pas propre pour cet emploi, qui habiteroit cette maison, et qui seroit uniquement chargé de faire ses observations jour et nuit sur lesquelles on auroit une inspection journalière. Il n'y a qu'un homme en cette situation qui puisse prétendre de satisfaire au mémoire : et peut être qu'en suivant ses observations, il s'en présenteroit d'une attention particulière. Par exemple, je me souviens qu'en voulant mettre un vaisseau dans la forme, et tout le monde observant la marée monter, elle monta tout de suite jusqu'à une certaine hauteur qui n'étoit pas suffisant, d'où elle commença à descendre, mais on fut fort surpris après avoir descendu pendant quelques tems d'un espace assez considérable de la voir remonter de plus belle et plus haut qu'elle n'avoit fait la première fois en sorte qu'on eut de l'eau assez pour faire entrer le vaisseau

5° Pendant qu'on prépareroit ici les choses Monseigneur de Pontchartrain aura la bonté de donner ses ordres pour une bonne pendule ou du moins pour une bonne et grosse montre à minutes ; car en effet il n'y a point d'horloge quelque bonne et quelque bien qui puisse donner la précision du tems que demande le mémoire.

6° On ne peut qu'en été et d'un tems bien calme qui est assez rare ici, observer s'il y a quelque repos de la pleine mer avant qu'elle redescende ou au contraire ; mais je ne crois pas la rade fort propre pour cela, parce que se partageant en plus d'un long bras, il y a nécessairement différens courants dont je crois mêmes que les uns vont encore quelque tems, lorsque les autres commencent à revenir. Et je ne doute pas qu'entre ces courants il ne se trouve des endroits à certaines heures ou la mer n'a aucun mouvement, mais ce repos ne concluroit rien pour celui qu'on veut observer. Je crois donc que

cette observation se feroit mieux dans le port, qui étant un lieu étroit, il faut nécessairement que l'eau aille et vienne par le même chemin.
Fait à Brest ce 26 décembre 1710.
Signé Coubard.

Coubard met 2 jours de plus que Champigny pour répondre à la demande du secrétaire d'état à la Marine. Ce délai supplémentaire est certainement dû aux réflexions exposées dans sa lettre. D'après lui, le port de Brest est inadapté pour ce genre d'observations telles que requises par les points 1, 2, 3, et 6. En premier, peu de quais seraient propices à recevoir une échelle de marée permettant de mesurer le niveau des plus BM. Le deuxième point exprime la difficulté d'observer le niveau de la mer à quelques lignes près. En 3, Coubard expose les difficultés humaines à mesurer le niveau de la mer plusieurs mois durant, sans abri pour l'observateur, et dans les conditions météorologiques difficiles de Brest. Cette dernière critique est constructive : vues les difficultés d'observer le niveau de la mer vers la rade trop tourmentée par de forts courants, mais il suggère comme alternative de les effectuer dans le port, lieu étroit, profond, creusé par une rivière côtière. Le point 4 soulève les problèmes de construction de l'observatoire nécessaire pour observer le niveau de la mer à Brest : installer d'une échelle de marée à l'abri et à un endroit profond, construire une baraque pour l'observateur, choisir "*une personne sage et assez intelligente*" destinée uniquement à observer le niveau de la mer jour et nuit. En 5, Coubard somme le secrétaire d'état à la Marine de lui fournir une montre à minutes pour minimiser les erreurs de mesures.

3.2.3. Observations faites à Brest entre 1711 et 1716.

La lettre de Coubard du 26 décembre 1710 rassemble de nombreuses conditions pour que des mesures soient réalisées à Brest. Malheureusement, aucune autre lettre n'a été trouvée. Y'a-t-il eu poursuite de la correspondance ou pas ? En tout état de cause, les observations débutèrent à Brest le 10 juin 1711 jusqu'au 30 septembre 1716. Cette série de données est connue car Lalande dans son *Traité du flux et du reflux de la mer* (1781) les a retranscrites en totalité (hormis pour l'année 1713 et le mois de septembre 1716). De plus, Cassini discute et exploite les mesures dans *l'Histoire et les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* de 1712, 1713, 1714 et 1720.

De l'ensemble des articles de Cassini (1710a ; 1710b ; 1710c ; 1712a ; 1712b ; 1713a ; 1713b ; 1713c ; 1714a ; 1714b ; 1720a ; 1720b ; 1720c), peu d'éléments ressortent en termes de recommandations pour observer les hauteurs de la mer. Nous apprenons que les mesures sont réalisées par S.^r Charles Montier de Longchamps et envoyées par S.^r Coubard, professeur d'hydrographie à Brest, au Comte de Pontchartrain (1712a). Cassini (1714b) souligne que le Comte de Pontchartrain a ordonné la poursuite des observations en 1713-1714 démontrant la qualité et le sérieux avec lequel elles étaient réalisées.

Cassini indique que, jour après jour, les heures des PM et des BM et les hauteurs sont notées ainsi que la direction et la force du vent (1712a). Le savant, nous fait "*remarquer que le Cadran au Soleil dont on s'étoit servi jusqu'à présent à Brest pour régler la Pendule, ne marquoit pas exactement le Midi, & que M. Coubard, Professeur d'Hydrographie dans ce Port, ayant tracé une ligne Méridienne avec beaucoup de soin, avoit trouvé qu'il avançoit sur*

l'heure véritable de 17 minutes qu'il faut retrancher de toutes les Observations qui nous ont été envoyées" (1714b). L'honnêteté de Coubard, dans cet aveu à Cassini confirme à nouveau la rigueur avec laquelle les mesures étaient obtenues à Brest. Un exemplaire manuscrit des données est conservé à l'Observatoire de Paris¹. Malheureusement l'année 1713 ne s'y trouve pas contrairement au mois de septembre 1716 qui n'avait pas été trouvé lors de l'impression des données dans l'ouvrage de Lalande en 1781.

Il est dommage de n'avoir retrouvé que deux lettres de Coubard, la première datant de 1710 (3.2.2.2) juste avant le lancement de la campagne de mesures et la seconde présentée ici² :

M de Bavieln

Pour M. Labbé Bignon [1662-1743]

Monseigneur

J'ai l'honneur suivant vos ordres d'envoyer à vôtre altesse sérénissime l'observation ci jointe du Phénomène qui a paru à Brest. La nuit du 17 ai 18^e du moi de mars dernier, car on ne s'est aperçu de rien ni avant le 17^e ni depuis, si ce n'est de quelques lueurs qui parurent an même endroit environ à la même heure le 24 et le 27, mais qui ne durèrent pas. Cette observation fut envoyée au conseil les premiers jours d'avril faisant partie de celles qu'on fait ici jour e nuit depuis quelques années de l'heure des marées pour l'Académie des Sciences.

Je n'aurois pas manqué, Monseigneur, d'envoyer cette observation le jour même à V.A.S., si j'avois sçu que cela lui eut fait plaisir. E me sera désormais un devoir de ne rien laisser passer de remarquable sans l'en informer sur le champ. Je prends la Liberté de me dire avec le plus profond respect et une entière soumission à vos ordres.

De votre altesse serenissime

Monseigneur

*Le très humble, très obéissant
et très soumis serviteur
Coubard
à Brest ce 22e may 1716.*

3.2.4. Autres sites d'observations.

Dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* de 1712, Cassini annonce l'existence d'observations réalisées par le professeur d'hydrographie Fortin aux ports de Bordeaux et Royan durant les mois de mai et juin 1711. Le savant ne s'étend pas davantage sur ces observations ni sur les méthodes employées pour les obtenir. Aucune de ces mesures n'a été retrouvée tout comme celles faites à Lorient en 1711 et 1712 dont Cassini (1720c) nous fait également l'écho. Pour cette dernière série, l'astronome écrit que seul le temps et la hauteur d'une PM et d'une BM par jour étaient consignés. Lalande (1781) indique qu'il a retrouvé une partie de ces observations du 1^{er} février au 30 septembre 1711.

¹ Manuscrit retrouvé dans les archives de Cassini II à l'Observatoire de Paris, cote D-2.42.

² Pochette de Séance 17/03/1716. – Archives de l'Académie des Sciences.

3.3. Protocole mis en place par Cassini II en 1716 : méthodes, réponses et observations.

Suite aux données régulièrement obtenues par l'Académie des Sciences à partir de 1711 et étudiées par Cassini, ce dernier rédigea de nouvelles règles pour observer le niveau de la mer. Le savant l'indique d'ailleurs dans son article paru en dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* de 1720 : "[...] les Observations qui avoient été faites jusqu'alors, il étoit encore nécessaire d'examiner si elles s'accorderoient à celles que l'on seroit dans la suite avec des précautions encore plus grandes que celles que l'on avor employées. Ce fut à ce sujet que l'on dressa un Memoire, qui fut envoyé par ordre de S.A.R Monseigneur le Duc d'Orleans [1674-1723] Regent du Royaume, aux Pilotes entretenus par Sa Majesté dans les Ports de l'Ocean, afin qu'ils eussent à s'y conformer". Au vu du nombre de personnes ayant été touché par cet ordre, il est étrange que si peu d'observations aient été réalisées : seules les villes de Lorient, Le Havre, Rochefort et Royan envoyèrent des mesures (Cassini, 1720b).

3.3.1. Principes du second imprimé, sur la manière d'observer les marées.

Ce "*Memoire sur la maniere d'observer les Marées dans les Ports de l'Océan*", rédigé par Cassini en 1720, n'est pas publié dans l'*Histoire ou les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*. L'exemplaire original est imprimé sur une feuille individuelle¹ :

MEMOIRE

Sur la maniere d'observer les Marées dans les Ports de l'Océan.

On sçait qu'il est utile pour la Navigation, de connoître précisément l'heure de la Haute & de la Basse Mer dans chaque Port, les jours des Grandes & Petites Marées. Les Observations du Flux & Reflux faites au Havres & à Brest, ont servi à trouver des Regles plus exactes que celles qu'on avoit employées, pour déterminer ces temps dans l'un & l'autre Port. Afin qu'on puisse en avoir de pareilles pour tous nos Ports de l'Océan, il est necessaire qu'on y observe tous les jours assidûement le Flux & le Reflux avec les précautions suivantes.

1°. On tracera un Cadran Solaire, ou une ligne Meridienne avec tout le soin possible, pour regler dessus les Pendules ou Montres à minutes dont on se servira pour avoir le temps précis des Observations.

2°. On choisira, pour observer les Marées, un endroit du Port qui soit à l'abri, & où il reste toujours de l'Eau dans la plus basse Marée. On y attachera un Poteau placé verticalement, Et on le divisera en pieds & pouces, en commençant les divisions par le bas, & les continuant jusques au haut.

3°. On observera tous les jours la Haute Mer du matin, la Basse Mer suivante, & la Haute Mer du soir, de même qu'on le pratique à Brest depuis plusieurs années. Et afin qu'il n'y ait point d'interruption dans les Observations, celui qui se sera chargé de les faire, instruira quelque Pilote intelligent, qui observera les jours où il ne pourra observer luy-même.

4°. On se rendra au lieu de l'Observation, quelque temps avant l'heure de la Haute Mer ; Et à mesure que la Mer monte, on marquera dans son Journal l'endroit du Poteau où la Mer est arrivée en montant & le temps précis de chacune de ces Observations. Lorsque la Mer cessera de monter, on marquera de même la hauteur à laquelle elle sera arrivée, & combien de temps elle a resté à cette hauteur. On aura soin ensuite de marquer l'heure à laquelle la Mer se trouve en descendant, à la même hauteur où elle étoit en montant.

5°. On déterminera la Basse Mer, d'une maniere semblable à celle dont on s'est servi pour déterminer la Haute Mers. A mesure que la Mer descend, on observera le degré du Poteau où elle se trouve en descendant. On marquera l'heure de la Basse Mer, & combien la Mer reste dans cet état. On déterminera ensuite l'heure à laquelle la Mer se trouve en montant, à la mesme hauteur où elle étoit en descendant.

6°. Pour pouvoir connoître la proportion avec laquelle les Marées montent & descendent, il sera necessaire d'observer, quelque jour où le temps sera tranquille, l'heure à laquelle la Mer sera arrivée à toutes les divisions du Poteau, tant en montant qu'en descendant. Il suffira de faire cette Observations trois ou quatre fois dans l'année, dans le temps des Nouvelles & Pleines Lunes & des Quadratures.

7°. On enverra une Description du lieu qu'on aura choisi pour faire les Observations. On y marquera à quelle distance il se trouve de l'entrée du Port. On y marquera aussi quel est le vent traversier de la rade & de l'entrée du Port, & si d'heure de la Haute Mer dans la rade est la même que dans le port, ou de combien elle en differe.

8°. On enverra tous les trois mois les Observations qu'on aura faites, ayant soin de marquer dans chacune la temperature de l'air, la situation des vents, & leur force.

9°. Voicy un modelle du Journal qu'on dressera.

Observations du Flux et du Reflux de la Mer, faites au Port de [...]. pendant le trois premiers mois de l'Année 1716.

¹ Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°07.

JANVIER

I.

<i>Haute Mer du matin.</i>	<i>Temps de chaque Observation</i>		<i>Hauteur de la Mer à chaque Observation</i>	
	<i>Heur.</i>	<i>Minut.</i>	<i>Pieds.</i>	<i>Pouces.</i>
	8	50	12	4
	9	0	12	6
	9	10	12	8
<i>Le plus haut depuis</i>	9	20	}	12
<i>jusqu'à</i>	9	39		
	9	50	12	8
	9	58	12	6
	10	8	12	4
<i>Sud-est, vent frais, temps serein</i>				
<i>Basse Mer du soir.</i>	2	50	5	5
	3	0	5	2
<i>Le plus bas depuis</i>	3	9	}	5
<i>jusqu'à</i>	3	19		
	3	30	5	2
	3	40	5	5
<i>Sud-ouïest, petit vent, temps couvert.</i>				
<i>Haute Mer du soir.</i>	<i>Temps de chaque Observation</i>		<i>Hauteur de la Mer à chaque Observation</i>	
	<i>Heur.</i>	<i>Minut.</i>	<i>Pieds.</i>	<i>Pouces.</i>
	9	20	13	0
	9	29	13	3
	9	40	13	6
<i>Le plus haut depuis</i>	9	52	}	13
<i>jusqu'à</i>	10	10		
	10	20	13	6
	10	30	13	3
	10	40	13	0
<i>Nord-est, vent forcé, pluye.</i>				

II.

Ce mémoire ne comporte aucune date mise à part celle figurant dans le tableau devant servir de modèle pour noter les observations. Cassini (1720b) indique que ce mémoire "fut envoyé par ordre de S.A.R. Monseigneur le Duc d'Orléans Regent du Royaume". Or, la régence commença en septembre 1715 pour s'achever au couronnement de Louis XV le 25

octobre 1722. Au vu des réponses reçues à partir de mai 1716 (3.3.2), il est très probable que le mémoire date du 4^{ème} trimestre 1715 ou du 1^{er} trimestre 1716. L'instruction reprend des éléments du mémoire manuscrit 1710 *ante quem* de Cassini (3.2.1), notamment les articles 1, 2 (respectivement n°1 et n°2 pour celui de 1701), 3 et 4 (n°5 idem) 5 à 6 (respectivement du n°6 et n°7 idem). La comparaison de la version imprimée avec le mémoire manuscrit prouve que l'expérience acquise avec les précédentes observations — notamment celles faites à Brest — est palpable. Par exemple, pour le point numéro 1 de l'imprimé de 1716, le savant ajoute le traçage d'une ligne méridienne permettant un meilleur réglage de la montre. Certainement se souvient-il de la mésaventure arrivée à Brest entre 1711 et 1714. L'article n°2 détermine le sens des graduations de l'échelle graduée du bas vers le haut pour faciliter l'étude des mesures. Les points 4 et 5 précisent comment relever les heures des PM et BM suivant la méthode de de La Hire (1729a).

Les véritables innovations de ce mémoire reposent sur :

- l'article 2 qui explique comment positionner les graduations du poteau depuis le bas jusqu'en haut et la nécessité de l'installer dans un endroit qui n'assèche jamais ;
- l'article 3 qui est fondateur pour le suivi des observations. : en effet, pour éviter l'interruption de mesures, Cassini propose que les mesures soient réalisées par plusieurs personnes plutôt qu'une seule ;
- les articles 8 et 9 qui innovent dans la procédure d'enregistrement des données en proposant un tableau type, en indiquant quand envoyer les registres à l'Académie et demandant d'ajouter en plus des conditions du vent et la température de l'air.
- enfin, avec ce modèle de journal de marée, Cassini propose sans doute, un des premiers modèles de présentation standardisé des observations bien avant ceux élaborés dans les années 1770, par le chevalier de Borda pour les distances lunaires¹.

3.3.2. Réactions aux demandes du mémoire et observations obtenues.

Le mémoire, comme l'indique Cassini II (1720a) suscita de nombreuses réponses. Malheureusement, le savant ne s'étend pas davantage sur le sujet. Quelques lettres, retrouvées aux Archives Nationales permettent de se faire une opinion sur les réponses reçues.

3.3.2.1. Réponses reçues par M. de Luzancay à Nantes.

M. de Luzancay [1654-1719], est en 1716, le destinataire de trois lettres où les auteurs réagissent à la demande d'observations du niveau de la mer. Nicolas-Philippe Carré, seigneur de Lusanzay, commissaire de la Marine à Brest en 1698 et commissaire de la Marine et des galères à Nantes le 30 mars 1705² semble servir d'intermédiaire entre les possibles

¹ Boistel G. (2001). Thèse, Partie III, chapitre 1, p. 359 et suivantes.

² URL : http://lusancay.chez-alice.fr/genealogie_des_carre.html (consulté le 5 octobre 2008).

observateurs et les ordonnateurs des mesures d'après la lecture des missives reproduites ci-après :

¹Marine de Ponant

à Nantes le 21 may 1716

M. de Luzancay

J'ai reçu avec la lettre que le Conseil m'a fait l'honneur de m'écrire le 9 de ce mois un Imprimé du mémoire sur la manière d'observer les marées dans les ports de l'océan.

Il m'ordonne de faire exécuter ce qui y est contenu et sans dépense. Sur quoi j'aurais celui de lui demander ce que j'écrivais à M. de Pontchartrain lorsqu'il m'envoya le premier ; que nous n'avions personne ici qui voulu se charger ainsi de ce travail et peut être qui en soit capable et qui en voulu faire la dépense, que les Pères Jésuites avaient une pension de l'état pour enseigner ici l'hydrographie qui peut être auraient pu le faire ce qu'il eût agréable de leur ordonner, mais en même temps que Nantes est à neuf lieues de la mer, que ce n'était peut être pas là qu'il serait mieux d'y faire ces observations. Aujourd'hui les états ont ôté la Pension des Jésuites aux Jésuites et il y a bien ici un hydrographe habile qui enseigne cette science à ceux qui veulent aller à son école. Mais comme il est peu riche et qu'il n'est gage du Roy n'y de personne, cela le lui conuiens point de faire cette dépense n'y de se détourner de son travail.

Il y a trois endroits au bas de la rivière et à l'entrée de la mer, c'est-à-dire trois ports ou ces observations seraient beaucoup mieux à faire. Bourneuf, Paimbœuf et le Croisic. Il y a dans ce dernier port un hydrographe qui a des lettres du Roy et est entretenu par la ville. Celui ci fera fort bien ce travail et je vais lui envoyer le mémoire et le charger de ce soin dont je crois qu'il s'acquittera bien, mais quant aux deux autres endroits surtout à Paimbœuf ou ces observations paraissent plus nécessaires, il n'y a aucun pilote que je sache ni personne qui en soit capable et je n'ose croire à Bourneuf trouver quelqu'un.

Mais il ne paraît pas qu'on puisse trouver personne qui veuille faire la dépense surtout de la pendule ou la montre et qui en ai dans ces quartiers là. J'ose toujours prier le conseil d'avoir agréable de m'envoyer plusieurs imprimés pour distribuer dans ces trois endroits.

J'ai parlé au Sieur Lenry qui est hydrographe dont j'ai fait mention ci-dessus qui enseigne à Nantes. Il s'offre d'aller tous les mois à Paimbeuf faire dans les temps des observations nécessaires, mais il demande quelques gratifications où que si on veut le faire payer comme celui du Croisic, qu'il donnera tout ses soins pour exécuter le mémoire. Il en est très capable. Je n'en ai point parlé aux jésuites puisqu'ils n'ont plus leur pension, cependant le jésuite qui était tenu pour enseigner est toujours ici et paraît être un habile homme.

Manay.

²M. de Lusançay 21 May.

Il est impossible d'exécuter à Nantes sans dépense le mémoire de l'académie sur la manière d'observer les marées dans les ports parce que cette ville est à 9 lieues de la Mer, on peut les faire commodement à Bourneuf, Paimbeuf et le Croisic, et il y a en ce derniers pour un M. d'hydrographie, auquel il adressera le mémoire de l'académie il croit nécessaire d'envoyer une pendule et une montre à Nantes.

³Marine de Ponant

à Nantes le 16 juin 1716

M. de Luzancay

J'ai reçu les lettre que le conseil m'a fait l'honneur de m'écrire le dix de ce mois avec des imprimer sur la manière d'observer le flux et reflux de la mer afin de les envoyer à Bourneuf et au Croisic ce que j'ai exécuté et j'attendrais ses ordres au sujet de la pendule et de la montre nécessaire pour faire ces observations et les frais qu'ils auront a faire sur le sujet.

¹ Manay Lettre du 21/05/1716 à M. de Luzancay. Archives Nationales, B3/236, fol n°404-405.

² Anonyme. Lettre du 21/05/1716 à M. de Lusançay. Archives Nationales, B¹/4, fol n°371.

³ Anonyme. Lettre du 16/06/1716 à M. de Luzancay. Archives Nationales, B3/236, fol n°420.

L'étude des lettres montre la maigre motivation des possibles observateurs. Pour s'affranchir du mémoire de Cassini, ces derniers mettent en avant les moyens financiers inexistantes pour réaliser de telles mesures ainsi que l'impossibilité totale d'obtenir des montres à minutes. Les lettres expliquent que de telles mesures sont irréalisables à Nantes, mais possibles aux sites de Bourgneuf, Le Croisic et Paimbœuf. Ce dernier port se situe le long de l'estuaire de la Loire tandis que les deux premières villes se trouvent sur la façade Atlantique. Manay donnent des noms de personnes pouvant réaliser les mesures dans les trois ports. Il dit également avoir déjà répondu par la négative lors de la première demande d'observations en 1701. Aucune observation n'a été retrouvée pour les 4 ports. Il est probable qu'aucune mesure n'ait eu lieu, suite à ce mémoire, à moins que l'état de santé et le décès en 1719 du localement puissant Nicolas-Philippe de Luzancay n'aient conduit à un abandon précoce des travaux.

3.3.2.2. Réaction de M. Champigny au Havre.

Champigny, tout comme en 1710 (3.2.2.1) répond favorablement à cette nouvelle demande de mesures du niveau de la mer comme nous l'apprend une brève lettre retrouvée¹, transcrite entièrement :

Le Havre 27 May.

Il sera exécuter le mémoire qui luy a esté envoyé sur la manière d'observer le flux et reflux de la Mer, je envoye les apostils qu'il a mis à ce mémoire et demande deux pendules ou deux montres à minutes, dont on a besoin pour faire ces observations avec la justesse qui est recommandée.

M de Champigny

Quelques observations furent réalisées au Havre d'après Cassini (1720b) sans en dire davantage. Les mesures réalisées à cette période, une nouvelle fois, n'ont pas été retrouvées.

3.3.2.3. Observations réalisées à Lorient

Les mesures faites à Lorient furent l'objet d'un article écrit par Cassini paru en 1720 dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*. Cette série est très intéressante par sa longueur : 3 années entre 1716 et 1719 ; par les mesures : heures et hauteurs des PM et BM, température de l'air, conditions du vent ; par le nombre des observations : au minimum une PM et une BM étaient mesurées par jour mais le plus souvent trois épisodes étaient notés pour chaque journée. L'astronome, donne également des explications sur l'observatoire : "[...] on avoit placé à l'embouchure du Port de l'Orient, un Poteau destiné pour observer la hauteur des Marées, dans un endroit fort à couvert, distant de la Rade de Penmaneek de 150 toises [≈ 292m en prenant comme toise, celle de l'Académie]". Les données se trouvent à l'Observatoire de Paris (voir annexe A pour plus de précision).

¹ Anonyme. Lettre du 27/05/1716 à M. de Champigny du Havre. Archives Nationales, B¹/4, fol n°373.

3.3.2.4. Autres observatoires.

Les recherches menées n'ont pas permis de retrouver d'autres observations réalisées durant cette période. Cassini (1720b) nous apprend pourtant que quelques mesures, peu suivies ont été entreprises aux ports de Rochefort et Royan.

3.3.3. Bilan de cette seconde demande d'observation.

Tout comme la première campagne de mesures du niveau de la mer en 1701, les résultats sont très décevants. Les lettres envoyées de Nantes prouvent que le manque de rétribution doublé d'un manque matériel (montre à minutes) ne favorise pas le développement d'observations du niveau de la mer, malgré la demande émanant directement du Régent en personne. Seul le port de Lorient répond positivement à la requête en suivant le plus fidèlement possible le protocole rédigé par Cassini.

3.4. 1720-1771 : Désintérêt des savants à observer le niveau marin ?

Avec l'arrêt des mesures à Lorient en 1719, plus aucun site en France n'observe le niveau de la mer. Durant la période 1720-1772 couvrant plus d'un demi-siècle, aucune nouvelle recommandation ne fut présentée par l'Académie Royale des Sciences. Pour autant, étudier la marée occupait les savants car durant ce laps de temps, ils proposèrent, en 1740, que le prix de l'Académie soit décerné *sur la cause Physique du flux et reflux de la mer*¹. Lalande, dans son *Traité d'Astronomie* (1781) écrit que trois savants : Leonhard Euler [1707-1783], Daniel Bernoulli [1700-1782], Colin MacLaurin [1698-1746] se partagèrent la récompense.

3.4.1. Observations ponctuelles et personnelles du niveau de la mer.

Alors que les recherches sur le flux et le reflux de la mer stagnent dans les années 1720-1730 (aucun article paru, aucune demande générale pour réaliser des mesures) des lettres provenant des ports de Saint-Malo et du Havre indiquent pourtant que certaines mesures étaient commanditées et que, lors d'événements particuliers, des observations étaient envoyées aux personnes compétentes.

¹ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1740, tome 59, séance du mercredi 27 avril 1740.

3.4.1.1. Nouvelles de Saint Malo en 1729.

Trois documents, dont deux lettres écrites du port de Saint Malo semblent indiquer que l'intérêt d'observer le niveau marin en 1729 n'était pas totalement en sommeil. La première de ces lettres, œuvre de deux professeurs d'hydrographie, retranscrite ci-après expose le meilleur site possible pour installer une échelle de marée permettant d'observer des hauteurs de PM et BM¹.

Ayant examiné les tables du flux et reflux de la mer qui m'ont été mises aux mains par Monsieur de Fossingant Commissaire Général de la Marine.

On estime qu'il serait nécessaire pour ces observations du plein et bas de la mer de faire marquer en pieds, pouces contre le mur d'enceinte du fort de la Conchée, la mer ne quittant point le pied de ce fort, et c'est le seul endroit dans les environs de St Malo, que la mer n'abandonne point et quand aux pleines mers on pourra l'observer dans les fosses du château de cette ville, ou la mer vient, qui est un lieu exempt des mouvements d'ondulation, mais elle ni vient point dans les mortes-eaux. Le canonnier, gardien du fort de la Conchée pourra en faire les observations, mais le plus sur serait d'y envoyer un bon pilote.

A St Malo le 12 septembre 1729. Vallonf

A la lecture de la lettre précédente, un commanditaire semble être à l'origine d'un projet d'observations à faire à Saint Malo. La seconde lettre², postérieure de deux jours à la précédente, écrite par Zublet et de la Fossingant (fosse-Hingant) s'adresse au probable commanditaire, personnage très certainement haut placé car le terme *Monseigneur* est employé. Malheureusement, nous ne savons pas qui est le destinataire de cette lettre, laquelle est accompagnée d'un mémoire³ de Griffon, professeur d'hydrographie. Les deux documents sont repris ici :

*Marine de Ponant
Monseigneur,*

A St Malo le 14 septembre 1729

J'ai l'honneur de vous envoyer ci-joint les mémoires que m'on remis les Sieurs Griffon et Vallon, maîtres d'Hydrographie à St Malo ont fait sur les tables que je leurs ai donné suivant vos ordres : il est très difficile de faire en se Port des observations portant sur le flux et le reflux de la mer ; les vents formés aux grandes marées font monter la mer extraordinairement.

Plusieurs autres maîtres ne m'en ont point donné sur ce qu'ils ne pourraient travailler à ces observations sans avoir un bateau entretenue pour les faire à toutes les hautes et basses marées pour y donner toute son attention ; ils se sont tous expliqués dans les mêmes sentiments Zublet et la fossinguant.

¹ Vallonf. Lettre du 12/09/1729 à Fossingant. Archives Nationales, B/3/329, fol n°30.

² Zublet et la Fossiguant. Lettre du 14/09/1729. Archives Nationales, B/3/329, fol n°34

³ Mémoire de Griffon. Archives Nationales, B/3/329, fol n°26.

Mémoire de Griffon professeur d'hydrographie juré et entretenu par la communauté et cette ville de St Malo, au sujet d'une exemplaire contenant une table du flux et reflux de la mer par laquelle l'auteur souhaite que l'on observe exactement plusieurs choses mais particulièrement l'heure à laquelle arrivera le milieu de la haute mer dans ce havre, est que l'on mesure exactement le nombre de pieds que les marées monteront.

Le professeur prend la liberté de démontrer à la cour que le havre de St Malo assèche à toutes les basses mers ; outre cela, qu'il est très ouvert et exposé à tous les vents de la mer qui sont sud-ouest, ouest, nord-ouest et nord lesquels y causent un mouvement d'ondulation très considérable, ce qui, certainement, empêchera que l'on puisse déterminer au juste l'heure à laquelle arrivera le milieu de la haute marée ; donc les observations ne peuvent être que très douteuses, supposé que l'hauteur est exemplaire sont quelles se fassent dans la rade : ainsi selon ce préjugé et afin de lui donner satisfaction sur de demander on a cru qu'il conviendra mieux de faire les observations dans les fosses du château de cette ville ou la mer y est dans un lieu clôt exempt de ces mouvements d'ondulation dont il est parlé ci-dessus ; ce qui donne lieu d'espérer que l'on pourra réussir. De plus cet endroit doit être préféré à tout autre, non seulement à cause de sa commodité, mais aussi à cause du peu de dépense que l'on sera obligé de faire, laquelle consistera que dans une échelle pour descendre dans le fossé et dans une règle de bois, faire graver de 10 pieds [$\approx 3,25\text{m}$] en carré ; lequel servira pour se transporter dans les endroits les plus commodes par le secours d'une à deux personnes que l'on payera sur le champ à proportion du temps qu'elles auront employées. L'observateur ne parle point d'autres menus frais qu'il pourra faire et desquels il fournira un mémoire lorsque le travail sera fini.

Le professeur d'hydrographie en même temps supplie qu'il lui soit permis au représentant à la cour que les marées dans ce havre de St Malo ne sont pas des plus régulières, qu'elles montent dans des endroits, lorsqu'elle se retire dans d'autres ; que très souvent pour certains jours elle avancent et que dans d'autres elle retarde. C'est ce qui est arrivé les 23 et 24 du présent mois de juillet aux quels jours à savoir le 23^e, on remarqua que le plein d'eau se fit avant quatre heures du soir et que selon les règles il ne devait se faire qu'à 4 heures 30 minutes, le vent ce jour était au Sud-Est. Mais le lendemain 24^e les vents étant venu à l'Ouest, la mer monta environ 8 pieds à plomb plus haut que le jour précédent et le plein d'eau s'y fit près de deux heures plus tard.

Cette observation engage le remontant à faire connaître à la cour que dans ses navigations il a remarqué que cette irrégularité se rencontre dans plusieurs autres havres placés sur l'Océan, mais particulièrement dans ceux des îles et terre-neuve, du cap Breton et la côte du cap sable et la baie française dans l'Acadie, ou il est impossible de juger qu'elles en sont les marées sur lesquelles les vents dominant beaucoup et qui souvent y causent des marées incompréhensibles. C'est ce qui est remarqué dans la baie de ce port de plaisance.

Ce qui vient d'être dit n'a été représenté que pour prier que l'hauteur de l'eau pleine de vouloir bien donner de nouvelles instructions à celui qui ne cherche que l'honneur de lui être utile en quelque chose et quoi que le havre de St Malo ne soit pas fermé comme sont ceux de Brest et de La Rochelle, dans lesquels on peut observer avec beaucoup de facilité ; les difficultés qui pourront se rencontrer dans celui-ci ne seront jamais un obstacle qui puisse empêcher le remontant d'apporter tous ses soins , et de donner toute son application pour faire des observations [...].

Alors que pour la première lettre, il ne semblait pas difficile d'effectuer des observations à Saint-Malo, la seconde missive réserve une réponse beaucoup plus sombre. Des arguments dépeignent le site avec assèchement de l'échelle de marée pour les BM et des vents qui donnent une forte houle rendant difficile la détermination précise de l'heure de la PM. L'auteur lance une piste pour obtenir des données dans ce port, suggérant le creusement d'une fosse pour mesurer les hauteurs des BM. Cette idée avec une demande voilée de financement d'un ou deux observateurs, n'est pas anodine. L'auteur, supposant qu'aucun moyen ne lui sera proposé pour réaliser cette campagne de mesures, met en avant des considérations pécuniaires pour pouvoir se justifier a posteriori.

3.4.1.2. Événements notables au Havre en 1732.

Hasuder, dans sa lettre du 11 février 1732, reproduite ci-dessous¹, fait état d'une situation extraordinaire pour les hauteurs des PM au port du Havre. Ce document est utile pour deux raisons : d'une part, les niveaux de la mer étaient observés chaque jour, car sinon il n'y aurait pas eu constat de niveaux de PM supérieurs à la normale. Deuxièmement, la référence verticale des hauteurs du niveau de la mer est prise par rapport à la base de l'entrée du bassin, indication qui confirme l'hypothèse que nous utiliserons lors du rattachement des mesures faites à Brest entre 1711 et 1792 (cf. 6.2.3.2 et 7.1).

Mémoire sur les observations que j'ay faites au havre de grace dans le mois de février 1732 au sujet des marées.

Le 7 de février 1732 à 9 heures et demi du matin, la mer a été pleine, elle est montée 16 pieds au dessus de l'antrée du bassin, ou on n'auroit pas cru que le mesme jour elle eut monté plus de 14 pieds parce que le vent estoit assez fort du coté du Sud Est, et du Sud Sud Est que ces vent la ne contribuent pas à faire monter la mer dans ce port. Vers les 2 heures après midi le vent a calmé.

Comme la mer à monté aujourduy [aujourd'hui] plus haut qu'a son ordinaire par un vent qui devoit sy oposer plus que d'y contribuer, les marins de ce port on cru que dans le courant du reste de la journée, et mesme sans tarder on sentiroit issy un vent très violent qui viendroit de la partie orientale du monde, qui selon ces Mr auroit poussé la mer devant luy, et l'auroit obligée de monter fort haut avant de se faire sentir issy, et qui l'empchera de decendre de mesme.

[illisible]

Le 9 à 11 heures 6 minutes du matin la mer a été plein, elle est montée 17 pieds 10 pouces [≈ 5,80m] à l'antrée du bassin, le soir à 5 heures 33' la mer a été basse, elle a baissée environ 5 pouces [≈ 0,14m] de moins que hier, elle a monté aujourduy 3 pieds [≈ 0,97m] de plus quelle ne monte a son ordinaire dance port au temps des grandes marées du mois de février. Depuis le 7 du courant à 3 heures apres midi le temps a continuelement été calme, aiant toujours gelée bien fort. on a eu de temps en temps des nuages pedant le 7 et le 8 du mois qui ont donnée quelques peu de neige

Le 10 a 11 heure 55 minutes la mer a été haute elle a monté 16 pieds et demi [≈ 5,36m] a l'antrée du bassin. Le temps a toujours continuées d'être calme depuis le 7 du mois, le 9 et le 10 le temp a été fort clair pendant le jour et pendant la nuit

Les anciens du pais qui font usage des marée disent n'avoit jamais vu monter la mer si haut par un temps calme, pas mesme au temps des equinoxes.

Pendent ces 4 iours la mer a monté plus qua son ordinaire, le 9 elle a montée 3 pied [≈ 0,97m] de plus qu'aux grandes marées de ce mois issy.

Dans les grandes marées ordinaires, la pente depuis le bassin iusque a la mer, lorsque l'eau est tout a fait basses est d'environ 7 pieds [≈ 2,27m] elle a été de 10 le 9 de ce mois.

La partie obscure de la lune pendent ces 4 iours illisible la nuit plus distinctement qu'a son ordinaire au mesme age on la veroit assez lumineuse.

au Havre, le 11 février 1732

C Hasuder

Les destinataires des lettres écrites à Saint-Malo et au Havre ne sont pas connus. En revanche, à partir de la cote des documents B/3/3 et en considérant le principe de classification des Archives Nationales, les destinataires possibles sont en nombre réduit. Ici, il s'agit de lettres reçues par le service général des bureaux du Ponant (façade Atlantique, Manche et mer du Nord) et du Levant (façade méditerranéenne). Dès lors, tout laisse à penser que les lettres ne s'adressaient pas à des académiciens mais plutôt à la hiérarchie de ceux qui les écrivaient.

¹ Hasuder C. Lettre du 11/02/1732 à Cassini II. Observatoire de Paris, B.4.1.

3.4.2. Singularités pour trois zones du royaume entre 1750 et 1772.

Malgré la désaffection des académiciens à initier des observations, trois sites furent le théâtre de mesures du niveau de la mer : Marseille, la côte Nord de France et Fouras. Pour la cité phocéenne, un savant est à l'origine des observations tandis que pour les deux autres, des considérations techniques sont plutôt à l'origine des mesures.

3.4.2.1. Premières observations en Méditerranée.

A la fin de l'année 1753, et durant les 3 premiers mois de l'année 1754, les premières mesures du niveau marin en Méditerranée sont entreprises, à Marseille, par le père Esprit Pézenas [1692-1776], professeur d'hydrographie de 1728 à 1749 et directeur de l'Observatoire astronomique de 1749 à 1763¹. Pézenas est l'auteur de nombreux traités nautiques. Il est en outre correspondant de l'Académie Royale des Sciences et associé aux académies de Lyon, Marseille et Montpellier. Pézenas énonce en 1755, les *observations des différentes hauteurs de l'eau de la Mer dans Port de Marseille*. Cette étude est complètement indépendante d'une quelconque intervention des académiciens parisiens. L'abbé indique dans son mémoire ses motivations à observer le niveau marin :

Mais le flux & le reflux se font-ils sentir sur nos côtes ? Notre Mer éprouve-telle comme l'Océan, des élévations & des dépression, sinon aussi considérables, du moins aussi régulières ? Telle est la question qu'on nous a faites plus d'une fois ; question que nous souhaitons depuis long-temps de pouvoir résoudre par de bonnes Observations, & sur laquelle nous n'avions encore que des conjectures assés plausibles.

Dans son article, Pézenas indique, les principes utilisés pour observer le niveau marin. Des extraits sont retranscrits sur ci-dessous :

La partie Septentrionale du Port de Marseille est bordée par un Quai dont la surface est ordinairement élevée d'environ deux piés & demis au dessus de celle de l'Eau. [...]
[...] On conçoit que pour faire les Observations dont il s'agit, il nous a fallu avoir recours à une personne qui demeurât sur le Port, & qui eût tout à la fois assés de zèle pour se charger de la commission, & assés d'intelligence pour s'en bien acquitter. Nous avons trouvé tout cela dans le Sieur Roche artiste de cette Ville : Il a eu la complaisance d'examiner assidûment pendant quelques mois, & le plus souvent deux fois par jour, de combien l'Eau de la Mer se trouvoit abbaissée au dessous d'un point fixe pris sur le Quai du Port [très probablement la surface du quai exposé précédemment] ; & c'est d'après les mesures exactes qu'il en a prises [...]
[...] L'Abbaissement de l'Eau du Port au dessous du point fixe, dont on a parlé, a été mesuré 43 fois dans le mois de décembre de l'année 1753. L'année suivante, il a été mesuré 54 fois dans le mois de Janvier, 32 fois dans celui de Février, & 24 fois dans le mois de Mars.

¹ Boistel G. (2005). L'observatoire des jésuites de Marseille, sous la direction du père Esprit Pezenas (1728-1763), in G. Boistel (dir.), Observatoire et patrimoine astronomique français. Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences n°54, Lyon, SFHST/ENS éditions, pp.27-45.

Le savant délégua la réalisation des observations à une personne habitant près du port. Il donne aussi quelques précisions sur le repère fixe utilisé pour mesurer la hauteur d'eau. Finalement, Pézenas ne répond pas à ses interrogations, conscient de la limite des mesures à sa disposition :

Nous n'oserions entreprendre de résoudre la question proposée, par les seules Observations qui viennent d'être rapportées. On y trouve à la vérité plusieurs raisons de croire que le flux & le reflux se font sentir sur nos côtes, & jusques dans notre Port. Mais ces mêmes Observations nous fournissent aussi quelques indices du contraire. C'en est assés pour nous faire suspendre notre Jugement, jusqu'à ce que nous ayons amassé des preuves plus décisives. Elles ne seront telles, ces preuves, quel lorsque le nombre des Observations qui tendent à établir le flux & le reflux, sera incomparablement supérieur à celui des Observations qui semblent contrarier les premières.

Quelques hauteurs ainsi que des moyennes se trouvent dans le mémoire. Malgré des recherches à l'Observatoire de Marseille et l'appui obtenu de James Caplan, les données n'ont pas été retrouvées.

3.4.2.2. de Fourcroy de Ramecourt, un ingénieur aux idées révolutionnaires.

A chaque fois qu'un événement naturel particulier était observé, la description du phénomène était envoyée à l'Académie Royale. De Fourcroy de Ramecourt, Brigadier des Armées du Roi et ingénieur en Chef à Calais envoya en janvier 1767, une lettre à Duhamel du Monceau [1700-1782], alors sous-directeur de l'Académie Royale des Sciences pour porter à sa connaissance des informations sur le raz de marée observé à Dunkerque et Calais¹. Cette lettre est reprise dans une note² retranscrite entièrement sur la page suivante :

¹ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1767, tome 86, séance du samedi 24 janvier 1767.

² Pochette de Séance 24/01/1767. – Archives de l'Académie des Sciences.

Le bruit s'étoit repandu a Paris que le 2 janvier de cette année (1767) la mer s'étoit élevée à Dunkerque d'une hauteur extraordinaire, et qu'elle avoit fait des desordres considerables. Voici l'extrait d'une lettre adressée à M. Duhamel du Monceau par M. Fourcroy Colonel dans le Corps du Génie et ingénieur en chef à Calais par laquelle on voit qu'il y a heureusement beaucoup à diminuer de la nouvelle qui s'étoit repandüe dans Paris.

La marée du 2 janvier a été à Calais d'un hauteur extraordinaire, le Baromètre qui s'étoit soutenu les derniers jours de Decembre par un brouillard asse repais et un temps calme a 28 pouces 9 lignes etoit tombé le 1^{er} janvier à 28 pouces et le 2 au matin a 27 pouces 7 lignes, le vent etant au N.N.O. très fort, mais sans avoir absolument le caractère de tempête ; sa violence n'étoit point excessive, sans inégalité ni grands tourbillons, le flot calculé devoit être complet à Calais vers 1 heure 11 minutes du soir, il devança ce moment d'environ 20 minutes et la mer s'éleva de 39 pouces plus haut que les marées réduites des vives eaux. Cette hauteur de la mer est si rare a Calais, qu'à l'exception d'une marée en 1736 que M. Fourcroy juge avoir été plus forte, on ne se rappelle pas de l'avoir vu aussi élevée que le 2 janvier. Il y a eu 133 travées des jettées en bois de renversées mais elles etoient très vieilles et en mauvais état.

M. De Fienne homme très exact a écrit a M. Fourcroy de Gravelines ou il est ingénieur en chef que la nuit du 21 au 22 La marée avoir déjà été plus élevée qu'elle ne l'est ordinairement dans les grandes vives eaux, et qu'à celle de midi l'eau avoit monté de 25 pouces au dessus du point de reduction des grandes vives eaux ; la mer a paru plein dès midi et demi, mais M. De Fienne a vu avec ettonnement que depuis ce moment jusqu'à 1 heure 30 minutes, la mer a monté et descendu d'abord deux fois de suite au même point par des vibrations de 18 pouces de hauteur et qu'à troisieme vibration vers 1 heure 30 minutes, elle est montée de quelques pouces plus haut qu'aux deux premieres et avoit alors atteint sa plus grand hauteur. M. De Fienne faisoit ses observations dans un endroit ou le vent et la vague ne pouvoient influencer immédiatement sur ses observations.

M. Poisson ingénieur en chef à Dunkerque a informé M. Fourcroy que cette marée avoit monté 52 pouces au dessus du repaire des vives eaux réduites : quelques gens pretendent avoir entendu ce jour là un coup de tonnerre a 7 heures du matin ; au reste la marée n'a fait aucun desordre dans ce port. En joignant ces rapports avec ce que Dit la Gasette d'Amsterdam. M. Fourcroy présume que cette marée extraordinaire doit avoir été produite par quelque cause physique dont le foyer etoit au Nord de Calais pris qu'elle a été de plus en plus élevée au N. E. de cette ville.

a Calais le 20 janvier 1767

Quelques mois plus tard, un mémoire de Fourcroy de Ramecourt fut présenté aux académiciens¹. Ce mémoire : *Observations sur les marées, à la côte de Flandre ou recherches sur la hauteur convenable aux Dignes, Quais, Ecluses, Bâtardeaux, & autres Ouvrages contre la Mer* fut publié 8 ans plus tard, dans le recueil des *Savants étrangers de l'Académie Royale des Sciences* (1775). Cet article est fondateur sur plusieurs plans :

-1. C'est la première personne qui utilise les mesures du niveau de la mer pour des travaux d'ingénierie. En effet, l'épisode du 2 janvier 1767 est probablement à l'origine de cet écrit. De Fourcroy de Ramecourt cherche à partir des hauteurs de PM extraordinaires, à déterminer les contraintes maximales que peuvent subir les ouvrages d'arts maritimes.

-2. Pour avoir les plus importantes PM extraordinaires, l'ingénieur n'hésita pas à rechercher d'"anciennes" observations. L'extrait suivant est intéressant à ce titre car de Fourcroy de Ramecourt nous apprend que des journaux de marée existent depuis 100 ans !

¹ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1767, tome 86, séance du mercredi 27 mai 1767.

Les officiers du Génie, dès le siècle dernier, & jusqu'à présent, ont fait prendre tous les jours la hauteur de la pleine-Mer, aux Ecluses de toutes les Places maritimes ; mais je ne crois pas qu'il s'en soit conservé aucun Mémoire de douze ans d'ancienneté. M. le Prince de Croy, dont l'ACADEMIE connoît le goût et le zèle pour les Sciences, m'a fait l'honneur de me dire avoir vérifié, par d'anciens Journaux des Marées, pendant qu'il commandoit à Dunkerque, que, depuis cent ans, la Mer n'y avoit pas varié d'un pouce, dans la hauteur de ses mouvements périodiques ordinaires, & atteignoit toujours le niveau des mêmes points, lors de son plein : j'ai fait tous mes efforts, sans pouvoir retrouver vestige de ces Journaux : le desir que j'avois de les consulter, s'est donc borné à rassembler quelques suites d'Observations modernes : j'ai tâché de sauver celles-ci du naufrage des temps ; en les faisant enregistrer, & le recommandant de mon mieux à ceux qui nous succéderont, pour les continuer.

-3. de Fourcroy de Ramecourt, est la première personne à se soucier de la continuité mais surtout de la préservation des observations du niveau de la mer comme en témoigne l'extrait précédent. Jusqu'alors, aucun savant n'avait cherché à transmettre les mesures du niveau de la mer, acquises difficilement, comme le démontre les faibles séries de données obtenues par l'Académie, malgré deux demandes appuyées par d'importants personnages du royaume en 1701 et 1716.

-4. En plus de se s'inquiéter, de sauvegarder et transmettre les observations en cours, l'ingénieur porte une attention toute particulière sur le rattachement des mesures de hauteur d'eau à une référence verticale. Il cite notamment le travail de Baërt (cf. 3.1.2.1) en indiquant que *"le point de fixe dont il se servoit, pour y attacher la pleine-Mer, ne se trouve lié avec aucun point actuellement connu dans cette ville"*. Soucieux de la pérennité des repères verticaux des échelles de marées utilisées, il écrit :

J'ai remarqué que les points fixes, auxquels se rapportent toutes ces différentes mesures de la pleine-Mer, sont exposés, avec le temps, à des mutations, qui peuvent faire perdre la suite & la liaison des Observations futures avec les nôtres : nous sommes convenus en conséquence, MM. Poisson, de Fiennes, & moi, d'attacher soigneusement les points fixes dont nous servons aujourd'hui, à d'autres points, probablement les plus invariables qui se trouvent dans les Villes, tels que le seuil, ou les bases des colonnes des principales Eglises ; en sorte que, si l'on veut continuer ces Journaux, on aura, dans la suite, un grand nombre d'Observations correspondantes, dans ces trois villes [Calais, Gravelines, Dunkerque], dont les savans pourront nous avoir obligation.

L'ingénieur s'attache à ce que les observations puissent être reprises à n'importe quel moment grâce à des références verticales remarquables comme celles offertes par des bâtiments par exemple. Cet intérêt de de Fourcroy de Ramecourt sur le rattachement en hauteur des observations reflète sa propre expérience avec les recommandations de Baërt.

-5. Un autre élément fondateur pensé par cet ingénieur est la détermination d'une référence verticale commune entre différentes échelles de marée d'une même zone : la *"Ligne de Niveau Réduit de la Mer"*. Pour réaliser son entreprise, de Fourcroy de Ramecourt souhaitait à l'origine rattacher toutes ses échelles à partir des hauteurs de BM lues pour les ports de Ostende, Dunkerque, Gravelines et Calais. Il écrit d'ailleurs :

Mais, quelques recherches que j'aie faites pour apprendre comment on avoit fixé le niveau de la basse-Mer sur tout la Côte, je n'ai rien découvert que plusieurs contradictions à cet égard, entre les différens Auteurs de ces nivellemens. Toute la Côte, & les Ports de Frandre, assechent, & découvrent fort au loin, à Marée basse, excepté le Port d'Ostende, qui n'est pas en France : il n'a donc pas pu être facile de rassembler, dans nos Ports, des suites d'Observations de basse-Mer.

Ne pouvant trouver d'observations de BM, l'auteur utilisa un autre procédé lui permettant de mettre sur un même schéma, les échelles de marée de ces quatre ports suivant la "*Ligne de Niveau Réduit de la Mer*".

Ces 5 aspects fondateurs : utilisation des mesures du niveau de la mer au service de l'ingénierie, recherche d'observations anciennes, pérennité des données ; rattachement des observations à des références verticales et réduction à une même référence verticale de différentes échelles de marée régionales, sont innovants. Pour autant, l'ingénieur n'oublie pas de présenter les observatoires et la méthode utilisée pour mesurer le niveau marin, comme la transcription suivante l'expose :

[...] *chacune des Ecluses où elles le sont [les observations], à pour Gardien un ancien Ouvrier ou Matelot intelligent, payé à l'année, & logé par le Roi auprès de son Ecluse, pour la manœuvrer jour & nuit, selon que la mer le permet : cet homme met par écrit, chaque jour, la hauteur du flot, mesurée par une échelle ciselée sur la maçonnerie de son Ecluse, & graduée de six en six pouces de hauteur. La longue et quotidienne pratique de ces sortes de gens, les rend exacts à bien estimer, d'un coup-d'œil, non-seulement la vrai hauteur de l'eau, entre les divisions de six pouces, mais aussi la déduction convenable pour les vibrations inégales du clapotage, ou de la vague ; j'ai suivi & vérifié nombre de fois leurs opérations d'estime ; j'ai toujours trouvé que je n'eusse pas mieux fait, en m'y prenant tout autrement : ils inscrivent aussi exactement l'aire de vent qui domine au moment de la haute-Mer.*

Fourcroy de Ramecourt, personnage visionnaire pour l'étude du niveau de la mer imagine toute une palette d'exploitations nouvelles des hauteurs et de leur sauvegarde. Il est probable que les mesures réalisées par ce scientifique, le long des ports de Flandres -dont les repères des références verticales des échelles de marée sont indiqués dans son article- soient précieusement conservées. Aucune recherche particulière n'a été entreprise au cours de cette thèse pour retrouver les données commanditées par cet ingénieur.

3.4.2.3. Observations faites à Fouras pour le compte de l'arsenal de Rochefort.

Entre 1771 et 1773, une cinquantaine de hauteurs de PM et BM furent observées à Fouras. Cette ville se trouve en limite de l'estuaire de la Charente, côté océanique. Les mesures furent effectuées afin d'améliorer la navigation sur le fleuve pour les navires remontant la Charente jusqu'à l'arsenal de Rochefort. Les informations furent communiquées à Lalande en 1773, alors que ce dernier se trouvait en ce port. La transmission de ce type de mesures au savant n'est pas anodine, ce dernier cherchant à toutes les rassembler.

3.5. Renouveau d'étudier le flux et reflux de la mer à la fin du 18^{ème} siècle.

Cinquante deux ans après le dernier article publié dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, traitant du flux et reflux de la mer (Cassini, 1720a, 1720b, 1720c), une nouvelle génération de savants renouvelés avec le temps, siège à l'Académie des Sciences. Parmi eux, Lalande, académicien depuis 1753 démontre tout l'intérêt d'avoir de bonnes observations afin d'étudier la marée.

3.5.1. 1763 : La "révélation" de Lalande

Lalande explique qu'en 1763, il fut chargé de réaliser un rapport au nom de l'Académie Royale des Sciences pour le compte de l'Amirauté (Lalande, 1781 ; préface). A cette occasion, le savant comprend déjà qu'il est nécessaire *de rassembler des observations* (du niveau de la mer) *de tous les Pays de la Terre* afin de perfectionner les connaissances sur le flux et reflux de la mer.

Dans un premier document intitulé "*Mémoire sur le flux et reflux de la mer, et spécialement sur les marées des équinoxes*", Lalande (1772) se rend à nouveau à l'évidence que, pour étayer ses théories, il lui faut impérativement des observations. Sinon, comment confronter ses hypothèses à la réalité ? Cette prise de conscience lui fait écrire :

L'Académie secondée par le Ministère, fit faire au commencement du siècle, un grand nombre d'observations sur les marées : je n'ai pu découvrir les registres originaux de ces observations faites à Brest & ailleurs, depuis 1710 jusqu'en 1716 : je n'ai pu consulter que ce qui en est rapporté dans les Mémoires de l'Académie & seulement à l'occasion des conséquences qu'on vouloit alors en tirer. C'est un défaut dont on ne revient point encore, malgré l'expérience qui ne cesse de nous le mettre sous les yeux ; on publie des observations relatives à un but ou à une hypothèse, on y met les circonstances dont on a envie de faire usage, on qui intéressent l'objet qu'on se propose ; on oublie quelquefois que des observations bien circonstanciées nous ont servi à tirer des conséquences opposées à celles qu'on avoit en vue en les publiant : c'est ce qui m'est arrivé ; aussi ces observations, telles qu'elles sont dans les Mémoires de l'Académie & par extrait, ne m'ont pas été tout-à-fait inutiles. [...]

Si ce mémoire ne prouve pas [...] il prouvera du moins qu'il est utile de faire encore sur les marées une suite d'observations exactes, d'en marquer toutes les circonstances météorologiques, sur-tout la direction & la force du vent, & de la publier en entier, pour servir aux recherches qui restent à faire sur le flux & le reflux de la mer.

Dès lors, Lalande s'appliquera à publier les jeux d'observations dont il aura la connaissance mais pas seulement. Le savant termine en effet son mémoire en inscrivant :

[...] *il nous reste à désirer encore une suite d'observations faites dans un lieu d'observations faites dans un lieu où il n'y ait point d'assèchement de basse-mer : c'est ce que l'Académie se propose de demander au Ministre ; M. de Sartine [1729-1801], actuellement chargé de cette partie essentielle de l'administration, est si connu par ses lumières & par son zèle pour les Sciences, que je ne doute point du succès de nos demandes.*

Il est étrange de voir associé ici le nom de de Sartine avec le secrétaire d'état à la Marine. En effet, ce dernier a occupé ce poste de 1774 à 1780. Il est ainsi probable que Lalande retoucha la fin de ce document de 1772 juste avant l'impression en 1775 pour sensibiliser le ministre. En fait, entre temps, Lalande est déjà à l'initiative d'un second projet de mémoire pour refaire des observations du niveau marin en France comme l'indique le procès verbal de l'Académie Royale des Sciences daté du samedi 17 juillet 1773 :

M. les astronomes ont été priés de concert entre eux un projet d'observations sur les Marées qui sera ensuite rédigé par M. Delalande pour être lu à l'académie et ensuite imprimé et envoyé dans les ports.

Rapidement rédigé, le mémoire ne sera encore imprimé que quatre ans plus tard. Afin d'éviter toute confusion future entre différentes productions de Lalande, à chaque fois qu'il sera fait état du "*Mémoire sur le flux et reflux de la mer*" (1777), il s'agira de la manière d'observer le niveau de la mer qui va suivre (cf. 3.5.2). Cette description n'est pas à confondre avec le "*Mémoire sur le flux et reflux de la mer et spécialement sur les marées des équinoxes*" (1772) et l'ouvrage "*Traité du flux et du reflux de la mer*" (1781) définit précédemment. Afin d'en faire les distinctions, l'année d'édition de chaque document 1772, 1777, 1781, déterminera le document usité. Sans indication sur le millésime, le document discuté sera celui du livre publié en 1781.

3.5.2. 1777 : Mémoire sur les observations à faire du Flux et Reflux de la Mer.

Dès le 13 octobre 1775, l'astronome Jean-Paul Grandjean de Fouchy [1707-1788], envoya une copie de ce second mémoire une à Gabriel Joseph de Tournay d'Assignies, capitaine de vaisseau, dit "Le Ch.^{er} [chevalier] d'Oisy", accompagné de la lettre¹ suivante:

Monseigneur ;

J'ai l'honneur de vous envoyer sous cette enveloppe un mémoire dressé par ordre de l'académie sur l'observation du flux et reflux de la mer qu'elle desireroit que vous voullassié bien faire imprimer et l'envoyer dans les ports en auttorisant Les chefs à donner des facilités et des secours à ceux que leur zele portera à ce charger de ces observations. L'academie à déjà eu trop de marques de vôtre amour pour les Sciences pour hésiter à vous présenter avec confiance Des objets qu'elle croit nécessaire ou utiles au progrès de nos connoissances et qui peuvent se Remplir aisément et à peu de fraix sous vôtre protection, elle vous présente même celui-ci avec d'autant plus d'expérances que de succès, qu'elle est informée qu'il y a à Brest à st Malo, et dans plusieurs autres endroits des personnes zelées, et capable de bien faire des observations sur ce point si important pour la marine et dont la théorie n'est encore qu'ébauchée. Permettés moy Monseigneur en m'accquittant de ma commission de me servir de cette occasion de me rappeler dans votre souveniir et de vous renouvellee le sentiment du sincère et respectueux attachement avec Lequel jai l'honneur d'etre.

Monseigneur,

*Votre très humble et très obéissant serviteur
Signé De Fouchy.*

A paris Le 13 8^{bre} 1775.

Et la réponse obtenue sur la même lettre :

R P' [Réponse portée ?] Le 14 8bre 1775

P.S. [?] Je ferai du mémoire que vous m'avez envoyé l'usage que l'academie desire.

Une autre lettre², retranscrite en partie sur la page suivante et écrite par Lalande le 28 juin 1777 explique pourquoi, deux ans après la demande faite par Fouchy, le mémoire n'était toujours pas imprimé. Elle confirme d'autre part que le mémoire mentionné dans l'échange de courrier de 1775 était bien le second (requis en 1773), et non celui rédigé en 1772 et publié cette même année 1775 !

¹ Fouchy. Lettre du 18/10/1775. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°23.

² Lalande. Lettre du 28/06/1777. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°13.

A paris ce 28 juin 1777
M. le M^{is} [Marquis] de Chabert
Monseigneur

[...]

J'eue l'honneur de vous adresser Monseigneur, le 15. 8bre 1775 un mémoire sur les marées avec un Lettre de l'academie des Sciences qui vous supplioit de nous procurer des observations sur lesquelles nous puissions etablir des theories et des calculs. Vous eutes la bonté de repondre que vous donneriez vos ordres à ce sujet, mais le mémoire ayant été renvoyé à M. Le C^{her} d'Oisy, sa mort à retardé l'execution de vos intentions ;

Permettez Monseigneur que je vous en envoie une nouvelle copie en vous suppliant de la faire imprimer, et de l'envoyer dans les ports en engageant les administrateurs à donner des facilités à ceux qui auront le courage et l'intelligence nécessaire pour le livrer à ce Travail, cela ne coutera rien au Roy et procurera aux Sciences et à la marine un secours intéressant.

Je suis avec un profond respect

Monseigneur

De vôtre grandeur
Le très humble et très obeissant serviteur
Signé de Lalande
de l'academie des Sciences.

Le décès du Chevalier d'Oisy l'explique. Celui-ci disparaît en effet en avril/mai 1776 comme en témoigne une expertise de succession datée du 22 mai¹. Il faudra alors attendre deux années de plus avant que le mémoire ne soit imprimé par l'Imprimerie Royale au mois de novembre 1777². Cette missive confirme aussi que les observateurs, appelés à réaliser les mesures n'avaient accès à aucune source financière aussi bien pour acheter le matériel que pour être dédommagé du temps passé à réaliser les mesures.

Ce second mémoire³, fruit de la collaboration entre les astronomes sous la direction de Lalande et sous le haut patronage des académiciens est entièrement retranscrit ci-après :

Mémoire sur les observations à faire du Flux et du Reflux de la Mer.

La Théorie du flux et du reflux de la mer, est une des partie de la physique que les Savans ont le moins approfondies, faute de bonnes observations. On sait très bien, depuis la fin du siècle dernier, que les attractions du Soleil et de la Lune sont les véritables causes de ce phénomène ; mais on ignore le rapport exact de ces forces, l'altération que les vents et les circonstances locales y occasionnent, & principalement l'influence que peut avoir l'inertie des eaux sur l'heure et la hauteur des marées. L'opinion générale, que les marées des équinoxes sont les plus fortes de toutes, paraît au moins douteuse suivant un mémoire imprimé parmi ceux de l'Académie, année 1772 : Enfin l'observation ni la théorie n'ont point encore mis en état de pouvoir prédire, avec quelqu'exactitude, la hauteur de la mer dans un port, pour un jour & une heure quelconque.

L'Académie royale des Sciences avait obtenu en 1701, de M. de Pontchartrain, & en 1716, de M. le Régent, de faire faire quelques-uns de nos ports des observations sur les marées : elles furent suivies avec soin & intelligence par M. Baert à Dunkerque, par M. Du bocage au Havre, par M. Moutier de Longchamp à Brest, & à l'Orient par un observateur dont le nom ne nous est pas parvenu.

Ces observations ont été remises à M. Cassini, il les examina, & en tira des conséquences qu'on

¹ Minutier central des Archives Nationales , Y-13969; source : François Marandet, 2003.

² D'après Lalande (1781), p. 160.

³ Mémoire sur les observations à faire du Flux et du Reflux de la Mer. Archives de la Médiathèque de La Rochelle, MS783, p.147-148.

peut voir dans les Mémoires de l'Académie, année 1712, 1713, 1714 & 1720. Mais les registres originaux étant perdus, & les détails des circonstances n'ayant pas été publiés, on a compris depuis longtemps la nécessité de se procurer de nouvelles observations, faites avec de nouvelles précautions, par des Observateurs assidus, & que l'on publierait pour aider les Savans dans leurs recherches. M. Mac-Laurin, Daniel Bernouilli & Euler, dont les pièces partagèrent le Prix de l'Académie proposé à ce sujet en 1740, sentirent combien des Observations détaillées & précises pourraient éclaircir la théorie : il regrettèrent de n'avoir pas eu assez de secours pour établir la leur, & depuis ce temps-là, les Géomètres, par les mêmes raisons, ont presque cessé de suivre cette partie intéressante de la Physique.

En conséquence, l'Académie a demandé les ordres du Roi pour faire faire de nouvelles observations dans nos principaux ports par des personnes qui, pour un temps, se consacraient à ce travail utile pour l'avancement des Sciences.

Ces observations seraient nécessaires surtout dans les ports de La Rochelle, de l'Orient, de Brest, du Havre, de Saint-Malo, de Dunkerque, & même de Toulon, quoique la marée y soit à peine sensible.

L'Académie désirerait donc que dans ces ports il fût fait, pendant une année consécutive, des observations de la hauteur & de l'heure de la pleine & de la basse mer tous les jours, & avec les attentions suivantes :

1.° L'échelle graduée en pieds & pouces, sera placée dans un lieu qui n'assèche pas de basse mer

2.° Pour éviter l'agitation des vagues & le clapotage de la mer, l'échelle doit être environnée d'un bâtis ou tambour, dans lequel l'eau ne communique que par de petites ouvertures.

3.° On aura soin de marquer la direction des vents sur la côte, & autant que faire se pourra, le degré de sa force, suivant les expressions usitées par les Marins.

4.° On pourra y joindre les hauteurs du baromètre & du thermomètre, pour connaître l'état de l'Atmosphère aux époques des observations.

5.° On observera non seulement l'heure et la minute de la plus grande hauteur & du plus grand abaissement de la mer, mais encore d'autres hauteurs intermédiaires. Il sera même utile, de temps en temps, d'observer ces hauteurs pendant une marée entière, de demi-heure en demi-heure, pour connaître les lois de la marche du flot et du jusant objet très essentiel qui peut conduire à perfectionner la théorie. Il faudra que les Observateurs règlent leur montre sur quelque bonne méridienne.

Les personnes qui auront assez de zèle pour s'occuper de ces observations, imagineront sans doute des moyens pour les faire avec beaucoup de précision. Parmi ceux qui sont venus à la connaissance de l'Académie, elle seroit portée à adopter celui qu'on trouve dans le Journal des Savans, année 1685 : Il consiste à placer dans un lieu qui n'assèche pas de basse mer, un tuyau dans lequel un corps flottant s'élève & s'abaisse avec la mer : ce corps flottant est suspendu par une corde qui passe sur une poulie, & qui porte à son extrémité un poids dont la hauteur indique celle de la mer. On pourrait encore, sur ce corps flottant qui serait d'une certaine étendue, faire porter une règle de bois léger, & graduée, dont l'extrémité supérieure passerait dans une bouche fixe, & qui indiquerait l'état de la marée par sa graduation.

Ces précautions, & d'autres semblables que la situation des lieux pourra suggérer, procureront des observations précises que l'Académie regarde comme très importantes pour cette partie des Sciences Physico-mathématiques.

Si les Observateurs désiraient quelques éclaircissements ultérieurs, l'Académie s'empressera de les leur envoyer au premier avis.

A PARIS
DE L'IMPRIMERIE ROYALE
M. DCCLXXVII. (1777)

A la lecture du mémoire, la plume de Lalande est pleinement perceptible. Dans l'introduction, le savant présente dans l'introduction l'intérêt d'avoir de bonnes observations pour déterminer le rapport des forces d'attractions du Soleil et de la Lune sur les marées et

pouvoir prédire le niveau de la mer en un lieu à n'importe quel moment. Le mémoire rappelle que par le passé deux autres mémoires furent rédigés, en 1701 et 1716, pour aider à observer le niveau de la mer, mais que les mesures obtenues ont disparu. Avant de passer au protocole, Lalande propose des ports où des observations doivent être réalisées : La Rochelle, Lorient, Brest, Le Havre, Saint-Malo, Dunkerque et Toulon. Toutefois, pour Lorient, Brest, Le Havre et Dunkerque, des observations existent déjà en 1777 comme nous l'avons vu précédemment. Les personnes aptes à Saint-Malo avaient été approchées sans succès en 1729. Enfin, pour la première fois, un port méditerranéen est donné pour y réaliser des mesures.

Les recommandations pour l'observation sont au nombre de cinq. Peu d'innovation mais une certaine simplification est à noter par rapport aux précédents mémoires. L'échelle graduée en pied et en pouce ne devant pas s'assécher doit être installée dans un puits pour éviter toute perturbation de la lecture des hauteurs à cause du clapot et des vagues. Un élément important est supprimé : le rattachement des hauteurs de l'échelle avec un repère fixe. Les heures des PM et BM ne doivent plus être déterminés suivant la méthode de Picard et La Hire mais en prenant l'heure exacte au moment où la hauteur extrême est mesuré sur l'échelle. Comme toujours, les conditions de vent doivent être données. L'innovation dans ce mémoire réside dans le cinquième point. Lalande demande à ce que des mesures soient réalisées de temps en temps toutes les demi-heures pendant une marée entière. En effet, jusqu'alors, seul les heures et les hauteurs des PM et BM comptaient.

Pour autant, ce mémoire n'a rien de rigide. Lalande s'évertue à donner libre choix aux observateurs pour développer de nouveaux moyens pour observer le niveau de la mer, du moment que la méthode utilisée soit remise à l'Académie.

Le 25 novembre 1777, le mémoire fut envoyé aux responsables des ports sélectionnés. Seule la lettre accompagnant l'envoi du mémoire à destination de Brest a été retrouvée :

a Versailles le 25 9b^{re} 1777

L'Académie Royale des Sciences, Monsieur, ayant exposé au Roy la nécessité dont il est de faire des observations exactes, et suivies du flux et reflux de la mer dans nos principaux ports, afin d'aider les savans dans leurs recherches pour l'avancement de la théorie de cette partie intéressante de la physique, et Sa Majesté désirant que cet objet utile soit Rempli avec Soins, je vous adresse quelques Exemplaires du Mémoire imprimé ou l'Académie explique La manière de bien faire ces observations, afin que la personne ou les personnes de concert qui dans votre Port, auront le Zele et l'intelligence nécessaires pour Se charger de ce soin, si conformément. vous voudrés bien faire fournir pour le succès de ce travail, les facilités, et les Secours possibles jndiques dans le mémoire.

Jay l'honneur d'être avec un sincere attachement Monsieur, votre très humble et très obeissant serviteur ./ signé de Sartine.

P.S. je vous Prie de Remettre des Exemplaires de ce Mémoire à L'académie Royale de marine, afin qu'elle concoure par ses soins, à la bonté des observations, d'autant que je présume que ce sera par un ou plusieurs de Ses Membres quelles seront faites ./ et paraphé ./

M. Le C^{te} d'Orvilliers à Brest ./

Le poids du secrétaire d'état à la Marine, M. de Sartine, dans les demandes d'observations du niveau de la mer, va stimuler les différents responsables recevant ce message expliquant alors l'abondance et la rapidité des réponses.

3.5.3. Réactions et conséquences du mémoire pour différents ports de France.

Les réactions, suite à l'envoi de ce document, ne tardèrent pas, en effet. Des lettres envoyées au Marquis de Chabert arrivèrent de tous les ports, hormis celui de Toulon.

3.5.3.1. A Lorient.

Dès le 1^{er} décembre, Gonet répondit à la demande de Chabert, qui semble être plutôt un ordre comme l'écrit l'auteur de la lettre, reprise ici¹ :

a Lorient le 1^{er} x^b^{re} 1777

*Mr le M^{is} de Chabert
Monseigneur*

*Je ferai ce qui dépendra de moy pour découvrir en cette ville une ou plusieurs personnes qui de concert aye le zele et l'intelligence nécessaire pour se charger de faire des observations exactes et suivies sur flux et reflux de la mer ; si j'en rencontre je lui distriburai quelque exemplaire du mémoire imprimé ou L'académie explique la maniere de bien faire ces observations, et je leur procurerai d'ailleurs pour le succès de leur travail toutes les facilités et les secours possibles pour indiquées dans ce mémoire ainsi que vous me l'ordonnés par vôtre dépêche avec un profond Respect
Monseigneur*

*Votre très humble et très obseissant serviteur
Signé Gonet*

D'après sa lettre, le responsable Gonet semble être prêt à aider pleinement les desseins de l'Académie. Il semble en revanche être un peu dans l'expectative pour trouver des personnes pouvant réaliser de telles mesures. Pour autant, il renvoie une nouvelle lettre² à Chabert le 3 décembre, pour lui donner la liste des personnes qui suivront et réaliseront les mesures :

a Lorient le 3 x^b^{re} 1777

*Mr de Chabert
Monseigneur*

Jay l'honneur de vous informer que M. D'apres de mannevillette membre de l'Académie des sciences, à bien voulu se charger de diriger les opérations relatives aux observations qui seront faites en ce port suivant les vuës de L'académie du flux et Reflux de la mer ; pour Contribuer à l'avancement de la Théorie de cette partie intéressante de la phisique ; ces observations seront suivies par le S. Mollard lieutenant de frégatte-attaché au service du Port, qui sera aidé dans le Travail de fatigue par le N^e Joubert pilote fort intelligent, et qui n'est pas sans Lumière.

Pour mieux comprendre le document précédent, quelques précisions s'imposent sur Jean-Baptiste (d')Après de Mannevillette [1707-1780] grâce à Briot (1990) : cet autre capitaine de vaisseau, hydrographe de la Compagnie des Indes et auteur du Neptune Oriental n'a jamais fait partie de l'Académie des Sciences, contrairement à ce qui est porté sur la lettre, mais fut l'un des membres fondateurs de l'Académie de Marine en 1752. Il est alors un gage important

¹ Gonet. Lettre du 01/12/1777. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°24.

² Gonet. Lettre du 03/12/1777. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°24.

pour la qualité des mesures faites à Lorient durant toute l'année 1778. Ces observations, accompagné d'un mémoire de Lalande (1777), ont été retrouvées en 3 exemplaires identiques au Service Historique de la Défense (SHD) - unité Marine à Vincennes et dont le préambule est repris ici¹ :

Journal des observations sur le Flux et Reflux de la Mer au Port de l'Orient, pendant l'année 1778.

Ce journal a été tenu sous l'inspection de m. Daprès de mannevillette pendant les six premiers mois de l'année par Molard Lieutenant de fregate et pendant les six derniers par Grognard du justin, ingénieur attaché au Dépôt des Plans et journaux de la navigation de L'inde.

On a joint au journal le Plan du Port de l'Orient pour que l'on puisse juger de l'Effet du vent sur la mer, relativement au gissement des Côtes. L'échelle graduée pour ces observations étoit Dans la partie du nord du Port ainsi que Cela est indiqué en rouge sur le Plan.

L'on a observé particulièrement chaque jour la hauteur de la pleine-mer et de la Basse mer, et de temps en temps on a observé les progressions de la mer pendant toute une marée, d'heure en heure, on y a joint les observations sur la hauteur du Barometre et du Thermomètre et on a fait usage du Barometre à cadrans, dont les mouvemens sont plus sensibles. A la fin de chaque journé, l'on a donné un Etat du temps et des circonstances qui peuvent avoir quelque relation avec L'objet que l'on s'en proposé.

Malheureusement le plan mentionné dans le préambule n'est pas repris. A noter que pour la première fois, les observateurs avaient à leur disposition, un tableau imprimé où remplir les observations de jour en jour. La figure 3.2 reproduit un extrait de ce registre pour la journée du 5 janvier 1778.

Du Mois.		De Lune.		Heures des Observations.	VENT.	Force du VENT.	Hauteur de la pleine Mer.		Hauteur de la basse Mer.		Hauteurs intermédiaires de la Mer.		Hauteur du Barometre.		Hauteur du Thermometre.
5.	8.	H.	M.				Pieds.	Pouces.	Pieds.	Pouces.	Pieds.	Pouces.	Pouces.	Lignes.	Degrs.
		7.	59	N.E.	presque Calme	15	5	.....	.....	.....	.....	28	.....	4	
		2	25	Sud	Jd	.....	.....	6.	.....	.....	.....	Jd	.....	6	

Les vents ont variés du N.E au Sud presque Calme, avec du du Brouillard, Ciel Couvert

Fig. 3.2 – Observations du 5 janvier 1778 à Lorient, par Molard, lieutenant de Frégate.
Source : SHD – Marine Vincennes, cote : SH 55.

Ce support imprimé guide l'observateur qui doit porter le jour du mois, celui de la Lune, le mois en cours, les indications météorologiques et, par un tableau de 8 colonnes, l'heure des

¹ SHD – Marine Vincennes, cotes SH 55, SH 56 et SH 57.

observations, les direction et force du vent, les hauteurs de PM, de BM, intermédiaires et celles du baromètre et du thermomètre.

On retrouve ainsi toutes les informations clairement demandées par les académiciens. Malheureusement, il est fort probable que ce jeu de mesures ne soit jamais arrivé entre les mains des savants de l'Académie. Tout d'abord, et contrairement aux autres séries de mesures prises à la même époque, il n'est jamais mentionné la réception de ces mesures dans les Procès Verbaux de l'Académie. Ensuite, Lalande, dans son traité (1781), à l'origine de cette campagne de mesures, mentionne à plusieurs reprises, les observations faites à Lorient en 1711-1712 et 1716-1719 sans parler une seule fois de celles faites en 1778. D'après Briot (1990), la fin de vie de D'Après de Manneville fut difficile. Ce dernier endetté à cause de la seconde édition de son Neptune Oriental en 1778 avait d'autres préoccupations en tête que d'envoyer le mémoire des marées. Certainement, Molard et Grognard, ne voulant l'importuner, envoyèrent tous les registres (les trois !) au mauvais destinataire qui ne les fit pas remonter aux savants. Cela expliquerait pourquoi seuls les mesures de Lorient ont été retrouvées au SHD – Marine de Vincennes sous une cote où les documents arrivent de façon extraordinaire.

3.5.3.2. A Saint-Malo.

Tout comme à Lorient, la réaction fut quasi immédiate à Saint-Malo. Le 5 décembre 1777, Guillot, commissaire des Ports et Arsenaux écrivit au secrétaire d'état à la Marine. Voici la lettre¹ qui fut présentée à l'Académie lors de la séance du mercredi 17 décembre 1777² :

*Extrait de la Lettre de M. Guillot des Ports et Arsenaux à M. Sartine Ministre de la Marine.
A St Malo le 5 decembre 1777*

Monseigneur

J'ai reçu avec la lettre que vous m'avez l'honneur de m'écrire le 25 du mois passé divers exemplaires du mémoire imprimé pour lequel l'académie royale des sciences explique la maniere de bien faire les observations dont elle a besoin a l'occasion du flux et reflux de la mer, afin d'aider les Savans dans leurs recherches pour l'avancement de la Théorie de cette partie interessante de la Physique, et j'ose avoir l'honneur de vous assurer, Monseigneur, que l'ai la plus grande esperance que ces observations seront faites avec succès et Intelligence à St Malo par les Soins de quelques personnes Zélées et instruites, qui sur ma demande, et d'après l'assurance que je leur ai données que leur travail vous seroit agrable, se sont associées pour aviser aux moyens les plus expidiens et les plus sur et pour travailler avec l'exactitude que le Sujet exige, et à la suite d'un comité tenu hier à ce sujet où se trouverent M. Josseaume hydrographe du Roy en cette ville, M. de la Brillantais Marion Entrepreneur de frégates, M. de Beauvais le fer, négociant, M. Coquelin de la Thiolais, Capitaine de port et moy, il fut convenu d'après l'examen du Local, qui est incommode dans les marées les plus mediocre, la mer s'éloignant des murs de la Ville à une distance assez considérable, lorsqu'elle est basse que l'on fixeroit sur un Rocher du coté du port St Pere St Servan l'emplacement propre à placer l'Echelle perpétuelle qu'il faut nécessairement faire construire mais qu'à l'effet de Simplifier la dépense, sans nuire à l'exactitude des observations, et pour se procurer les moyens de rendre l'ouvrage plus solide, il conviendrait de partager ladite Echelle perpetuelle en plusieurs parties qui se succederoient par Etages, et qui se correspondroient par le moyen d'un nivellement exact. En effet la mer montant à St Malo de 45 [≈ 14,62m] à 50 pieds [≈ 16,24m] à plomb dans les marées d'Equinoxes, il seroit probablement impraticable mais surement très dispendieux de place avec Solidité un tuyau de cette hauteur ; Quoiqu'il en soit Monseigneur je me trouve associé avec des particuliers assez instruits et éclairés, pour avoir l'esperance que l'académie ne desaprouvera pas notre travail, ainsi que nos moyens mis en usage pour parvenir à lui procurer les observations qu'elle paroît desirer ./.

Par cette lettre, Guillot cherche à consulter l'Académie afin d'avoir son aval pour l'observatoire qui va être mis en place et notamment les mesures sur différentes échelles de marée. Tout comme Zublet et la Fossinguant en 1729 (cf. 3.4.1.1), Guillot explique qu'il est impossible de mesurer le niveau de la mer à Saint-Malo, la mer à marée basse s'éloignant trop loin. Pour pallier cet effet, Guillot propose que les mesures soient faites à Saint-Servan, à l'extrême nord de l'estuaire de la Rance à 2km environ du centre ville de Saint-Malo. Proposer Saint-Servan pour observer le niveau de la mer n'est pas une idée nouvelle. En effet, Lalande (1781) reprendra des propos tenus dès 1775-1776 par Le Fer de Beauvais, négociant à Saint-Malo qui figure par ailleurs dans la liste du comité défini par Guillot (voir 3.5.3.2). Le Fer de Beauvais avait en effet exposé à Lalande que la rade de Solidor, se trouvant à une demi-lieue (≈3,99km d'après la lieue de Paris [1674-1793]) de Saint-Malo est propice à observer le niveau de la mer. Cette rade se trouvant à l'embouchure de la Rance, ne s'assèche

¹ Pochette de Séance du mercredi 17 décembre 1777. – Archives de l'Académie des Sciences.

² PV de l'Académie Royale des Sciences, 1777, tome 96, séance du mercredi 17 décembre 1777.

jamais à marée basse. Accompagnant cette réflexion, l'ouvrage de Lalande présente, en page 241, 31 hauteurs de marnage réalisées entre 1775 et 1776 par le négociant sur demande de l'académicien. Les premières données sont des mesures à la sonde prises au milieu de la rade. Puis Le Fer de Beauvais choisit comme repère de référence le dessus de la plate forme servant de dernière marche à l'escalier menant du quai à l'estran. Les rochers exondés à marée basse étaient observés lorsque le temps le permettait. Pour mesurer la marée haute, il utilisa une longue échelle installée le long du quai. L'échelle utilisée ne considérant pas le fruit du quai, l'entrepreneur réduisait ensuite les hauteurs par calculs trigonométriques.

Lalande dans son traité (1781) ne parle aucunement d'observations réalisées à partir de 1777 à Saint-Malo. Aucune observation n'a d'ailleurs été retrouvée.

3.5.3.3. Au Havre.

Le port du Havre est intimement lié aux observations du niveau de la mer depuis la première demande émanant de Cassini en 1701. Champigny répondit aux demandes en 1701-1702 (cf. 3.2.2.1) et en 1716 (cf. 3.3.2.2) ainsi que Hasuder en 1732 (cf. 3.4.1.2). Tout naturellement, Lalande, mentionne la ville du Havre comme site où des mesures doivent être réalisées. Mistral¹ répondit à la demande de de Chabert le 6 décembre 1777 en ces termes² :

Mr Mistral Répond au sujet des observations à faire sur le flux et reflux de la mer.

Au havre le 6 Decembre 1777

Monseigneur M. de Chabert

J'ay reçu avec la lettre que vous m'avez fait l'honneur de m'écrire le 25 du mois dernier, les Exemplaires qui y étaient joints, du mémoire que l'Académie Royale des Sciences adressé en conséquence des Intentions du Roy, sur la maniere d'opérer pour bien faire les observations désirées sur le flux et Reflux de la mer ; afin de parvenir à l'avancement de la Théorie de cette partie intéressante, de la Phisique.

Je les ai Monseigneur, distribuées a M. M. Les officiers du port ainsi qu'a quelques personnes de cette ville, qui par leurs talents, et leur intelligence, m'ont parût être les plus propres à faire de pareilles ôbservations. J'emploierai auprès de celles-ci mes soins, et mes Sollicitations, pour exalter leurs zele à les entreprendre.

Dans ce cas, Monseigneur, ne doutez pas, que conformément à vos ordres, je ne leur fusses fournir tous les secours dont ils auront besoin ; et toutes les facilités possibles, conformément à ce mémoire, pour le succès de ces observations.

Je suis avec un profond Respect

Monseigneur

Votre très humble et très obeissant serviteur ./.. signé Mistral.

Malgré les bonnes intentions de Mistral, il semblerait qu'elles n'aient été suivies d'aucun effet. L'ordonnateur de la Marine, alors responsable de la reconstruction du port du Havre avait probablement d'autres priorités que celles de faire observer la marée. De fait, aucune observation n'a été trouvée et si Lalande (1781) parle des mesures de 1701-1702, il ne fait aucune allusion à d'éventuelles observations à compter de 1777. Tout comme Saint-Malo, la cité du Havre ne répond pas aux attentes du secrétaire d'état à la Marine et de l'Académie des Sciences.

¹ Mistral. Ordonnateur de la Marine, il dirige la reconstruction de l'arsenal du Havre entre 1776 et 1780.

² Mistral. Lettre du 06/12/1777. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°23.

3.5.3.4. A La Rochelle.

De tous les échanges, celui entre les savants rochelais et les personnalités parisiennes est le plus passionnant, car le plus complet. L'ensemble de cette correspondance a été retrouvé dispersé en trois endroits : aux Archives Nationales, aux archives de l'Académie des Sciences et aux archives de la médiathèque de La Rochelle.

Les autorités rochelaises, répondirent à de Chabert le 15 janvier 1778. Ce délai, beaucoup plus long que pour les ports déjà discutés, s'explique par plusieurs contingences exprimées dans la lettre reproduite ci-dessous¹ :

A La Rochelle le 15 janvier 1778

M. Le Marquis de Chabert

Monseigneur

Jay cherché tous les moyens pour faire l'établissement que l'académie Royale demande pour les observations à faire sur le flux et reflux de la mer, j'ai chargé Le Sr Merigot maitre d'hydrographie de cette ville, d'en suivre l'operation, nous avons été sur la côte et nous avons vû de concert les difficultés, et les Dépenses que cet établissement occasionnera dont j'ai l'honneur de vous rendre compte.

Le havre étant à sec toutes les marées, il n'est pas possible d'y suivre les opérations proposées et l'établissement ne peut se faire qu'à une demie lieu du havre, ou le terrain n'asseche pas ; alors il faut journellement un canot armé de deux Matelots pour conduire la personne destinée à faire les observations indiquées par l'académie, et cette depense est de trois livres [équivalent du prix de trois fauteuils et deux chaises de bois de serizier garnis de joncs, deux petites chaises pour enfans²] par jour.

Le Sr Merigot ne pouvant à cause de ces occupations se transporter aux heures de la marée jour et nuit au lieu de l'établissement, il se chargera de tenir le journal sur lequel il réuni les observations faites par l'officier marchans destiné à les suivre.

Si vous desirés Monseigneur que cet établissement se fasse honorés moy de vos ordres, et je les exécuterai avec tout le soin et l'économie possible.

J'ai l'honneur d'être avec un très profond Respect.

Monseigneur

Vôtre très humble et très obeissant serviteur ./ signé Bertet.

La morphologie de la côte rochelaise ne se prête pas à la réalisation des observations des BM, le port étant asséché à chaque marée comme l'indiquent Bertet et Mérigot, professeur d'hydrographie. Les deux hommes proposent néanmoins une solution coûteuse consistant à faire les mesures à une demi lieu du port en mer. En parallèle de cette étude, l'Académie des Belles-Lettres, Sciences et Arts de La Rochelle propose son aide pour accéder à cette demande : le 7 janvier 1778, Pierre-Henri Seignette [1735-1808 ?], trésorier et futur président de l'Académie de La Rochelle écrit à Duchesne, directeur des Ponts et Chaussées de la cité afin d'obtenir quelques renseignements. L'ensemble est consigné sur la page suivante³ :

¹ Bertet. Lettre à de Chabert, le 15/01/1778. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°24.

² Inventaire après le décès de Louis Alexandre Frétard de son vivant chevalier seigneur d'Ecoveux commencé le 5 janvier 1787 par Jean Chety, notaire royal pour la sénéchaussée de Saintonge à la résidence de la ville de Saintes. AD17, cote 1J/99.

³ Seignette. Lettre à de Duchesne, le 07/01/1778. Archives de la Médiathèque de La Rochelle, MS783, p.151-152.

A La Rochelle 7 janvier 1778

A Monsieur Duchesne, directeur des Ponts et Chaussées

J'ai le plus grand besoin d'avoir des renseignements certains sur quelques objets que je vais avoir l'honneur de vous exposer. Je ne crois pas que mes questions soient indiscretes et je sais que si vous ne les juger pas telles vous aurez la bonté d'y répondre. Je vous serais infiniment obligé si vous vouliez bien indiquer un temps qui ne fut pas éloigné auquel je puisse envoyer chercher la réponse.

*J'ai l'honneur d'être avec une respectueuse considération,
Monsieur*

Votre très humble et très Obéissant Serviteur Seignette

Je fais les questions à mi marge, en vous priant de regarder sur le mono feuillet.

- 1.° Combien y a-t-il de pente du radier à l'écluse de Maubec jusqu'entre les tours ?*
- 2.° Combien d'entre les Tours jusqu'à la digue ?*
- 3.° A quelle distance dans le Canal la mer se retire-t-elle dans les plus grandes marées ?*
- 4.° Quelle longueur doit avoir la jetée du Sud ?*
- 5.° Le pied de cette jetée assèchera-t-il ?*
- 6.° De combien le radier de Maubec est-il au dessus de la plus basse mer ?*

Les réponses à cette lettre sont apportées directement sur le courrier, avec une couleur d'encre différente, question par question :

1.° : 2 pieds 5 pouces 9 lignes.

2.° : 10 pieds.

3.° : à 682 toises

4.° : Elle est projetée sur 350 toises, mais on la continuera par la suite d'autant que les fonds le permettront.

5.° : De 8 pieds 10 pouces 3 lignes.

Seignette, par ses questions, prépare la réponse aux demandes d'observations du niveau de la mer pour le Marquis de Condorcet [1743-1794], secrétaire perpétuel de l'Académie Royale de Sciences¹ :

¹ Seignette. Lettre à de Condorcet, le 15/01/1778. Archives de l'Académie des Sciences, pochette de Séance 31/01/1778.

A La Rochelle 20 janvier 1778

Monsieur

Le mémoire sur les observations à faire du flux et du reflux de la mer publié par l'académie des sciences est parvenu à notre académie. Nous nous empresserions d'entrer dans les vues de l'académie des Sciences, ou plutôt nous avons depuis longtemps prévenu ses désirs si des obstacles physiques à peu près insurmontables ne s'y étaient opposés.

Notre Cote est extrêmement plate et pour trouver un lieu qui n'assèche pas de basse mer, il faudrait s'en éloigner considérablement (dans les fortes marées, la mer se retire de 682 P. c'est-à-dire dans la partie la plus creusé de la cote), comment asseoir à cette distance le bâton ou tambour nécessaire (ce qui pourrait être dangereux même impossible selon les vents et dans les tempêtes), pour l'établir solidement il faudrait une dépense que le gouvernement est seul en état de faire. Un autre inconvénient, c'est que dans la haute mer ce tambour serait une isle que l'on ne pourrait aborder qu'en bateau. L'on ne pourrait en revenir de basse mer à causes des boues et des mares qu'il faudrait traverser.

Je ne parle, Monsieur que des difficultés qui dépendent du local ; La difficulté de trouver quelqu'un qui s'assujettisse autant qu'il est nécessaire est pour tous les lieux, et elle serait moindre pour une académie dont les membres s'entendraient qui observeraient eux mêmes, ou surveilleraient les coopérateurs qu'ils seraient obligés de choisir. Il serait sans doute à désirer que l'on pus se passer de coopérateurs, mais les académiciens de Province ont presque tous des charges ou des Etats qui les empêchent de suivre uniquement leur goûts pour les sciences ou pour les lettres.

Pour remplir en quelque sorte ce que l'académie demande, j'ai l'honneur de vous adresser, M. des observations faites pendant une année par M. le chevalier de Vialis (Major du Corps Royal du Génie, membre de notre académie). Elles commencent au 15 mai 1775. Vous y verrez la plus grande élévation des marées observée un fois le jour, on y a joint la direction des vents et les phases de la Lune, il serait à désirer que l'on eu marqué les heures mais ce n'était pas l'objet de M. de Vialis.

Pour rendre cette table plus utile, j'y joins quelques notes que je dois à M. Duchesne, Directeur des Ponts et Chaussées.

Les ouvrages que l'on fait actuellement à l'avant port faciliteront un jour les observations proposées, on forme une jetée qui est projeté sur 350, mais on se propose de la continuer par la suite autant que les font le permettront alors, si l'extrémité de la jetée était portée jusqu'au point que la mer couvre encore lors qu'elle est retirée dans son plus grand abaissement, il ne s'agirait de terminer cette jetée par le tambour proposé, ce qui ne serait ni difficile ni bien dispendieux.

Il est douloureux pour nous M. que des obstacles de la nature dont ceux que j'ai eu l'honneur de vous exposer s'opposent au désir que nous avons de concourir à ce que l'Académie des Sciences désire si malgré ces obstacles vous pensez que l'on puisse faire quelques observations utiles, faites moi l'honneur de me l'écrire et soyer persuadé de tout notre zèle et du mien en particulier.

Je suis avec Respect Monsieur

Votre très humble et très obeissant serviteur. Seignette.

Tout comme Bertet, Seignette présente la géographie physique du littoral comme un obstacle majeur à la réalisation d'observations du niveau de la mer. Seignette expose une solution très coûteuse et se heurte à de nombreux problèmes matériels, financiers et humains. Pour autant, Seignette envoie des observations de PM réalisées par de Vialis entre 1775 et 1776 à "l'écluse de Maubec"¹, mais sans heures.

Lors de la séance de travail du samedi 31 janvier 1778², de Condorcet présente les observations des marées faites à La Rochelle par de Vialis. Lalande est nommé commissaire pour en rendre compte. Le samedi 28 mars 1778, Lalande expose son rapport, devant les

¹ De Vialis. Registre sur les hauteurs des PM sur le quai Maubec. Archives de la Médiathèque de La Rochelle, MS783, p.153-160.

² PV de l'Académie Royale des Sciences, 1778, tome 97, séance du samedi 31 janvier 1778.

académiciens¹. Une partie de cet exposé est repris dans son traité (1781). Il termine son rapport en avisant sur les observations qu' "il seroit difficile d'en tirer, quant à présent, des conséquences relativement aux phénomènes généraux du flux et du reflux de la mer, mais elles méritent d'être conservées dans le dépôt de l'académie et je crois qu'on doit être sensible au zèle et à l'attention de l'académie de la Rochelle". Lalande a tenu parole car les observations se trouvent aujourd'hui conservées aux archives de l'Académie des Sciences, dans la pochette de séance du 31/01/1778. Par ailleurs, un autre jeu de ces mesures se trouve aux archives de la médiathèque de La Rochelle sous la cote MS783, p.153-160. Cette double sauvegarde, dans deux sites distincts est d'ailleurs, le meilleur gage de la pérennité des mesures.

Quelques jours avant d'exposer son rapport, Lalande remercia Seignette² :

Monsieur

Monsieur Seignette, assesseur au Présidial, second secrétaire perpétuel de l'académie à La Rochelle.

L'académie a reçu Monsieur les observations que vous avez bien voulu lui adresser avec votre lettre du 20 janvier. Comme c'est moi qui avais rédigé le mémoire, elle m'a chargé de lui rendre compte des observations de M. de Vialis, et actuellement elle me charge de vous en remercier. Nous voyons bien que la mer se retire trop de votre port pour qu'on puisse y faire des observations de la basse mer ; mais il viendra un temps on l'on connaîtra les rapports entre les marées totales, et les différences des hautes eaux, et pour lors vos observations ne seront points inutiles en attendant nous les garderons avec soin ; elles enrichiront notre dépôt ; elles seront une preuve intéressante du zèle de votre académie ; et nous ne laisserons pas ignorer ce fait à celles dont l'annulation a besoin d'être [...] par l'exemple.

Je suis enchanté Monsieur d'avoir eu cette occasion de vous assurer de ma considération distinguée avec laquelle je suis

Monsieur, Votre très humble et très obéissant serviteur
De la Lande

Au Collège Royal, le 18 mars 1778

Cette suite d'échanges permet de mieux comprendre les relations entre les différents protagonistes : demandeurs de mesures et observateurs. Le port de La Rochelle, même si sa situation rendait difficile la réalisation d'observations, a envoyé des données utiles à l'Académie. Ce qui n'est pas le cas des ports précédemment discutés.

3.5.3.5. A Toulon.

Toulon est la seule ville, en bord de la méditerranée, à avoir été proposée pour y observer le niveau de la mer. Ce port, unique arsenal maritime sur la façade méditerranéenne, a certainement été choisi par les savants pour cette unique raison. Aucune lettre à destination du ministère de la Marine n'a été trouvée contrairement à Lorient, Saint-Malo, le Havre et La Rochelle. Pourtant des observations ont bien été réalisées comme l'indique le procès verbal de l'Académie Royale des Sciences du mercredi 5 juillet 1780³. Lalande et Le Monnier [1715-

¹ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1778, tome 97, séance du samedi 28 mars 1778.

² Lalande. Lettre à Seignette, le 18/03/1778. Archives de la Médiathèque de La Rochelle, MS783, p.161-162.

³ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1780, tome 99, séance du mercredi 05 juillet 1780.

1799] sont alors chargés de les examiner. Les deux savants présentent leur rapport le samedi 19 août 1780¹, rapport dont des extraits² sont ici retranscrits :

Nous avons examiné par ordre de l'académie un mémoire sur les marées de la méditerranée par M. le c^{her} [chevalier] Dangos [1744-1833], officier au Régiment de Navarre.

Ce mémoire contient environ trois cents observations sur les marées dans le Port de Toulon en 1777 et 1778 faites avec une assiduité et une constance dont il y a peu d'exemple et dont peu de personnes seroient capables.

Le P. Feuillée étoit persuadé que l'effet des marées lunisolaires étoit insensible dans la méditerranée et que les différentes hauteurs de l'eau ne venoient que des vents. Le P. Pézenas dans les mémoires rédigés à l'observatoire de Marseille rapporta plusieurs observations faites en 1753 et 1754 mais il n'osoit décider s'il y avoit réellement une marée à Marseille ; la question dit il ne sera décidée que lorsque le nombre des observations qui tendent à établir le flux et reflux sera incomparablement supérieur à celui des observations contraires.

C'est ce nombre d'observations que le zèle de M. le Chevalier Dangos nous procure aujourd'hui accompagnées de l'état des vents et de l'eau pour tous les jours où il n'y avoit pas moyen de faire des observations exactes. [...]

[...] Il paroît donc que M. Dangos a faite tout ce qu'il étoit possible de faire pour constater les marées de la méditerranée ; il est à souhaiter que son exemple puisse engager d'autres observateurs à nous procurer des observations aussi bien faites dans d'autres parties de la méditerranée, spécialement dans le Golfe de Venise, en attendant nous croyons que celles de M. Dangos sont très intéressantes et très dignes d'être imprimée dans le recueil des savants étrangers.

Les mesures faites par le Chevalier Jean-Auguste d'Angos [1744-1833] à Toulon rappellent, par leur longueur et leur suivi, les observations faites au début du 18^{ème} siècle. Le mémoire n'a pas été trouvé dans le recueil des savants étrangers. Heureusement, Lalande (1781), reprend toutes les observations dans son recueil en fournissant quelques indications sur l'observatoire et la procédure d'Angos :

Les distances [hauteurs] sont prises du niveau de la mer à un point fixe, reconnu sur le revêtement du Quai de Toulon, à l'endroit du Port, qui est à-peu-près en face de l'Hôtel-de-Ville. [...] Malgré tous les soins que M. d'Angos a pris pour faire ces observations, il ne croit pas qu'on puisse y espérer une précision plus grande que celle d'une demi-heure pour le temps de la haute mer ou de la basse mer ; & cela est bien naturel, vu la petitesse & la lenteur de ce mouvement. Pour mieux juger des observations qu'il alloit rassembler, M. le Chevalier d'Angos prit la résolution de ne point s'occuper en les faisant, de la loi qu'elles pouvoient suivre ; de ne point penser à la position du ciel, ni même aux observations précédentes : par-là il se trouvoit exempt de toute espece de préjugé. C'est ainsi que l'on devoit faire les observations toutes les fois que l'on se propose de décider une question encore douteuse. On trouve au bas des observations de chaque moi l'état de la mer & la direction des vents, pour les jours où l'on n'a pu faire d'observations satisfaisantes.

D'Angos est allé au-delà des recommandations de Lalande (1777), en utilisant un point fixe pour mesurer les différentes hauteurs d'eau. Avec le marnage très tenu en méditerranée, le chevalier donne des incertitudes sur le temps donné des PM et BM ce qui est complètement innovant. Pour finir, comme l'explique Lalande, D'Angos réalisa ses observations en cherchant à rester le plus neutre possible des différentes hypothèses émises sur les mouvements de cette mer intérieure.

¹ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1780, tome 99, séance du samedi 19 août 1780.

² Lalande et Le Monnier. Rapport du mémoire des marées à Toulon. Archives de l'Académie des Sciences, pochette de Séance 19/08/1780.

3.5.3.6. A Brest.

Brest, dernier port de la liste établie par l'Académie étudié ici, jouit d'un prestige passé important avec les observations réalisées par Coubard entre 1711 et 1716. De Fourchy écrivait au ministère de la Marine en 1775 pour indiquer, au sujet des observations du niveau de la mer, que l'Académie connaissait à Brest, des personnes compétentes pour réaliser de telles mesures (cf. 3.5.2). Lalande (1781) indique également, qu'avant d'avoir retrouvé les données exécutées par Coubard, il demanda à Blondeau¹ [1723?-1783] d'en réaliser quelques unes en 1773. Les deux savants se connaissent, car ils appartiennent tous deux, depuis 1769, à l'Académie Royale de Marine installée à Brest.

Blondeau aidé par Lebourg, premier Pilote du Roi, Jezequel et Le Brun observèrent le niveau de la mer entre le 1^{er} août 1773 et le 8 juin 1775 avec "*peu d'interruptions*". Seule les hauteurs des PM étaient observées ainsi que la force et la direction du vent. D'autres indications portant sur l'observatoire donnent une idée précise de la méthode utilisée :

Il y a dans le bassin de Brest, entre l'Intendance & le Contrôle, deux grandes règles de bois, divisées en Pieds & en pouces par des lignes blanches sur un fond noir : elles sont placées au-dedans du bassin entre le pont & les portes busquées sur les deux murailles opposées, l'une du côté du Nord, l'autre du côté du Midi. C'est à l'échelle du Nord qu'on a fait ces observations. Les hauteurs sont comptées du dessus du radier, ou plutôt du seuil de l'écluse, c'est-à-dire, du fond, ou du sol de l'entrée de l'écluse, car le radier va en s'inclinant de 6 pouces depuis le seuil jusqu'à l'endroit où il est baigné par la mer, & où l'on a mesuré les abaissements de la marée.

Tout comme les hauteurs du niveau de la mer en Manche, présentées par Fourcroy de Ramecourt (cf. 3.4.2.2), celles mesurées par Blondeau ont pour zéro de référence, le fond de l'écluse ou du bassin. Les échelles, en bois, sont peintes en noires avec des traits blancs les segmentant tous les pieds et pouces. Lalande présente également la procédure de lecture des hauteurs lues sur l'échelle de marée :

J'ai vu par ces Observations, que souvent pour savoir à quelle hauteur avoit monté la mer, on regardoit le point de l'échelle qui étoit mouillé ; cette hauteur est toujours trop grande, par la levée de la mer ou le clapotage, qui fait que la vague frappe, se brise, & mouille quelques pouces au-dessus du véritable niveau de l'eau.

Cette méthode qui consiste à lire la marque mouillée la plus haute laissée par la mer n'est, comme l'indique Lalande, pas précise du tout à cause des vagues et de la houle. Ces hauteurs sont donc entachées d'une incertitude que Lalande donne à quelques pouces près. Malgré tout, il aurait été possible d'écarter toutes les hauteurs ayant été observées lors de forts coups de

¹ Blondeau Etienne-Nicolas (1723?-1783). Professeur Royal d'hydrographie entre 1756 et 1765 à Calais, il est nommé en 1765 professeur de mathématique aux écoles de la Marine à Brest et bientôt chargé de l'école royale d'hydrographie. Nommé à l'académie de marine en 1769, il sera l'un des membres les plus actif de l'institution. Le professeur perfectionnera, construira et entretiendra les boussoles et les baromètres de bord. Blondeau est également à l'origine du premier volume du mémoire de l'Académie Royale de Marine mais aussi en 1772 du premier almanach nautique français, destiné aux observations et longitudes en mer par la méthode des distances lunaires. Il a également travaillé très activement sur l'*Encyclopédie Méthodique de la Marine* avec Vial de Clairbois jusqu'à sa mort en 1783. Malheureusement, son nom, lors de la publication de cet ouvrage ne sera même pas indiqué permettant à Vial de Clairbois de récolter tous les honneurs. Source : Archives Nationales, MAR/C/7/32, fols n°5-6 n°22-23.

vents, sources d'importantes vagues, augmentant les incertitudes. De cette expérience, Lalande en tire la conclusion suivante :

Quand on n'a pas la facilité de préparer un tuyau dans lequel l'eau soit tranquille, il faudroit au moins avoir une manche attachée lâchement, & nageant à la surface de l'eau, qui, par sa situation, marquerait sur l'échelle à très-peu-près le point du niveau, ou de la surface moyenne de l'eau.

De ce constat, découle très certainement le point 2 du mémoire publié en 1777 (cf. 3.5.2). Malheureusement, Lalande n'a pas reproduit dans son traité (1781) les mesures qu'il avait commanditées préférant inclure celles de Coubard :

[...] mais comme dans les nouvelles Observations on n'a pas le terme inférieur, ou la basse mer, j'ai préféré de publier les anciennes. Cependant, l'avantage d'avoir dans les nouvelles Observations la force & la distinction des vents, fait qu'elles mériteroient aussi d'être publiées & consultées dans ces recherches [...]

Les données de 1773 à 1775 n'ont pas été retrouvées. Il est surprenant que Lalande n'ait pas su faire le nécessaire pour les transmettre dans les meilleures conditions alors qu'il avait été sensibilisé au problème de l'archivage lors de sa recherche des mesures de Brest entre 1711 et 1716, comme il l'indique dans son article de 1772 (cf. 3.5.1).

Le 25 novembre 1777, le comte d'Orvilliers [1708-1792], lieutenant général de la Marine, reçoit la demande du ministère de la Marine, de faire observer le niveau de la mer à Brest (cf. 3.5.1). Il y répond dès le 15 Décembre 1777¹ en indiquant avoir remis les exemplaires du mémoire de l'Académie aux directeurs du Port et à l'Académie Royale de Marine. Il joint à sa missive, l'arrêté de cette Académie intégralement transcrit ci-dessous :

L'Académie se charge avec plaisir, de faire les observations sur les marées, demandées par l'académie des Sciences autant qu'il sera en son pouvoir, se promettant beaucoup plus de son zele que de ses connoissances. Les S^{rs} fortin [?-?] et Blondeau, toujours Residants a Brest son chargés de suivre les détails des observations pour lesquelles il faut nécessairement avoir quatre hommes payés par le port. Pour être sur de surveillant nécessaires pendant l'année entiere, on ne peut rien specifier sur les fraix a faire qui doivent dependre des besoins momentanées, mais il paroît que la depense la plus considerable sera celle du payement toute l'année de quatre hommes assés intelligents pour Remplir les cases du tableau que L'académie se propose de faire pour les dittes observations. ./
Signé le C^{te} de Begues [?-?].

Dans ce texte, le Comte de Bègues fait état des difficultés financières occasionnées par la réalisation des observations plutôt que des spécifications mises en place. De son côté, le 26 décembre 1777, Blondeau écrit à Lalande qui reprend des extraits de ce courrier dans son traité (1781) pour lui apprendre qu'il est "chargé de dresser un modèle pour les Tables de d'Observations, qu'on le disposoit à élever un mât auprès de l'Amiral, vis-à-vis de l'Intendance, ou ver la mâtüre, avec un corps de pompe fixé au mât, & un piston dont la tringle fut graduée, pour les hauteurs". Dans cette description d'appareil, Blondeau innove par rapport aux indications du mémoire de 1777. Au lieu de réaliser un puits de tranquillisation, une échelle doit être installée avec un flotteur autour de l'échelle afin d'avoir

¹ d'Orvilliers, Lettre du 15/12/1777. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°24.

précisément la hauteur de la mer. Malheureusement, pour observer, il faut des ... observateurs. Cette lapalissade est l'argument donné par Prévalage, autre responsable à Brest, dans la lettre qu'il envoie à de Chabert¹ :

Brest Le 19 janvier 1778

Monseigneur

Mr de Chabert

Avant que l'académie eu fait ses propositions au sujet des observations à faire sur le flux et Reflux, elle avoit reconnu que les seuls hommes qui pouvoient lui-convenir, étoient des pilottes, parce qu'oultre, l'Economie, elle y trouvoit encore la sureté des observations, elle n'est pas hésité a vous en demander, si elle n'avoit pas senti quelle vous feroit une demande inutile, La classe des pilottes es trop peu nombreuse pour en pouvoir affecter quatre à cette operaton, on est souvent assés en peine, comment pourvoir les vaisseaux et frégattes, dont vous ordonnés l'armément, Mr Thevenard [1733-1815], à qui j'ai fait part de vos intentions ;m'a dit, n'en avoir que deux actuellement donc un hors de service, on ne scaît même pas ou prendre les quattres hommes qui vous ont été demandés. Ils ne sont point aisés à trouver, il les faudroit intelligents, exacts, assidus, et ne pas troubler leur ouvrage, quand même une fois ils y seront occupés, et voila ce quoi seroit impraticable avec des pilottes, que les nécessités du service, distrairoient souvent d'un moment à l'autre.

Je suis avec un profond Respect.

Monseigneur

Vôtre très humble et très obseissant serviteur ./.

Signé Prévalage [?/?].

Cette lettre sonne le glas de l'observatoire de Blondeau et des mesures du niveau de la mer souhaitées suivant le protocole de l'Académie Royale des Sciences à Brest. Il faut se remettre dans le contexte de l'époque : le 4 juillet 1776, les 13 colonies britanniques d'Amérique du Nord déclarent leur indépendance, fondant les Etats-Unis d'Amérique. La France participe très activement à cette guerre d'indépendance face aux Anglais en envoyant de nombreux navires de guerres, depuis le port de Brest notamment. Les accords de Versailles, signés en 1783 reconnaissent l'indépendance de ce nouveau pays. En connaissance des événements historiques de l'époque, la lettre de Prévalage prend alors tout son sens.

Pour autant, Thévenard, commandant de la Marine de l'Orient, cité dans la lettre de Prévalage envoya à l'Académie Royale des Sciences, des observations des marées au mois de janvier 1781², analysées par Lalande et Laplace. Malheureusement, aucun mémoire ne fut lu devant les académiciens. Lalande fait écho de ces observations dans son traité en indiquant qu'il s'agit d'une suite d'observations de 2 PM par jour, commencées le 1^{er} mars 1756 jusqu'au 30 juin 1778. Seuls les hauteurs sont indiquées. La force et la direction du vent sont inscrites durant 30 mois entre 1764 et 1766. Le service du port est à l'origine de ces mesures faites au même endroit que celles réalisées entre 1773 et 1775.

Par chance, les mesures envoyées par Thévenard sont restées dans la pochette de séance de l'Académie au jour du procès verbal³. Les observations sont couchées dans 3 cahiers avec, pour le premier d'entre eux, des indications sur la méthode employée pour les obtenir au nombre desquelles figurent les extraits suivants :

¹ Prévalage, Lettre du 19/01/1778. Archives Nationales, MAR/3/JJ/398, fol n°24.

² PV de l'Académie Royale des Sciences, 1781, tome 100, séance du mercredi 31 janvier 1781.

³ Anonyme. Observations, sur la plus grande hauteur de marée de chaque jour dans le Port de Brest. Archives de l'Académie des Sciences, pochette de Séance 31/01/1781.

Observations essentielles

Toutes ces hauteurs de marées sont prises au dessus du terre-plein, du fond des bassins ou formes. C'est-à-dire, par exemple que le 18 mars 1756, la mer à montée 19 pieds 10 pouces ce même jour au-dessus du pavé à l'endroit ou reposeroit le dessous du talon d'un grand vaisseau assis dans ce Bassin : Cet endroit et précisément à l'entrée du Bassin ; ou laquelle cuvette ou rigole, et la mer descend ordinairement de 20 à 30 pouces au dessous de ce pavé à l'endroit de la rigole suivant la force des marées dans les nouvelles et pleines Lunes ainsi dans le cas présent du 18 mars 1756, la mer aura sans doute descendu 24 à 26 pouces au dessous du niveau du Pavé de la rigole ; dans ce cas la mer aura marné d'environ 22 pieds au dessus du niveau de la basse marée.

Dans le mois d'avril 1756 ou la mer à monté 20 pieds (le 16) au dessus du fond de la rigole ; elle se sera sans doute retirée 26 à 28 pouces au dessous de ce même fond, à l'instant de la plus basse mer : ainsi le 16 avril 1756, la mer aura marné d'environ 22 pieds 3 ou 4 pouces.

Ces observations sont propres pour tous les jours de grande marée exprimées dans ce présent cahier et dans les deux suivants.

Deux règles graduées donnent les pieds et les pouces jour exprimées alternativement par de la peinture noire et blanche, posée verticalement contre les Parois de chaque bassin, ont fixées pour faire ces observations : La mer est toujours tranquille dans ces bassins : on n'y voit jamais le mouvement des vagues.

Ces graduations étant posées contre les parois latéraux du bassin, ne sont point opposées au cours direct du flot n'y du jusant, et l'opposition des surfaces préexistant vari icy, la hauteur de l'eau ne peu pas y être placée graduellement que 10 ou 20 pieds ou plus loin en deçà ou au-delà de la règle graduée

Au 1^{er} septembre 1757, page 8 on à commencé à observer la hauteur des deux marées du matin et du soir.

Ces observations se sont faites constamment nuit et jour aux Bassins du côté du Port [coté ville de Brest] et à ceux du Côté de Recouvrance, par les gardiens des Bassins dont la demeure fixe dans le Port et à la proximité des dites formes ne laissent aucun doute sur l'exactitude de ces présentes observations.

La situation des vents, leurs changements subis de l'aval à l'amont pour croître et décroître subitement les marées.

Les vents qui du NE passent au Sud et au SE font croître subitement le montant de l'eau. Ceux du NE soufflant pendant plusieurs jours, vont baisser considérablement les eaux ; mais elles ne montent pas autant que ce vent de face ou de SO.

En général ; tous les vents du Large poussent les Eaux vers le Nord Ouest ??? suspendüs intervalle les vents de terre, en particulier le NE, l'Est et l'ESE les poussent au large ??? en plus prolongé alors et la mer se retire le plus possible.

On voit souvent dans une lunaison, la marée s'accroître chaque jour de 5 à 6 pouces, alors ont dit que les marées augmentent lentement ; alors que les vents doivent venir du large, et qu'il soufflai avec force à 30 ou 40 lieues en mer ; ou qu'enfin le vent vient à augmenter subitement à forcée dans un Port. La mer y monte subitement de 18 à 24 pouces dans une seule marée ou Intervalle de 12 heures ; comme ou peu le Vériffier dans quelqu'uns du moins contenus dans la présente Collection.

Ces variations, fréquentes, innattendües, et incalculables pour voir combien l'exacte précision de la ligne ou depourviies dans la mesure sont inutiles pour les observations dont il s'agit ; elles prouvent qu'on ne peut voir en général quand grand la marche de la Mature sur l'objet en question ; et que les présentes observations suffiroient absolument, si la hauteur des plus basses marées (telles que nous offrons celles des plus hautes) avec quelques observations Intermédiaires entre ces deux Instants étoient jointe à cette Correction ; mais malheureusement ceux qui l'ont commencé n'ont postés leurs vües qu'aux besoin du service, dans les Ports et des manœuvres Locales.

Quoi qu'il en soit, on reconnoit icy, la marche des marées, comparées à celles de La Lune, au tems des Equinoxes et des Solstices.

La différence de force des marées du Soir à celles du matin, suivant les saisons. La proportion du mouvement des marées dans les syzigies avec celles des quadratures.

Le moment ou arrivent les plus grandes marée et les plus faibles marées de chaque lunaison, après l'instant des nouvelles et pleines Lunes et des premiers et troisièmes quartiers.

Nous joignons aux observations toutes celles qu'on a pû trouver sur la Direction et la forces des vents ; avec d'autres circonstances de l'Etat de l'atmosphere pendant le jour non Interrompu de 30 mois, c'est-à-dire depuis le 1^{er} Janvier 1764 jusque et compris le 30 Juin 1766. Ces dernieres observations sont précieuses pour démontrer l'influence qu'ont les vents sur les marées, et pour apprécier leur effets dans cette circonstance. Ces observatins de 30 mois non interrompüt sur les vents, faites l'un des observateurs de la hauteur des marées et portée par lui sur le même registre, prouvent qu'elles ont été biens faites puisque cet observateur, en Joinan ces observations les unes aux autres surtout l'utilité de leur Combinaison.

Nous regrettererons beaucoup de ne pouvoir offrir une suite d'observations aussi etendiüe sur les vent que sur les Marée ; si les deux années à venir (c'est-à-dire depuis janvier 1764 au 30 juin 1766) ne nous paroissent au moins suffisantes pour connoître l'effet des vents sur le montant de la Mer vers les Cotes, attendu que dans cet espace de tenir il y a des Incidens et des Variations dans les Vents qui doivent sufisamment indiquer les effets qu'ils ont les uns par Rapport aux autres.

On peut Enfin, Comparer dans les Tables, des Changements dans l'atmosphere ou arrive disent les marins les changements de Phases de la Lune, et avec les Equinoxes et Veriffiée. L'Effet que la position de ces astres par rapport à la Terre peut avoir sur l'Etat de l'air. Nous regrettons encore dans cette circonstance, de ne pouvoir offrir, avec l'observation des Marées et des vents, celles du Barometre et du Thermomètre qui seraient icy fort a propos pour leur être Comparée.

Les marins ou tous autres Observateurs pourra trouver icy que les présages des tempêtes, pour ??? Nord des Vents Leur Recul du Oüest vers le Sud, est bien fondé dans La pratique Vulgaire du navigateur.

On y reconnoitroit aussi les vents dominants dans chaque saison et ceux qui dominent généralement dans tout L'année ver la Côte de Bretagne, si les vents avoient étés observées pendant un plus grand nombre d'années dans ce Recüeil.

Les indications précédentes reprennent celles données par Lalande (1781). Les observations réalisées entre 1773 et 1775 par Blondeau ainsi que celles envoyées par Thévenard sont lues à partir des mêmes échelles de marées. Peut-être, que les mesures de 1773-1775 sont identiques avec cette longue série. Même si des données aux standards de l'Académie n'ont pas été obtenues à Brest à la fin des années 1770-1780, le commandant de la Marine de l'Orient, par l'envoi de ces trois registres, procure aux académiciens, la première longue série suivie du niveau de la mer pour un même site, un même observatoire. Il est surprenant que les académiciens n'en aient pas fait plus d'écho à l'époque car vingt-trois années consécutives de hauteurs de PM sont réunies dans un même document. Le manque des heures associées aux hauteurs et certainement la cause de cette indifférence. En effet, les deux éléments, indissociables, étaient indispensables pour les recherches de l'époque.

3.5.3.7. Bilan des mesures obtenues par l'Académie.

Les observations obtenues par l'Académie lors de la campagne de 1777 sont relativement modestes et ce, malgré l'appui de de Chabert et de Sartine, personnalités occupant les hautes sphères du ministère de la Marine. Les autorités des ports de Lorient, Saint-Malo, Le Havre, La Rochelle, Toulon et Brest, contactés individuellement par leur hiérarchie installée à Paris n'ont pas tous répondu de la même manière, aux desseins de l'Académie Royale des Sciences.

Les ports de Lorient et Toulon ont réalisé les observations en suivant de près les recommandations de Lalande (1777). Les villes de La Rochelle et Brest, ont envoyé des hauteurs du niveau de la mer s'éloignent de ces recommandations tout en fournissant des

explications. Enfin, les ports de Saint-Malo et du Havre, malgré des indications de bonne volonté n'ont rien fourni, ni à l'Académie, ni au ministère.

3.5.4. Observations éparses entre 1780 jusqu'en 1803.

Cette période trouble de l'histoire de France marque de nombreux tournants : naissance de la République française, conflit avec les pays frontaliers de la France, arrivée de Napoléon au pouvoir. Cette époque fut également pauvre en observations du niveau marin. Les savants de basse Normandie, Bordeaux, Guadeloupe et à Brest observèrent toutefois la mer.

3.5.4.1. Sur les côtes de basse Normandie.

En 1781, Le Gentil de la Galaisière [1725-1792], astronome de l'Académie Royale des Sciences, profite d'un voyage en basse Normandie pour étudier les marées. Son travail fut publié dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* de 1782. Le Gentil ne donne pas la procédure utilisée pour observer les niveaux de la mer ; il indique seulement : "*L'été de 1781 fut des plus favorables pour cette observation, les vents furent presque toujours, à la côte, très-foibles, & du Nord & nord-est, incapables d'arrêter ou de suspendre le soulèvement des eaux de la mer ; les vents d'ouest, quand ils soufflèrent, furent également si foibles qu'il ne furent point capables d'amonceler ses eaux sur nos côtes*". L'article contient très peu de données et les mesures originales n'ont pas été retrouvées.

3.5.4.2. A Bordeaux.

Le professeur de mathématiques, l'abbé Dupont de Jumeaux envoya à l'Académie des Sciences, des observations du niveau de la mer réalisées à Bordeaux au début du mois d'août¹. Les savants Lalande et Méchain [1744- 1804] furent chargés d'écrire un rapport, lu devant leurs pairs le 20 août 1783² :

Nous avons été chargés par l'académie d'examiner des observations faites sur les marées à Bordeaux, par M. L'abbé Dupont de Jumeaux, Professeur royal de Mathématiques.

Ces observations ont été faites devant la bourse de Bordeaux dans un endroit entouré de grands piquets que l'eau baigne toujours et où elle est plus tranquille que partout ailleurs ; on a fait attacher à un de ces piquets une grande planche exactement graduée.

L'auteur a observé la haute Mer au moment même du décroissement et la basse Mer à l'instant de l'accroissement parce que la plus grande hauteur de l'eau et son plus grand abaissement à chaque marée ne sont pas stationnaires.

Ces observations sont divisées en deux suites, la première s'étend depuis le 15 mars 1782 jusqu'au 25 du juin suivant ; la seconde s'étend depuis le 1^{er} mai 1783 jusqu'au 28 juillet dernier. M. l'abbé Dupont a marqué pour chaque jour le tems de la haute mer, la plus grande hauteur de l'eau au dessus d'un point fixe et le vent régnant, il a de même marqué une fois chaque jour le tems de la basse mer, la moindre hauteur de l'eau au dessus du même point fixe et le vent régnant.

Il semble, d'après les indications données par les deux astronomes, que Dupont de Jumeaux ait suivi à la lettre le protocole édicté par Lalande en 1777. Les deux savants le remarquent également car ils terminent leur rapport ainsi :

Les observations de M. l'abbé Dupont nous ont paru faites avec beaucoup de soin et d'exactitude ; il seroit à désirer que son exemple fut suivi dans tous nos ports : l'académie en a senti la nécessité depuis longtemps, et nous croyons que celles dont nous venons de lui rendre compte, méritent son approbation ./.

¹ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1783, tome 102, séance du samedi 09 août 1783.

² PV de l'Académie Royale des Sciences, 1783, tome 102, séance du mercredi 20 janvier 1783.

3.5.4.3. En Guadeloupe.

Les observations du niveau marin à Basse Terre, à la Guadeloupe, sont les premières réalisées hors de la métropole. A l'issue de la lecture du mémoire, par Tondu [1753-1793], lors de la séance de l'Académie du 9 juin 1784, Le Monnier, Lalande et Méchain furent nommés commissaires pour examiner et rendre compte du manuscrit¹. Dix jours plus tard², les savants rendirent leurs conclusions :

[...] Lorsque M. le Président a foulquier, nommé à l'intendance de la Guadeloupe vint demander à l'académie ses instructions sur les observations utiles qu'il pouvoit faire, l'un de nous lui remit une note relative aux marées. [...] le zèle de M. foulquier a parfaitement répondu à cette invitation et nous lui devons des observations intéressantes que M. Tondu n'auroit pû faire avec quelque exactitude si l'on n'eut creusé un Puit et prolongé un tuyeau dans la mer à 120 pieds de distance pour rendre insensible l'agitation perpétuelle de la mer et les raz de marée qu'on y éprouve sans cesse.

Ils terminent leur rapport par : "*[...] les observations de M. Tondu sont déjà très satisfaisantes et dignes de l'approbation de l'académie*".

Le mémoire de Tondu, trouvé aux archives de l'Académie³ rassemble les observations du 28 juillet au 27 septembre 1783, ainsi que les marées de syzygie. Les heures et hauteurs des PM et BM sont consignées. Les mesures sont accompagnées de la description de l'observatoire mis en place.

Les observations réalisées en 1783 à Basse Terre en Guadeloupe suivent à la lettre les recommandations de l'Académie : puits de tranquillisation, hauteurs et heures des PM et BM. Seules les observations météorologiques ne sont pas notées.

¹ PV de l'Académie Royale des Sciences, 1784, tome 103, séance du mercredi 09 juin 1784.

² PV de l'Académie Royale des Sciences, 1784, tome 103, séance du mercredi 19 juin 1784.

³ Tondu. Observations de la Marée faites en 1783 à la Basse terre Guadeloupe. Archives de l'Académie des Sciences , pochette de Séance 09/06/1784.

3.5.4.4. A Brest.

La fin de la décennie 1780 est fructueuse pour les études sur le flux et reflux de la mer. Lalande et Laplace publient tous les deux dans les *Mémoires de l'Académie des Sciences* de 1789.

Laplace, pour expliquer les lois régissant la marée envisage les mouvements de la marée sous un aspect dynamique en s'appuyant sur deux principes : oscillations forcées et superposition des petits mouvements. Pour appuyer sa théorie, Laplace utilisa les observations réalisées par Coubard entre 1711 et 1716 à Brest et demanda à ce que des mesures soient exécutées du 29 au 31 mars et du 13 au 15 avril 1790, autour des syzygies pour vérifier s'"il est possible que par la suite des temps, les phénomènes des marées changent dans un port". Le savant signale que les hauteurs de la mer furent mesurées tous les ¼ d'heure durant les 6 jours d'observations. Les données originales n'ont pas été jointes au mémoire et elles n'ont pas été retrouvées malgré nos recherches.

Afin de poursuivre ses travaux sur les marées des équinoxes déjà présentés dans le mémoire de 1772 et dans son ouvrage en 1781, Lalande demanda à Duval le Roy [1739-1810], mathématicien, professeur de l'Ecole de Marine à Brest et membre de l'Académie de la Marine lors de sa refonte en 1769, de lui procurer quelques observations du niveau marin à Brest en 1789. Guignace, responsable du Génie Maritime à Brest eut vent de la demande par Duval le Roy. Des ordres furent donnés pour réaliser les mesures. Lalande reprend celles observées du 27 au 29 mars 1789 dans son mémoire de 1789. Aucune autre explication n'accompagne les mesures hormis le fait qu'elles n'étaient pas associées à la force et direction du vent.

Toutefois, le mémoire se termine ainsi :

En 1792, M. Monge, ministre de la marine, et membre distingué de l'Académie des Sciences, a donné des ordres à Brest pour de nouvelles observations des marées que je lui ai demandées, et qui nous procureront de nouvelles lumières sur la question traitée dans ce Mémoire, parce qu'on aura soin d'y marquer la direction et la force du vent.

Lalande a donc très vraisemblablement rajouté ce commentaire juste avant l'impression du mémoire, comme il l'avait déjà fait pour celui de 1772 publié en 1775. Monge [1746-1818], mathématicien, académicien et, alors, ministre de la Marine (du 10 août 1792 au 10 avril 1793) a usé de ses fonctions pour faire réaliser des mesures du niveau de la mer comme l'attestent deux lettres¹². La première est écrite par le ministre pour Lalande :

¹ Monge. Lettre à Lalande, le 06/10/1792. Archives Nationales, MAR/10/JJ/503, fol n°503.

² Thevenard. Lettre à Monge et Lalande le 10/10/1792. Archives Nationales, MAR/10/JJ/503, fol n°503.

*Le citoyen La Lande de l'académie des Sciences
Paris le 6 8bre [octobre] 1792*

J'ai reçu citoyen, votre lettre du 1^{er} de ce mois, par laquelle, en observant que les observations faites à Brest sur les marées au commencement du siecle etant fort incompletes, vous demandez que le comdt [commandant] des armes en ce port soit chargé de faire faire pendant un an l'observation de la plus grande et de la plus petites hauteur de la mer, 4 fois dans le jour et pendant un an, dans un endroit qui n'asseche pas, de basse mer. Je suis trop jaloux du progrès des sciences et de l'accroissement d'utilité quelles pensent tirer de vos lumieres, pour ne pas m'empresser de concourir avec vous au perfectionnement des observations dont il s'agit. En conséquence, j'écris comme vous le desirez au citoyen Thevenard, à qui vous pourrez adresser le mémoire détaillé que vous me marquez avoir dressé pour diriger l'observateur.

Cette première lettre, prouve que c'est Lalande qui est à l'origine de la relance des observations du niveau marin à Brest. Il s'appuie sur Monge, académicien tout comme lui, pour que des mesures soient accomplies. La seconde missive est la réponse de Thévenard, commandant des armes à Brest, à la demande de Monge, le 10 octobre 1792 :

*Ports et Arsenaux
Le citoyen Thevenard*

*Brest Le 10. Octobre 1792
L'an 1^{er} de la République Française*

Citoyen Ministre

Conformément à vos ordres du 6. de ce mois, je vais donner ceux nécessaires pour qu'il soit fait quatre fois dans le jour, et pendant un an des remarques sur la plus grande, et la plus petite hauteur de la mer dans un lieu de ce Port qui n'asseche pas de basse mer. Est comme il est nécessaire de former avec soin le lieu, ou bâtir l'observatoire pour se précautionner contre le mouvement des vagues, j'attendrai le mémoire détaillé que L'Académicien La Lande se propose de m'adresser pour cet objet

*Le commandant des armes
Thevenard*

Dans cette seconde lettre, à l'attention de Monge et dont ce dernier a fait une copie à Lalande, Thévenard semble être en capacité de coopérer cette fois, contrairement à la situation de 1778 (cf. 3.5.3.6). Les deux missives montrent que Lalande doit fournir un mémoire détaillé pour diriger cette entreprise. Les mesures doivent être réalisées 4 fois par jour, lors des PM et BM durant une année entière. Lalande écrit dans l'*Abrégé d'Astronomie* composé en 1795 que : "*L'année 1793 m'a encore fourni des observations suivies faites à Brest jour par jour avec soin. Le citoyen Monge, alors ministre de la marine [...] je [Lalande] m'adressai à lui ; il donna des ordres à Brest ; il fut très bien secondé, et j'espère publier ses observations [...]*". Lalande (1793) apporte quelques renseignements sur l'observateur : il s'agit de C. Raillard [-], lieutenant de vaisseau¹. Malheureusement, Lalande ne publiera jamais ces mesures disparues depuis.

Pour faire patienter les savants, le 22 janvier 1793, Thévenard transmet un ensemble de hauteurs observées au bassin de Brest entre 1778 et 1792. Il s'agit simplement de la poursuite des mesures réalisées entre 1756 à 1778 et envoyées en 1781 par Thévenard (3.5.3.6). Pour ce nouveau jeu de mesures, le principe d'obtention est identique : seules les hauteurs des PM étaient notées sans indication d'heure. Le registre² est accompagné des indications suivantes :

¹ Lieutenant de vaisseau : grade identique à celui de Capitaine pour les armées de terre ou de l'air.

² Hauteurs de marées, observées au bassin de Brest. Observatoire de Paris, cote B-5.5.

Bureau de la dépêche. Paris 22 janvier 1793, L'an 2 de la République.

Le ministre de la Marine et ses Colonies au Citoyen Lalande de l'académie des Sciences, au collège de France, place Cambray, à Paris.

Je vous envoie, Mon cher Confrère, un registre que m'a fait passer pour vous être remis le Citoyen Thévenard Commandant de la Marine à Brest. Ce registre contient la hauteur des marées observées au bassin de Brest depuis le commencement de 1778 jusque et compris 1792. Je vous prie [...] Monge

Hauteur des Marées observées pour le bassin de Brest, depuis le commencement de l'année 78 jusque 92.

Ce registre, envoyé en janvier 1793 à Monge est transmis à Lalande. Ce dernier y inscrit un report sur la première page du manuscrit : "*Voyez le Traité de Flux et du Reflux p.233 sur l'échelle de ces hauteurs*", traité (1781) repris dans la section 3.5.3.6.

Comment expliquer que ce registre se trouve conservé à la bibliothèque de l'Observatoire ? Lalande, entre 1795 et 1800 fut directeur de l'Observatoire de Paris ; en effet, le 8 août 1793, la Convention supprimait toutes les académies. L'Académie des Sciences ne retrouvera son autonomie qu'en 1816 tout en continuant à faire partie, encore aujourd'hui, de l'Institut de France, organisme fondé en 1795. Il est alors simple de croire que c'est durant cette période où Lalande occupait la fonction de directeur, que le document fut ajouté aux archives de l'Observatoire.

Or, l'explication de la conservation de ce registre à la bibliothèque de l'Observatoire est tout autre : lors de la séance du 26 avril 1815 du Bureau des Longitudes, Lefrançois de Lalande (1766-1839), astronome, membre du Bureau des Longitudes (cf. 4.1) mais surtout neveu de Lalande "*présente un tableau des marées observées au bassin de Brest depuis 1778 jusques et compris 1792. Ce volume avait été destiné à la bibliothèque de l'Académie des sciences. M. Lefrançois Lalande en fait hommage à la bibliothèque de l'Observatoire.*"¹. Il est possible que Lalande ait conservé ce registre loin des tumultes révolutionnaires chez lui. Probablement après la disparition de Lalande en 1807, son neveu travaillant en étroite collaboration avec son illustre parent a eu accès à ces papiers personnels. A la vue de ce registre, il a souhaité le faire partager aux autres savants. Il est alors difficile de croire, que les mesures commanditées par Lalande à Brest entre 1773 et 1775 se soient trouvées avec celles de 1778 et 1792. Auquel cas, elles auraient été certainement transmises par Lefrançois de Lalande.

Pour autant, les observations de variation du niveau de la mer reprennent dès 1795 comme l'écrit Lalande dans son chapitre de l'astronomie pour l'an III de la République française (1795) : "*Déjà nous avons obtenu des observatoires à Brest et à Toulon, où la marine les réclamait depuis long-tems ; des observations sur les marées de Brest, pour servir de suite à celles que M. Monge nous procura en 1793, lorsqu'il était ministre de la Marine, mais où les heures n'ont point été marquées*"². Ni pour Toulon, ni pour Brest, les mesures n'ont été trouvées.

Alors que les mesures sont rares et difficiles à obtenir, il est étrange de voir que Laplace et Lalande, chacun de leur côté, aient demandés pour leur compte personnel des observations du

¹ PV du Bureau des Longitudes, 1170^{ème} séance du 26 avril 1815.

² Bureau des Longitudes (an VI – 1798). Connaissance des tems à l'usage des astronomes et des navigateurs pour l'année VIII de la République du 23 septembre 1799 au 23 septembre 1800, anc. st. Paris, imprimerie de la République,

niveau marin sans chercher à les transmettre et/ou à les partager. Est-ce à cause d'une compétition personnelle entre les deux savants que les mesures n'ont pas été publiées ? Aucun document ne tend à confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Chapitre 4. L'Institut de France et le Bureau des Longitudes, nouveaux commanditaires d'observations, pour le compte de la République.

"Maintenant que nous n'avons plus rien à désirer sur la théorie du flux et reflux de la mer [...] il est temps de multiplier et de perfectionner les observations [...]". Lévêque, Rochon et Laplace. Mémoire sur les observations qu'il est important de faire sur les marées dans les différents ports de la république (26 floréal an 11).

Avec l'avènement de la Première République, les années 1790, révolutionnèrent en profondeur les unités de mesures en usage, le calendrier et naturellement les institutions françaises. Le calendrier républicain qui se substitue au calendrier grégorien est fixé par la Convention le 5 octobre 1793, mais commence rétroactivement à partir du 22 septembre 1792, jour de l'établissement de la première République. Ce calendrier sera annulé par Napoléon à partir du 1^{er} janvier 1806 avec retour au calendrier grégorien¹. Durant cette période, les dates seront toutes indiquées avec le calendrier grégorien avec parfois les deux calendriers.

4.1. Présentation des deux entités.

L'Institut de France, fondé en 1795 rassemble trois "classes" lors sa fondation : la classe des sciences physiques et mathématiques ; la classe des sciences morales et politiques ; la classe de littérature et des beaux-arts ; et ce, contre cinq aujourd'hui. A partir de 1835, l'Académie des Sciences retrouvera une grande indépendance, vis-à-vis de l'Institut grâce à la publication des *Comptes Rendus à l'Académie des Sciences*, revue scientifique impulsé par Arago² [1786-1853], astronome, député [1830-1852], ministre de la Guerre et de la Marine [24/02/1848-04/05/1848], élu membre de la 1^{ère} classe de l'Institut National des Sciences et des Arts, le 18 septembre 1809.

¹ URL : <http://www.imcce.fr/page.php?nav=fr/ephemerides/astronomie/Promenade/pages4/435.html> (consulté le 5 octobre 2008).

² URL : http://www.institut-de-france.fr/rubrique_-l_organisation_de_l_institut_de_france.html?arbo=51&page=785 (consulté le 5 octobre 2008).

Tout comme l'Institut de France, le Bureau des Longitudes fut fondé le 7 messidor an III (25 juin 1795). Cet organisme a pour rôle l'amélioration de la détermination des longitudes en mer, la rédaction de *La Connaissance des Temps*, l'*Annuaire* du Bureau et le perfectionnement des tables astronomiques. En outre, il avait sous sa responsabilité l'Observatoire de Paris, l'Observatoire de l'École Militaire et tous les instruments d'astronomie appartenant à la Nation¹.

4.2. Méthode proposée en prairial, an XI (avril-mai 1803) par la commission de l'Institut.

Depuis 1777 et le mémoire écrit par Lalande pour faire observer le niveau de la mer, aucune nouvelles mesures n'avaient été ordonnées en France hormis celles du Ministre de la Marine en 1792 (cf. 3.5.4.4). La situation exceptionnelle de l'époque l'explique aisément. Une commission, réunissant Laplace, mathématicien, membre du Bureau des Longitudes, Pierre Lévêque [1746-1814], examinateur hydrographe de la Marine, et Alexis Rochon [1741-1817], astronome, rédigèrent ce nouveau protocole. Ces deux derniers savants furent également membres de l'Académie Royale de Marine, supprimée le 8 août 1793, tout comme l'ensemble des académies en France à cette époque².

4.2.1. Origine.

Lors de la séance de la classe des sciences physiques et mathématiques de l'Institut, le 28 Germinal an XI (18 avril 1803), Laplace fut chargé de rendre compte des premières observations des marées réalisées à Calais du 2 au 4 germinal an XI (23-25 mars 1803) par le ci-devant marquis Alexandre Honoré de Baynast de Septfontaines [1715-1803]³. Ce dernier adressa 2 mois plus tard, de nouvelles observations sur les marées, faites toujours au même port entre le 29 décembre 1783 jusqu'au 26 décembre 1784⁴. Le 12 floréal an XI (2 mai 1803), Laplace rendit compte devant les autres membres de ses conclusions pour les premières mesures. Au terme de la lecture, Lévêque, Rochon et Laplace furent nommés dans une commission chargée de réaliser un mémoire sur les marées⁵.

¹ URL : <http://www.bureau-des-longitudes.fr/histoire.htm> (consulté le 5 octobre 2008).

² URL : <http://www.academiedemarine.com/lacademie/250plus.htm> (consulté le 5 octobre 2008).

³ PV des séances de l'Académie Ans VIII, XI, tome 2, séance du 28 Germinal an XI, p.643.

⁴ PV des séances de l'Académie Ans VIII, XI, tome 2, séance du 17 Prairial an XI, p.673.

⁵ PV des séances de l'Académie Ans VIII, XI, tome 2, séance du 12 Floréal an XI, p.659.

4.2.2. Mémoire rédigé par Lévêque, Rochon et Laplace le 26 Floréal an XI.

Au cours de la séance du 26 floréal an XI (16 mai 1803), Lévêque, au nom de la commission, lut un mémoire "*sur les observations qu'il est important de faire sur les marées dans les différens ports de la République*". Delambre [1749-1822], secrétaire perpétuel, signa l'adoption de ce Mémoire et arrêta qu'il soit imprimé séparément à ses frais et distribué aux membres de l'Institut¹. Cette spécification est retranscrite entièrement ci-dessous² :

Mémoire sur les observations qu'il est important de faire sur les marées dans les différens ports de la république au nom d'une commission, par P. Lévêque.

*Imprimé par ordre de l'Institut
Paris. Baudouin, Imprimeur de l'Institut national
Prairial AN XI (1803).*

Mémoire Sur les observations qu'il est important de faire sur les marées dans les différens ports de la République.

Lu dans la séance du 26 floréal an 11 (16 mai 1803).

Dans sa séance du 12 floréal dernier la classe a nommé une commission composée des citoyens Laplace, Rochon et moi (1), pour lui proposer un plan d'observations à faire sur les marées dans les différens ports de la République. Le mémoire suivant renferme les vues des commissaires sur cet important objet.

Dans les sciences naturelles, les théories ne sont d'abord qu'une explication plus ou moins ingénieuse des phénomènes, qui est nécessairement subordonnée au nombre des faits connus et à la précision avec laquelle ils ont été observés : ce n'est, à proprement parler, qu'une espèce de cadre plus ou moins étendu qui embrasse ce qu'on connoît sur l'objet dont il s'agit.

On demeure long-temps attaché à ces premières théories, ou plutôt à ces premières ébauches ; le temps et l'autorité des auteurs leur donnent même une sorte de sanction dont l'effet est de dispenser d'observer autant qu'il seroit nécessaire, et par-là de rendre la science stationnaire pendant d'assez longs intervalles de temps. Ce n'est guère que lorsque la masse des faits devient assez imposante par leur ensemble, qu'on se résigne enfin à abandonner ces explications prématurées, pour adopter d'autres principes. L'expérience est le premier et le principal instrument de toutes nos connoissances physiques ; cependant il a fallu que l'esprit humain ait fait de grands progrès pour en être bien convaincu : aussi la philosophie expérimentale est-elle une science toute moderne.

Mais si le nombre et la précision des observations peuvent seule donner naissances aux véritables théories, d'un autre côté ce n'est que lorsqu'on est parvenu à connoître les véritables lois de la nature qu'on sent bien la nécessité des bonnes observations ; et ce n'est aussi qu'à cette époque que, dans chaque partie des sciences naturelles, l'art d'observer fait de véritables progrès et qu'il étend son domaine.

Parmi les grands phénomènes de la nature celui du flux et reflux de la mer a toujours été un objet d'admiration pour tous les hommes, et de méditation et même de tourment pour les philosophes. – Pithéas soupçonna que les marées étoient réglées par la Lune ; Strabon en a passablement bien

¹ PV des séances de l'Académie Ans VIII, XI, tome 2., séance du 26 Floréal an XI, p. 663.

² Mémoire sur les marées à observer. Archives Nationales, MAR/10/JJ/503, fol n°36/1.

décrit les principaux phénomènes, et de temps en temps on a vu paroître différentes opinions sur les causes du flux et reflux de la mer, dont la plus remarquable par le nombre et le caractère de ses partisans est celle de Descartes. On trouve à la vérité quelques passages dans les auteurs anciens, qui en attribuent la cause à l'attraction des corps célestes : mais ces idées, qui n'étoient que de simples aperçus, sont demeurées stériles jusqu'à Newton, parce qu'on n'a pas réellement de véritables connoissances lorsqu'on n'est pas assez avancé pour les soumettre à l'analyse et en faire l'objet d'un calcul rigoureux ; ce n'est proprement qu'à cette époque que la science commence.

Les observations les plus grossières et même les plus circonscrites à une localité ont dû, longtemps avant Pithéas, faire soupçonner que les marées sont réglées par la lune : tous les habitans des côtes de l'Océan en ont dû être promptement convaincus. Ainsi tout annonçant ce fait avec la même évidence que le retour des saisons, on ne peut attribuer une grande gloire aux auteurs qui en ont parlé les premiers : ce n'est pas là, à proprement parler, une découverte, ni même une observation tant soit peu profonde. Jusqu'à Newton on a été dans plus complète ignorance des vraies causes de ce merveilleux phénomène ; jusqu'à lui on n'a cessé de s'égarer dans de vaines hypothèses, et on étoit bien loin de soupçonner qu'il étoit soumis à la même loi qui règle et détermine les mouvemens des différentes parties du système planétaire.

Malgré cette profonde ignorance des causes, la navigation, cet art qui met tous les autres à contribution, a de bonne heure tiré un grand parti des effets. Il a suffi d'observer que le retard journalier des marées est sensiblement uniforme, qu'elles reviennent aux mêmes heures tous les quinze jours, et que les plus fortes ont lieu au temps des nouvelles et pleines lunes ; il a suffi, dis-je, de ces connoissances de fait pour pouvoir calculer l'heure de la haute mer avec une précision dont on se contentoit, et qui même étoit suffisante pour les besoins de ces premières époques.

Maintenant que nous n'avons plus rien à désirer sur la théorie du flux et reflux de la mer, que, graces aux progrès de l'analyse depuis Newton, on a suivi tous les détails et calculé tous les effets avec la précision qu'on exige dans le calcul des phénomènes astronomiques ; il est temps de multiplier et de perfectionner les observations, non pour confirmer une théorie qui n'a plus besoin de l'être, mais pour assurer la détermination de plusieurs points délicats du système du monde, et aussi pour rendre raison à quelques anomalies apparentes qu'on remarque dans quelques régions du globe, et pour leur assigner leur véritable cause. On est bien certain que ces anomalies sont une suite du mouvement général, qui se trouve modifié par des circonstances locales ; mais il faut pouvoir évaluer l'influence de ces circonstances dans chaque port, et cela ne peut se faire que par de bonnes observations.

La sûreté de la navigation est d'ailleurs fortement intéressée à ces observations, et aux résultats qui doivent en être la suite ; car, vu le grand tirant d'eau des vaisseaux, il importe beaucoup qu'on puisse calculer avec précision l'heure de la haute mer, non seulement dans l'intérieur des ports, mais plus particulièrement encore dans les endroits épineux qui sont vers leur embouchure, où les vaisseaux ne peuvent passer avec sûreté qu'au moment de la pleine mer. Il faut pouvoir régler sa navigation de manière à ne se trouver dans ces passages dangereux qu'au moment où ils cessent de l'être, c'est-à-dire vers le temps de la haute mer. Enfin toute la navigation côtière a le plus grand besoin de connoissances exactes sur le mouvement des marées : or il est temps de mettre la main à l'œuvre, pour faire jouir la marine et le commerce des avantages résultans de l'état actuel de nos connoissances. L'utilité publique est le seul but des méditations et des recherches des physiciens géomètres.

Au commencement du dernier siècle, l'Académie des sciences sentit vivement la nécessité d'avoir de bonnes observations : elle présenta à M. le comte de Pontchartrain, alors chargé du département de la marine, un mémoire en forme d'instruction sur la nécessité de charger des personnes habiles et intelligentes d'observer le flux et reflux de la mer, et sur la méthode que l'on doit suivre pour faire ces observations. Le P. Gouye et La Hire, rédigèrent ce mémoire d'après les vues de la compagnie. Le ministre chargea de ce travail les professeurs de navigation établis dans

les ports, l'Académie reçut plusieurs suites d'observations, dont les principales furent celles faites à Dunkerque et au Havre pendant les années 1701 et 1702, les premières par M. Baert, et celles du Havre par M. Bossaye du Bocage, tous deux professeurs de navigation.

Cassini fils a discuté ces observations dans les Mémoires de l'Académie de 1710, ainsi que d'autres plus anciennes faites à Brest en 1679 et Baïonne en 1680, par La Hire et Picard. Il a pareillement discuté, dans les Mémoires de 1712 et de 1713, une longue suite d'observations faites à Brest dans les années 1711 et 1712 : elle fut commencée par M. Montier, puis continuée et étendue jusqu'à 1716 par M. Coubart, habile professeur de navigation. Ces dernières expériences sont particulièrement recommandables par leur nombre et les attentions qu'on y a apportées. On doit regretter que les observations de l'année 1713 aient été perdues.

Quoique Cassini fût attaché au système de Descartes, qui étoit alors en vogue, il n'en est pas moins vrai que son travail au sujet des observations dont nous venons de parler, a été très-utile, et que pendant long-temps il a formé les seules connoissances positives que nous ayons eues sur le cours des marées. C'est avec le secours de ce travail que D. Bernoulli, aidé d'ailleurs de la théorie, a formé sa Table du retardement des marées, qui a été et est encore si utile aux navigateurs. Les systèmes prématurés périssent, mais les faits sont éternels. Nous pourrions citer une foule d'occasions où l'Académie des sciences a eu non seulement en vue les progrès rationnels des sciences, mais leur application aux plus grands objets d'utilité publique : aucune société savante n'a porté aussi loin sa sollicitude à cet égard ; la marine sur-tout lui aura d'éternelles obligations. C'est à l'Académie des sciences que l'Europe maritime est redevable des premières lumières sur la théorie de la construction des vaisseaux, sur leur manœuvre, etc. ; c'est aussi de son sein que sont sorties les premières notions judicieuses sur le jaugeage des vaisseaux, etc.

Outre la théorie, le calcul des marées repose sur des faits, il repose principalement sur la connoissance de ce qu'on appelle l'établissement des ports. Nous en avons, à la vérité, des tables très-étendues ; mais cette partie a besoin d'être rectifiée, et appelle votre sollicitude. L'établissement de la majorité des ports n'est pas connu avec la précision que comporte l'état de nos connoissances, ni même avec celle qu'exige la sûreté de la pratique. Une chose assez étrange, c'est que les dernières expéditions autour du monde nous ont fourni, pour des régions éloignées de nous de plusieurs milliers de lieues, des données plus précises que celles que nous avons pour beaucoup de ports de notre voisinage, et que nous fréquentons tous les jours.

La suite des observations de Brest, dont nous avons parlé forme un ensemble dont la théorie fournit tous les résultats avec une précision imposante. De semblables matériaux pour les autres ports ne laisseroient sans doute plus rien à désirer pour la pratique ; mais il seroit toujours utile d'observer, sur-tout dans les circonstances où causes concourent ensemble pour donner les plus grandes ou les plus petites marées. Il seroit donc important de faire des observations lorsque le périhélie ou l'apogée de la lune et du soleil concourent avec la syzygie ; lorsque le périhélie de la lune, concourant avec la syzygie, ces deux astres sont voisins de l'équateur ou des tropiques, etc. Les marées de quadratures, quoique moins importantes pour les opérations du service maritime, ne présentent pas moins d'intérêt dans leur marche, et, dans tous les cas, les observations deviennent importantes pour évaluer l'effet des circonstances accessoires. On observe sans cesse les éclipses, quoiqu'il ne soit nullement nécessaire de vérifier les principes sur lesquels leur prédiction est établie.

La marée de la nouvelle lune de germinal [mars – avril] dernier fournit un exemple de l'utilité des observations : elle a été observée à Brest par notre confrère Rochon. Les circonstances étoient des plus favorables pour produire une très-grande marée, et cela est effectivement arrivé ; mais ce qui rend cette observations vraiment importante, 'est que le temps s'étant trouvé presque calme, cette marée a été uniquement produite par la cause générale, sans aucune complication météorologique, et qu'elle n'en a pas moins été une des plus fortes qu'on ait encore observées dans ce port. Les observations de cette marée, faites à Calais par M. Septfontaines, sont aussi

très-importantes.

D'après toutes ces considérations, la classe, dont l'objet principal est d'étendre ses recherches sur tous les objets d'utilité publique, ne peut manquer de prendre un grand intérêt au plan d'observations que nous allons lui proposer, et qui doit servir d'instruction aux personnes qui seront chargées de son exécution. Cet exemple ne peut d'ailleurs manquer d'être suivi par les nations étrangères. La classe a sur ce dernier point une influence réelle par sa correspondance.

Votre commission pense,

1°. Qu'on doit multiplier les observations autant qu'il sera possible.

2°. Qu'il est sur-tout essentiel d'observer toutes les circonstances des marées des jours des syzgies et des quadratures, ainsi que celles des marées des trois jours qui suivent ces phases.

3°. Les observateurs devront tenir un journal de leurs observations. Ce journal doit être assez circonstancié pour faciliter le dépouillement, la comparaison et la discussion des observations. La forme en est indifférente ; mais vos commissaires pensent que des tableaux distribués en colonnes ainsi qu'il suite, conviendroient très-bien.

A la tête de la page de chaque mois on écrirait l'heure vraie des phases de la lune, réduite au méridien du lieu

La première colonne contiendrait le quantième du mois ; la deuxième, le temps vrai du passage de la lune au méridien du lieu, en heures et minutes ; dans la troisième on marqueroit l'heure vraie de la haute mer ; dans la quatrième, la hauteur de la marée en mètres et décimales du mètre ; dans la cinquième, l'heure vraie de la basse mer, et dans la sixième le degré désigné par l'échelle au moment de la basse mer.

Une septième colonne contiendrait le diamètre apparent du soleil au moment de la haute mer ; une huitième, la déclinaison du soleil au même instant, en degré et minutes seulement. Enfin la neuvième et la dixième colonnes contiendroient, l'une le diamètre apparent de la lune au moment de la haute mer, et l'autre la déclinaison de la lune au même instant, exprimée en degrés et minutes seulement. On pourra même se contenter de remplir ces quatre dernières colonnes pour les observations de marées des jours des syzgies, des quadratures et des trois jours suivans.

A ces dix colonnes principales il sera utile d'ajouter une colonne de remarques et d'observations particulières, dans laquelle on écrira l'état de l'atmosphère, principalement la direction du vent et sa force pendant la durée du flot et du jusant ; on y marquera aussi la direction de la marée montante et descendante. Quoi-qu'il ne paroisse pas indispensable de tenir note de la hauteur du baromètre et du degré du thermomètre, il est toujours utile d'inviter les observateurs à marquer, autant qu'il leur sera possible, ces deux élémens dans leur journal d'observations.

4°. Le premier soin des observateurs sera l'établissement de l'échelle métrique des marées. Chacun choisira dans sa localité l'endroit le plus convenable et le plus à sa portée ; on aura sur-tout soin que le zéro de cette échelle ne reste jamais à sec, même dans les plus basses eaux.

Vos commissaires pensent que, dans les départemens maritimes, le lieu d'observation doit être hors de l'enceinte du port, afin d'éviter les embarras inséparables des grands mouvemens maritimes, et pour avoir la faciliter d'y communiquer pendant la nuit. Ils jugent aussi en général que l'extérieur du port est plus convenable que l'intérieur pour avoir de bonnes observations : ils proposent en conséquence qu'à Brest l'échelle métrique soit établie sur la rade, dans le voisinage de l'observatoire, et que ces observations soient comprises dans les attributions du directeur et sous-directeur de l'observatoire.

Dans les lieux où les marées s'élèvent à une hauteur telle que les vaisseaux du premier rang peuvent passer sans danger dans des endroits qui étoient à sec quelques heures auparavant, comme il arrive à Saint-Malo et à Granville, il ne sera pas toujours facile de se procurer une échelle propre à marquer la haute et la basse mer. Dans ce cas, l'observateur établira deux portions d'échelle, l'une pour évaluer la haute mer, et l'autre pour la basse mer, et, par un nivellement exact, il déterminera combien le zéro de la première échelle est élevé au-dessus du zéro de la seconde. Ce dernier parti à plusieurs avantages, et est même indispensable dans les localités où la mer laisse une grande plage à découvert.

Autant qu'il dépendra d'eux, les observateurs feront en sorte que ces échelles soient fixes et

permanentes : en conséquence ils les établiront sur les jetées, sur le revêtement des fortifications, et, en cas de besoin, sur les rochers ; ils auront soin qu'elle soient, autant qu'il sera possible, à l'abri, afin que la grande houpée de la mer, dans certains cas, ne nuise pas trop à la précision des observations et ne les rende pas trop incommodes.

Les observations faites en 1701 et 1702, par M. Baert, présentent un appareil commode employé par ce professeur pour diminuer l'effet de ces oscillations nuisibles, lequel a été ensuite employé à Brest dans les dernières observations que nous avons rapportées. Cet appareil consistoit en un tuyau carré, formé de quatre planches, ouvert par le bas et fermé en haut par un couvercle percé d'un trou à son milieu. Ce tuyau étoit placé verticalement, fortement contenu, et entouré qu'une guérite pour mettre l'observateur à couvert et lui donner le moyen d'observer commodément. Dans l'intérieur du tuyau étoit un flotteur ou espèce de piston fort léger, surmonté d'une longue tige, mince et légère, de bois ou d'un fil de métal, qui sortoit hors du tuyau, et marquoit par ses divisions la hauteur de la marée au-dessus d'un terme fixe. On sent qu'on pourroit aussi surmonter le tuyau d'une planche verticale, blanchie, et divisée convenablement, et faire marquer la hauteur de la marée sur cette planche par l'extrémité de la tige ; on pourroit même adapter un crayon à l'extrémité de la tige, qui tracerait sur la planche, l'ascension de l'eau et fourniroit le moyen d'avoir la hauteur de la marée dans l'absence de l'observateur. Au reste, vos commissaires abandonnent tous ces détails à l'industrie des observateurs ; la seule condition essentielle étant l'exactitude, rien d'ailleurs n'étant difficile.

Il seroit à désirer qu'on établit des échelles métriques de marée dans tous les ports ; elles seroient d'ailleurs utiles à d'autres objets de service maritime : mais comme on ne peut s'attendre que cela s'exécute par-tout où il seroit nécessaire, du moins aussi promptement qu'il est à désirer, vos commissaires pensent qu'il est indispensable de faire ces établissements dans les endroits principaux, comme à Brest, à l'Orient, à Saint-Malo, à Cherbourg, au Havre, à Dunkerque et à Flessingue. Ils observent de plus qu'il y a beaucoup d'endroits où les observations dont il s'agit peuvent se faire aisément et sans aucuns frais : ce sont ceux où l'état entretient des gardiens de jetées, de feux, de signaux, etc. pour la sûreté de la navigation, tels qu'au Boucaud, à Cordouan, aux tours de Chassiron et de la Baleine, au Pilier, dans divers points des côtes de Bretagne, à Granville, à Cherbourg, à Dieppe, etc. Ces gardiens peuvent aisément être stylés pour faire le matériel des observations, par les professeurs de navigation dans les ports où il y en a d'établis, et dans les autres endroits par d'autres personnes qui s'en feront un devoir et un plaisir.

5°. Le moment de la haute mer est un point essentiel à déterminer : il faudra donc que les observateurs s'assurent avec exactitude du temps vrai. Dans les lieux où comme à Brest, il y a un observatoire, cela sera facile ; mais dans les autres ports on déterminera le temps vrai par les hauteurs correspondantes, prises avec un octant, ou avec un sextant, ou avec un cercle de réflexion, au moyen d'un horizon artificiel ; et à défaut d'horizon artificiel fait exprès, l'observateur pourra faire usage de la réflexion de l'eau, en garantissant le vase de l'action du vent.

Pour avoir plus exactement le moment de la haute mer, on observera, dans l'intervalle d'environ une demi-heure avant la haute mer, les heures auxquelles la mer répondra à différentes divisions de l'échelle, et lorsqu'elle descendra on observera pareillement quelle heure elle arrivera aux mêmes divisions. Alors la moitié de l'intervalle de temps compris entre deux observations correspondantes indiquera l'heure de la haute mer d'après ces deux observations correspondantes, par un milieu entre tous les résultats, on conclura l'heure de la haute mer avec tout la précision qu'on peut désirer.

6°. Le moment précis de la basse mer, c'est-à-dire celui où elle cesse de descendre, est également un objet essentiel. Pour le déterminer on doit pareillement faire usage d'observations correspondantes. En conséquences, aux environs d'une demi-heure avant la basse mer l'observateur notera l'heure à laquelle l'eau arrivera successivement à différentes divisions de l'échelle, et lors du retour du flot, il notera également l'heure à laquelle la mer parviendra aux mêmes divisions ; d'où il conclura l'heure du plus grand abaissement de la mer.

7°. Dans les endroits où l'on n'aura aucune des commodités dont nous venons de parler, on pourra encore y faire des observations utiles. – Pour avoir le temps vrai, il suffira de tracer une méridienne pour y régler une montre ordinaire. – Les algues, les flocons d'écume que la mer abandonne à chaque marée sur les plages lorsqu'elle se retire, marquent avec précision l'endroit

où elle est parvenue à cette hauteur. Pour cela, dans l'intervalle d'une demi-heure avant la pleine mer, il suffira de planter, quelques piquets à l'endroit de la plage où le flot aboutit, et d'en noter le temps ; ensuite, lorsque la mer descendra, on observera sur la montre à quelle heure le flot arrivera successivement aux mêmes marques : ce qui fournira le moyen de conclure l'heure de la haute mer avec une assez grande précision. On emploiera le même moyen pour déterminer le moment précis de la basse mer.

Ces dernières observations ne fournissent pas immédiatement la hauteur absolue des marées ; mais n'ayant marqué sur le rivage l'endroit où la mer s'est élevée et celui où elle est descendue, il est facile de conclure son élévation totale par un nivellement ; opération qu'on peut même remettre à une autre fois, lorsque les marques sont permanentes et distinctes. Si l'on observoit constamment dans le même endroit, on pourroit fixer à demeure de grosses pierres sur le rivage, et transporter une fois pour toutes leur différence de niveau sur un rocher voisin : on se formeroit ainsi, sur la déclivité même du rivage, une échelle très-exacte dont les parties seroient très-grandes. C'est un fait d'observations que la pente des côtes sablonneuses battues de la mer est constante dans chaque localité, et que les variations d'une localité à l'autre sont même assez petites. S'il ne s'agissoit pas de profiter des édifices déjà construits pour établir des échelles de marées, nous préférerions des échelles qui suivroient la déclivité de la côte aux échelles verticales ; leur construction seroit bien moins dispendieuse et leur usage plus commode. Lorsqu'elles suivroient exactement la pente naturelle de la côte, la mer y seroit très douce, et les observations plus exactes et plus faciles. Quelques carreaux de pierre posés à demeure, et un nivellement une fois fait, seroient toute la dépense.

9°. Il seroit également important de multiplier les observations des marées dans différentes parties du globe, dans les colonies, dans plusieurs points des grandes îles, dans les archipels et les différens détroits qu'ils forment. On sait qu'il y a plusieurs régions du globe où l'on n'observe qu'un seul flux et un seul reflux dans vingt quatre heures, au lieu de deux, qui est la loi générale. On sait encore qu'on a vus souvent, même sur nos côtes, la marée monter, puis suspendre son cours et même descendre pendant quelque temps pour remonter ensuite, en reprenant sa marche ordinaire. Tous ces faits ne paroissent pas avoir été observés avec le soin nécessaire, et on doit désirer qu'il le soient. Dans plusieurs endroits, les courans de la mer ont une marche périodique qui est le résultat des positions et des obstacles environnans, témoin ce qui arrive parmi cette multitude d'îles situées à l'ouest de l'Ecosse, dans les archipels de l'Inde, etc. Pour porter un jugement certains sur tous ces importans objets, il faut de bonnes observations, et de plus avoir une description exacte de la figure, de la situation et de l'étendue des côtes adjacentes, enfin de toutes les circonstances locales. On doit retirer les plus grands avantages, fassent partie des instructions que le ministre donne aux navigateurs et aux divers employés du Gouvernement dans les colonies qui tiennent particulièrement à la marine et aux sciences.

10°. Vos commissaires pensent aussi qu'il seroit important de faire de bonnes observations des marées dans la partie du cours des fleuves qui en ressent l'effet ; de déterminer avec précision l'étendue du flot, tant dans les syzygies que dans les quadratures, et sa vitesse, ainsi que celle du jusant, dans les différens états du fleuve. Des connoissances exactes sur tous ces points seroient non seulement utiles à la navigation et à la science des marées, mais encore fourniroient des lumières importantes pour la confection des travaux dont les ingénieurs sont chargés, tant pour la bonification des fleuves que pour différens objets du service public.

Ces instructions ont paru suffisantes à vos commissaires, d'autant plus qu'il convient d'abandonner les autres détails aux lumières et à la sagacité des personnes qui seront chargées de diriger ou de faire les observations. Ils pensent en conséquence que si ce plan obtient l'approbation de la classe, elle doit employer tous les moyens dont elle peut disposer pour en assurer l'exécution.

Vos commissaires pensent ainsi que le principal moyen d'exécution seroit :

1°. D'adresser une copie du présent mémoire au ministre de la marine et des colonies, avec invitation de vouloir bien charger les professeurs de navigation des ports, ainsi que les ingénieurs des travaux maritimes qui sont sous ses ordres, de diriger et de faire les observations dont il s'agit : pareillement de donner des ordres dans les ports, sur-tout à Brest, à l'Orient, à Saint-Malo, à Cherbourg, au Havre, à Dunkerque et à Flessingue, pour qu'on dispose les objets nécessaires et pour faciliter le travail des observateurs.

2°. D'adresser pareille copie au ministre de l'intérieur, et de l'inviter à donner des ordres analogues aux ingénieurs qui sont immédiatement sous ses ordres dans les villes et lieux environnans ou de pareilles observations peuvent être faites.

Au Louvre, le 26 floréal an 11.

Signé Laplace, Rochon et P. Lévêque.

La première partie du mémoire, avant de reprendre les théories pour expliquer le phénomène de la marée, développe l'intérêt d'avoir de bonnes observations du niveau de la mer. Afin de prédire la marée pour chaque port, il faut connaître l'établissement du port, qui ne peut être calculé qu'avec des suites de mesures. Cet établissement du port est, par définition, l'heure exprimée en temps vrai local de la PM qui suit le midi vrai, les jours de syzygie (Simon, 2007). Les auteurs illustrent leur propos en reprenant les mesures faites à Brest dans le passé, notamment celles réalisées entre 1711 et 1716 et que Laplace a utilisé pour étayer sa théorie dynamique des marées en 1789 (cf. 3.5.4.4). Avant de présenter la méthode pour observer le niveau marin, les auteurs invitent les nations étrangères à suivre le même protocole.

La procédure repose sur 9 points car il n'existe pas de 8^{ème} (!). Le premier et le second invite les observateurs à réaliser un maximum de mesures en prenant soin de toutes les effectuer lors des syzygies et quadratures jusqu'à trois jours après ces phénomènes. Le point 3 propose un tableau réunissant les observations afin d'en simplifier le dépouillement. Ce tableau est identique à celui proposé par Cassini en 1716, mises à part les hauteurs qui sont à mesurer et à exprimer avec le nouveau système métrique.

Le point 4 s'attarde longuement sur la mise en place de l'observatoire. De préférence, pour éviter les ennuis rencontrés à Brest et expliqués par Coubard en 1710 (cf. 3.2.2.2), les savants suggèrent que les échelles soient posées hors des enceintes portuaires afin de s'affranchir des entraves liées aux mouvements maritimes, et des accès limités sur site la nuit. L'échelle ne doit pas s'assécher lors des marées basses (idem que le point 1 de Lalande en 1777). Pour les sites où le marnage est très important, comme Saint-Malo et Granville, une innovation apparaît : il s'agit d'installer plusieurs échelles nivelées les unes par rapport aux autres. La pérennité des échelles est aussi mise en avant pour la première fois dans un mémoire, bien que Fourcroy de Ramecourt s'en soit soucié dès 1767. Les savants, frappés de réalisme ou connaisseurs des expériences passées souvent infructueuses en observations malgré des demandes appuyées aux plus hauts niveaux soulignent qu'il ne peut y avoir dans tous les ports des installations pérennes d'échelles de marée hormis pour les ports de Brest, Lorient, Saint-Malo, Cherbourg, Le Havre, Dunkerque et Flessingue¹, où les services maritimes pourraient les employer aussi à d'autres fins. Des catégories professionnelles inédites sont également mises à contribution comme les gardiens des jetées et des phares au Boucaud, à Cordouan, aux pointes de Chassiron et de la Baleine, aux pointes bretonnes, à Granville, Cherbourg, Dieppe, etc. Les gardiens, payés par l'état peuvent réaliser les observations supervisées par les professeurs de navigation à un coup moindre. Le port de Brest est pris en exemple pour illustrer cet observatoire modèle. L'échelle de marée doit être installée sur la rade, dans le voisinage de l'observatoire astronomique et le directeur ou sous-directeur est responsable des mesures réalisées. Les savants proposent de généraliser dans tous les ports, le système utilisé par Baert en 1701-1702 (cf. 3.1.2.1) en y apportant une innovation : lorsque l'observateur s'absentera, un crayon placé sur la tige en bois flottant tracera le mouvement de la mer sur

¹ Flessingue ou Vlissingen en néerlandais. Port important entre l'Escaut et la mer du Nord annexé par la république française en 1795 jusqu'à la chute de l'Empire en 1815.

une planche blanche. Hormis le tambour couplé à une horloge, tous les éléments pour confectionner un MCM sont présents.

Les points 5 et 6 donnent les consignes pour déterminer les heures des PM et BM. Les savants reprennent la méthode mise en place par Picard et de la Hire en 1679 (cf. 2.3) en la complétant : les observateurs doivent être présents une demi-heure avant et après la PM ou la BM. Les points 5, 6 et 7 soulignent l'importance de régler précisément les pendules utilisées pour avoir les heures. Différentes techniques sont inventoriées pour ajuster parfaitement l'heure : octant, sextant, cercle de réflexion, méridienne. Pour les méthodes précédentes, la méridienne était la seule méthode pour régler le temps.

Le point 7 prodigue également des conseils pour mesurer la hauteur d'eau pour des sites ne pouvant pas accueillir une échelle de marée. La commission propose de prendre les hautes de PM comme repère pour les hauteurs des PM. Cette méthode, conduit à une imprécision importante car des phénomènes comme la houle et les vagues entrent en jeu sur la dépose des hautes : le niveau de la mer mesuré ainsi est donc fatalement supérieur à la réalité. Les savants reprennent aussi la méthode mise en place par le Fer de Beauvais à Saint Malo en 1777 (cf. 3.5.3.2), laquelle consiste à niveler des rochers afin d'en connaître leur hauteur précise. Ne reste plus qu'à observer jusqu'où la marée monte afin d'en tirer sa hauteur. Cette méthode, relativement simple repose sur l'hypothèse que les repères ne puissent bouger et que le nivellement ait été fait avec toute la rigueur nécessaire.

Le point 9 complète le n°4 avec la demande de mesures partout dans le monde. Les savants interpellent directement Decrès [1761-1820], — ministre de la marine et des colonies entre 1801 et 1814 et en 1815 lors de la période des Cent-Jours — pour qu'il donne des ordres aux navigateurs et aux différents fonctionnaires travaillant dans les colonies dans ce sens. C'est la première fois qu'un mémoire pour observer le niveau marin englobe l'ensemble des terres émergées. Est-ce une conséquence de la Révolution et de son universalité ? Pour finir, le dernier point invite les observateurs à réaliser des observations également le long des fleuves soumis aux mouvements de la marée, partie novatrice également.

Le mémoire se termine par la demande auprès du ministre de la Marine et des Colonies d'inviter les professeurs de navigation des ports, les ingénieurs des travaux maritimes à réaliser les observations demandées dans le mémoire et à donner des ordres pour les ports de Brest, Lorient, Saint-Malo, Cherbourg, Le Havre, Dunkerque et Flessingue pour faciliter le travail des observateurs. De pareilles directives sont sollicitées auprès du ministre de l'Intérieur, le chimiste Chaptal [1756-1832], pour que ce dernier, donne des ordres identiques auprès des ingénieurs sous sa tutelle.

4.3. Réponses et portées de cette suite de recommandations.

Moins d'un mois plus tard, le 24 prairial an XI (13 juin 1803), Crétet [1747-1809], conseiller d'état chargé spécialement des Ponts et Chaussées, annonçait la réception des 50 exemplaires du mémoire envoyés par la classe de l'Institut et à leur distribution dans les différents ports avec invitation aux ingénieurs "*à se pénétrer de l'importance de ces observations*"¹. Lors de la séance du 8 messidor an XI (27 juin 1803), le Ministre de la Marine et des Colonies, à son tour accusait réception du mémoire en rajoutant que les professeurs d'hydrographie seront chargés "*d'en suivre les vues*"².

Les réponses de différents ports de la république ne tardèrent pas à arriver à l'Institut de France :

Le 20 thermidor an XI (8 août 1803), le professeur d'hydrographie de Saint-Valéry sur Somme, Delanainville [?-?] fut le premier à répondre aux savants de l'Institut³. Dans cette lettre, trouvée aux archives de l'Académie des Sciences⁴, le professeur de navigation à ce port depuis 40 ans (mais émigré durant la Terreur⁵), explique que c'est le commissaire au Bureau des l'Inscription Maritime du même port qui lui a remis le mémoire de l'Institut. Delanainville poursuit sa lettre en décrivant les mouvements de marée pour le port sans donner la moindre observation.

Le 30 pluviôse an XII (20 février 1804), d'après le procès verbal de la classe de physiques et mathématiques de l'Institut de France, un mémoire d'un dénommé Pontus, professeur de marine à Dieppe sur les marées, est renvoyé pour expertise⁶ à Laplace, Legendre [1752-1833], mathématicien et membre du Bureau des Longitudes, et Lacroix [1765-1843], mathématicien. Nulle information supplémentaire n'a été trouvée à ce sujet, ni concernant l'identité de l'auteur.

L'étude des procès-verbaux montre que Vaultier, professeur de navigation à Audierne adressa 2 jeux de mesures à la classe : la première contenant 480 observations⁷ et la seconde, un an après la première transmission. Pour ce dernier envoi, Laplace et Bouvard [1767-1843], astronome et membre du Bureau des Longitudes furent nommés examinateurs. La lettre accompagnant les premières données décrivant la méthode employée pour les obtenir est retranscrite sur la page suivante :

¹ PV des séances de l'Académie Ans VIII, XI, tome 2., séance du 24 Prairial an XI, p.674.

² PV des séances de l'Académie Ans VIII, XI, tome 2., séance du 08 Messidor an XI, p.676.

³ PV des séances de l'Académie Ans VIII, XI, tome 2., séance du 20 Thermidor an XI, p.690.

⁴ Pochette de Séance 20 Thermidor an 11. – Archives de l'Académie des Sciences. Lettre de Delanainville.

⁵ Archives départementales de la Somme, Répertoires et relevés généraux ; Registres d'ordre du bureau des émigrés. 1792 — an 8.

⁶ PV des séances de l'Académie 1804-1807, tome 3., séance du 30 Pluviôse an XII, p.65.

⁷ Pochette de Séance 30 Fructidor an 11. – Archives de l'Académie des Sciences. Lettre de Vaultier.

Audierne le 15 fructidor an 12 [2 septembre 1804]

Le professeur de navigation

A Monsieur Le président de L'institut national

Monsieur Le Président

J'ai l'honneur de vous adresser cy joint, 480 résultats d'observations sur les marées.

Je crois devoir Entrer dans quelques détails sur les moyens que j'ai employés pour me Les procurer. Je me suis servis de deux portions d'échelle, une pour évaluer la haute mer et l'autre pour la Basse mer. J'ai déterminé exactement la différence de niveau entre Les zéros. La première, semblable à celle qui fut employée à Dunkerque en 1701 et 1702 et dont la Description a été donnée dans Le mémoire présenté à l'institut national le 26 floréal an 11 par Mr Levêque, un de ses membres, a été établie sur le revêtement d'un quai dans un endroit du port peu fréquenté et ou la mer est rarement agitée. La deuxième a été placée sur le virage même, dans un endroit à portée de la première et où les eaux sont presque toujours tranquilles à la Basse mer. Les degrés ont été marquées par des piquets en bois enfoncée en terre avec force jusqu'au niveau du sol, sur des points dont la différence de niveau est de 0^m, 162^{milli} [1/2 pied]. Lorsqu'à la Basse mer, les eaux s'arrêtent sur un des piquets de cette échelle, il est donc facile de connoître leur élévation au dessus de celui qui en marque le zéro ; et quand elles se trouvent entre deux piquets, j'ai divisé une mesure portative de la longueur de 0^m,162^{milli}, je l'applique sur le piquet le moins élevé et sa portion comprise entre le niveau du sol et celui de l'eau me met à même de déterminer de combien le zéro de mon échelle est abaissé au dessous du plan de l'eau à la Basse mer retranchant donc cette quantité de celle qui marque de combien le zéro de la première échelle est élevé au dessus du zéro de la seconde et ajoutant au note l'ascension de la mer dans la 1^{re} échelle, on a la distance verticale de la superficie des eaux de la Basse mer à celle de la haute mer.

Les moments de la haute mer et de la Basse mer ont été déterminés le plus exactement qu'il m'a été possible. La montre qui m'a servi a cet effet n'a pas eu toujours une marche bien régulière. Les trois premiers mois de mon travail sont ceux ou j'ai remarqué en elle les plus grandes variations. Elles peuvent avoir occasionné des Erreurs sensibles dans la détermination des heures de la marche surtout pendant les jours ou l'état du ciel ne m'a pas permis de prendre de bonnes hauteurs correspondantes ni de connoître le midi vrai par le moyen d'une méridienne, tracée avec soin, ce qui est arrivé fort souvent.

L'état de l'atmosphère, la Direction et la force du vent pendant le flot et jusant ont été observés avec attention. La direction de la marée montant et descendante n'est pas en Ligne droite dans l'intérieur de ce port. Elle suit les sinuosités de la rivière. J'estime cependant que Le flot se porte a peu près au N.E. et le jusant au S.O.

J'ai été secondé dans mon travail par un marin de ce quartier, qui a fait presque tout le matériel des observations. Il m'a aidé avec zèle et intelligence.

Mon projet, est de fournir, si je le puis, à l'institut national au moins 1000 résultats. Je vais donc continuer le travail que j'ai commencé.

J'ai l'honneur d'être avec le plus profond respect, Monsieur le président, votre très humble et très obéissant serviteur.

Vaultier.

Vaultier dans cette lettre indique, comme pour les autres mesures antérieures, qu'un subalterne, en l'occurrence ici un ancien marin, observe "en grande partie" les mouvements de la mer et consignent les hauteurs. Deux "échelles" sont installées à Audierne, le long de la rivière de la Somme, l'une pour mesurer les PM et l'autre pour les BM. Les graduations sont placées tous les 0,162 mètre, soit tous les 1/2 pied. Le système métrique, même s'il est adopté en France en 1795, entre difficilement dans les mœurs expliquant pourquoi les graduations sont exprimées suivant l'ancienne unité de longueur. Vaultier, indique que l'observatoire qu'il utilise est identique à celui de Baert. Or ce n'est pas le cas. Ici, aucune échelle graduée ne flotte dans un caisson. Pour régler sa montre, le professeur utilise la méridienne, technique déjà utilisée par le passé. Malheureusement, aucun des 2 jeux de mesures n'a été trouvé.

A Lorient, le professeur d'hydrographie à l'école de navigation, Michel Pelhaste (dont l'enseignement au Havre a connu "un certain succès" de 1791 à 1803¹), fit parvenir à la classe deux jeux de mesures observées à ce port. Le premier rassemble des données du 1^{er} germinal an XII (22 mars 1804) au 1^{er} germinal an XIII (22 mars 1805)² et le second est la suite de ces observations jusqu'à fin mars 1806³. Laplace et Bouvard sont à nouveau nommés commissaires pour l'examen des mesures.

Le port de Saint-Malo, comme celui de Lorient, a déjà été un centre d'observation et de mesures du niveau marin. Comme Pelhaste à Lorient, un dénommé Lecerf (aucune information à son sujet), également, professeur d'hydrographie, envoya des observations à l'Institut de France, par deux fois⁴. A nouveau, Laplace et Bouvard furent nommés rapporteurs pour ces données.

Le professeur de navigation du Croisic, Simonin (apparemment le petit-fils d'Yves Simonin, hydrographe de Bayonne à l'époque de de Thury) expédia à 2 reprises, en 1806⁶ et en 1829⁷, des observations faites en dehors de ce port, "*à deux myriamètres (= 20km) de la Loire et de la Vilaine*". Au premier envoi, Laplace et Bouvard furent nommés commissaires, alors que pour le second, c'est Arago et Rossel [1765-1829], géographe, navigateur et membre du Bureau des Longitudes qui furent désignés.

Pour la dernière série d'observations des marées, mesurées à Granville et présentées lors de la séance du 6 octobre 1806, les examinateurs nommés furent Laplace et Bouvard. Ces mesures sont l'œuvre d'un professeur de navigation nommé Allain⁸.

Malgré les recherches menées aux archives de l'Académie des Sciences, à la bibliothèque de l'Institut et au Bureau des Longitudes, aucun jeu d'observations réalisées dans les sites susnommés n'a été trouvé. Les ports de Cherbourg, du Havre, de Dunkerque et Flessingue pourtant désignés par deux fois dans le mémoire de Lévêque, Rochon et Laplace ont apparemment totalement ignoré la requête de l'Institut. Seul, les ports de Lorient et Saint-Malo, par l'intermédiaire de leurs professeurs, ont répondu positivement à l'attente des savants en réalisant et en fournissant des mesures à la classe de physique et mathématiques. A Brest aussi, des observations furent entreprises, démarrant ainsi la plus dense et la plus longue série continue de France.

¹ URL : http://hydro.marseille.free.fr/histoire_pem/histoire_des_pem5.htm (consulté le 14 octobre 2008)

² PV des séances de l'Académie 1804-1807, tome 3., séance du 03 Thermidor an XIII, p.235.

³ PV des séances de l'Académie 1804-1807, tome 3., séance du 18 mai 1807, p.531.

⁴ PV des séances de l'Académie 1804-1807, tome 3., séance du 13 Brumaire an XIV, p.267.

⁵ PV des séances de l'Académie 1804-1807, tome 3., séance du 13 juillet 1807, p.554.

⁶ PV des séances de l'Académie 1804-1807, tome 3., séance du 07 avril 1806, p.337.

⁷ PV des séances de l'Académie 1828-1831, tome 9., séance du 06 juillet 1829, p.277.

⁸ PV des séances de l'Académie 1804-1807, tome 3., séance du 06 octobre 1806, p.435.

4.4. Suivi singulier des mesures faites au port de Brest par le Bureau des Longitudes.

4.4.1. Demandes faites avant 1803.

Depuis les premières observations du niveau de la mer réalisées à Brest en 1679, le lieu n'a cessé d'offrir de nombreuses mesures aux savants. Avant l'édition du mémoire publié par l'Institut, Lalande, par deux fois, essaya de relancer les observations du niveau marin à Brest. La première demande est présentée au général Bonaparte [1769-1821] en partance pour Brest¹ au début du mois de germinal an VI (mars-avril 1798). En effet, d'après Marmont (1857), les mois précédant germinal, Bonaparte se trouvait souvent à Lorient dans l'optique de *descendre en Angleterre*. La marine française, vétuste, mal préparée, inférieure en nombre par rapport à la marine anglaise obligea Bonaparte à annuler le débarquement. Le 15 ventôse (5 mars 1798), le directoire accepte que Napoléon mène une expédition en Egypte. En germinal – floréal (avril) est créée l'armée d'Orient, placée sous les ordres de Bonaparte. Des scientifiques l'accompagnent. La seconde demande de Lalande a lieu le 29 vendémiaire an X (21 octobre 1801) auprès "*du ministre de la marine [Decrès] pour avoir des observations des marées à Brest, celles de 1793 étant insuffisantes*"². Lorsque Lalande se réfère à "*celles de 1793*", faut-il y voir les mesures de 1778-1792 envoyées la même année par le ministre de la Marine, Monge, ou alors, est-ce la demande de Monge à Thevenard qui a abouti, permettant au savant d'obtenir des mesures pour l'année 1793 ? Lors de la séance du 9 brumaire an X, il est fait état dans le procès verbal que "*le ministre de la Marine a donné ordre à Brest pour faire des observations des marées*"³.

Entre les deux sollicitations de Lalande, Laplace s'adressa à Caffarelli [1760-1845], premier préfet maritime de Brest nommé par Bonaparte, le 1^{er} thermidor an X (20/07/1800), d'après Averous (2006). Dans cette lettre datée du 29 Brumaire an 9 (20/11/1800), le savant demande au préfet d'établir un observatoire à Brest en redéfinissant le zéro de l'échelle d'observation des marées : "*Le véritable zéro de cette échelle me paraît être le point qui serait au niveau de la mer. Si l'action du Soleil est de la Lune venant à cesser la mer se fixait à son état d'équilibre, j'ai donné dans le 4^{ème} livre de ma mécanique céleste, le moyen de retrouver ce point au milieu des agitations continuelles que la mer éprouve par l'action de la mer et du Soleil [...] la chose importante est de faire avec un soin particulier, des observations sur les marées et de les continuer pendant une période entière du mouvement des nœuds de la Lune.*"⁴ Laplace, dans sa lettre, définit le zéro de l'échelle de marée comme la valeur du niveau moyen de la mer, soit avec des hauteurs de PM positives et des hauteurs de BM négatives. Ce discours tranche avec le mémoire de 1803 dont il est co-auteur. Il y est souligné qu'il ne faut pas que le zéro de l'échelle soit exondé à quelque moment que ce soit y compris lors des BM.

¹ PV du Bureau des Longitudes, 219^{ème} séance du 14 germinal an VI (3 avril 1798).

² PV du Bureau des Longitudes, 472^{ème} séance du 29 vendémiaire an X (21 octobre 1801).

³ PV du Bureau des Longitudes, 474^{ème} séance du 9 brumaire an X (31 octobre 1801).

⁴ Laplace. Lettre à Caffarelli, le 29 brumaire an 9. Catalogue de ventes d'Autographes et Documents, Demarest, Mars 2002.

Comme pour 1793 aucune mesure n'a été retrouvée pour les ans VI et X¹. Il est impossible de confirmer, à partir de ce constat que nulle observation n'a été entreprise durant cette période. Tout comme les années 1780 et le début des années 1790 (cf. 3.5.4.4), la concurrence entre Lalande et Laplace semble se poursuivre pour qui obtiendra des observations du niveau de la mer. Beaucoup d'énergie fut certainement dépensée pour des résultats très relatifs...

4.4.2. Traitement particulier de Brest dans le mémoire de 1803.

Les recommandations de 1803 montrent l'intérêt des observations, mesurées avec un appareil similaire à celui décrit et utilisé par Baert en 1701-1702 (cf. 3.1.2.1), faites à Brest par Rochon en germinal an XI (mars-avril 1803). Il semble plutôt que les mesures, observées les 13 et 15 germinal an XI (23-24 mars 1803) sont l'œuvre de Maingon [1765-1809], capitaine de vaisseau². Il est difficile de concevoir qu'un observatoire aussi sophistiqué que celui décrit par Baert, ait été monté à Brest pour 3 journées d'observations seulement. En effet, aucune autre mesure ne semble avoir été réalisée dans les mois qui suivent cette date. Les auteurs souhaitaient certainement marquer les esprits de toutes les personnes encouragées à effectuer des mesures, en fabriquant un tel appareil.

Le mémoire propose un emplacement où devrait être construit l'observatoire des marées : à proximité de l'observatoire astronomique, le long de la rade. La proximité de cet observatoire astronomique est commandé par le réglage journalier des montres utilisées par les observateurs des marées mais aussi parce que le directeur et le sous-directeur de l'observatoire doivent avoir la responsabilité des mesures du niveau marin. Il est alors simple de comprendre pourquoi les savants cherchaient à rassembler dans le même secteur, les deux observatoires. Rochon, premier directeur de l'observatoire astronomique de Brest³, est certainement à l'origine de toutes les précisions données dans le mémoire, grâce à ses connaissances sur la ville portuaire.

4.4.3. Premier ouvrage portant exclusivement sur des observations du niveau de la mer.

En 1843, un ouvrage publié par le Bureau des Longitudes consigne les heures et hauteurs des PM et des BM de la mer à Brest ainsi que diverses informations météorologiques pour la période comprise entre 1807 et 1835. Ces 29 années d'observations sont précédées d'une note introductive, anonyme. D'après Cartwright (2003a), l'ouvrage aurait été très probablement l'œuvre de Chazallon. Or, par dépouillement des Procès Verbaux du Bureau des Longitudes, les véritables auteurs ont été identifiés : il s'agit de Savary [1797-1841], Bouvard, Mathieu

¹ Ce constat n'est certainement plus d'actualité car O. Sauzereau m'a transmis au mois de juillet 2008 les références d'un document disponible aux Archives Nationales sous la cote : MAR 3JJ 159B. "an VIII (mars 1800 à la fin de mars 1806 : Journal d'observations de marées (31 pièces jointes)". Pour plus d'informations sur cette série voir le point 1 de l'annexe A.5.

² PV du Bureau des Longitudes, 558^{ème} séance du 15 germinal an XI (5 avril 1803).

³ Rochon. Lettre au ministre, le 10 prairial an VI (29/05/1798). S.H.D. – Marine Vincennes, DD2/926.

[1783-1875], Daussy [1792-1860] et Largeteau [1791-1857]¹, tous membres du Bureau des Longitudes. Beautemps-Beaupré [1766-1854] et Daussy furent chargés par le Bureau des Longitudes, de joindre à cette introduction un plan figuratif du port de Brest qui fut exécuté au dépôt de la Marine².

Huit années auront été nécessaires pour voir publiées les mesures entre 1836 et 1843. Arago et Lubbock [1803-1865], élu membre de la Royal Astronomical Society en 1828, nommé à la Royal Society en 1829 et célèbre pour ses travaux sur les marées³, sont à l'origine de cette impression. En 1832, Lubbock écrit au Bureau des Longitudes afin d'obtenir une copie des observations des marées faites à Brest pour ses travaux. A la lecture de cette lettre lors de la séance du mercredi 10 juillet 1833, Arago fit remarquer "*qu'il serait très utile que le Bureau publiât ces observations qu'il fait faire à ses frais depuis plusieurs années*". Il proposa de demander au Garde des Sceaux de les faire imprimer à l'Imprimerie Royale au moyen des fonds destinés aux impressions gratuites⁴. Arago présenta moins d'un mois plus tard le devis fait par l'Imprimerie Royale pour l'impression des observations des marées. Il s'élevait à 5896 francs pour 500 exemplaires ou 5400 francs pour 300 exemplaires⁵, montants importants pour l'époque. A titre de comparaison, dans l'Almanach de France de 1833, vendu 6 francs, se trouve la valeur pour 1kg d'or pur : 3445 francs. La réponse du ministère fut lue lors de la séance du 27 novembre 1833. Le ministre accordait un crédit de 4000 francs dont un premier versement de 1133 francs pour le commencement de l'impression des observations⁶. Un an plus tard, l'impression des mesures de marée comprenait les années 1807 à 1819⁷. Au cours des séances du 25 mars 1835 et du 13 janvier 1836, le directeur de l'Imprimerie Royale annonça l'arrivée des nouveaux crédits pour la mise à jour de la publication des données⁸. Ce n'est que le 8 septembre 1841 que le problème d'un retard à l'impression reviendra à l'ordre du jour. Le directeur de l'Imprimerie Royale demande alors à ce qu'on lui fournisse l'introduction que Savary, — astronome et membre du Bureau des Longitudes — "*devait rédiger depuis longtemps*" pour accompagner les observations de marée⁹. Déjà en 1833 (séance n°2073), Savary avait étudié les données. Malheureusement, sa mort survenue en juillet 1841 loin de Paris (Feurtet, 2005), occasionne un nouveau retard pour la publication de l'ouvrage. Il fallut attendre le mois de mars 1842 pour que les scellés de la justice apposés au domicile de Savary soient levés. Mathieu retrouva dans les papiers de Savary, plusieurs pièces relatives au recueil des observations de marée¹⁰. Bouvard, Mathieu, Daussy et Largeteau présentèrent durant la séance du 6 avril 1842, l'introduction au recueil d'observations¹¹, après avoir rencontré "*diverses difficultés en examinant tous les documents recueillis par Savary*"¹². Le procès verbal du 20 avril 1842 indique que 230 exemplaires dont 15 sur papier vélin étaient enfin sortis de l'Imprimerie Royale¹³.

La notice introductive rédigée par Bouvard, Mathieu, Daussy et Largeteau grâce aux indications de Savary est entièrement retranscrite ci-après ainsi que le plan exécuté par

¹ PV du Bureau des Longitudes, 2497^{ème} séance du 9 mars 1842.

² PV du Bureau des Longitudes, 2501^{ème} séance du 6 avril 1842.

³ D'après Cartwright (1999).

⁴ PV du Bureau des Longitudes, 2073^{ème} séance du 10 juillet 1833.

⁵ PV du Bureau des Longitudes, 2077^{ème} séance du 07 août 1833.

⁶ PV du Bureau des Longitudes, 2093^{ème} séance du 27 novembre 1833.

⁷ PV du Bureau des Longitudes, 2141^{ème} séance du 11 novembre 1834.

⁸ PV du Bureau des Longitudes, 2160^{ème} séance du 25 mars 1835.

⁹ PV du Bureau des Longitudes, 2471^{ème} séance du 8 septembre 1841.

¹⁰ PV du Bureau des Longitudes, 2498^{ème} séance du 16 mars 1842.

¹¹ PV du Bureau des Longitudes, 2501^{ème} séance du 06 avril 1842.

¹² PV du Bureau des Longitudes, 2500^{ème} séance du 30 mars 1842.

¹³ PV du Bureau des Longitudes, 2503^{ème} séance du 20 avril 1842.

Beautemps-Beaupré et Daussy au Dépôt de la Marine¹². Pour faciliter l'interprétation de cette notice, le document est fractionné en 5 parties pour discussion :

INTRODUCTION

Si dans l'étude des grands phénomènes de la nature, rien ne supplée au nombre des observations, à l'intervalle de temps qu'elles embrassent, nulle part le phénomène des marées ne mérite d'être suivi avec un plus vif intérêt qu'à Brest. On possède en effet, pour ce port d'anciennes observations, comparables, du point de vue de l'exactitude, aux observations les plus récentes. Déjà en 1679 (Mémoire de l'Académie, 1710), La Hire et Picard déterminaient avec précision un certain nombre, un nombre malheureusement trop petit, d'heures et de hauteurs de pleine et de basse mer, en un point du port qui est appelé le Jardin du Roi. Plus tard, sur la demande de l'Académie des sciences, fut entreprise cette précieuse série d'observations qui s'étendit, sans interruption, du mois de juin 1711 au mois de septembre 1716. A l'exception de l'année 1713, dont les manuscrits ont été perdus, cette série est imprimée dans le quatrième volume de l'Astronomie de Lalande (édition de 1781). Les observations se faisaient en un point assez vaguement désigné, mais voisin de la chaîne du port, c'est-à-dire de l'entrée. On voit, par plusieurs passages du même traité, qu'une nouvelle série commença en août 1773, et se termina en juin 1775. Il est bien à regretter que Lalande, qui l'avait provoquée, n'en ait conservé que quelques nombres isolés, et par là même de peu d'importance lorsque l'on cherche à tenir compte des minutieuses circonstances du phénomène. Cette seconde série était observée aux échelles du bassin de Brest, dont il sera question plus tard. Elle se termine à peine que l'on recommence, à partir du 1^{er} janvier 1778, les observations aux mêmes échelles : mais cette fois on enregistre seulement les hautes mers, on en donne pas les heures ; on se borne à indiquer les hauteurs en pieds et pouces.

Nous voici arrivés au commencement du siècle actuel. Alors Laplace, par l'autorité de son illustration scientifique non moins par sa position dans l'Etat, fit donner des ordres pour que le phénomène des marées fût observé de nouveau sur un grand nombre de points des côtes de France. Les années 1804 et 1805 ne produisirent que peu de résultats. Un seul ensemble d'observations de cette époque méritait d'être conservé : c'est le travail fait à Lorient par M. Pellaste, professeur d'hydrographie ; mais en juin 1806 commence, à Brest, la série d'observations qui, depuis lors, n'a jamais été interrompue. C'est cette série dont le bureau des longitudes publie les résultats dans le présent volume, jusqu'à la fin de l'année 1835.

Les observations, comme cela devrait toujours être, sont données telles que les manuscrits déposés à l'observatoire de Paris les ont fournies ; on n'a même pas cru devoir modifier un petit nombre de chiffres qu'une discussion attentive montre cependant ne devoir être que des erreurs de copie. Ce nombre de résultats fautifs est, du reste, tout à fait insignifiant, et sans aucune influence sur des résultats moyens. Il est, d'ailleurs, facile de reconnaître une erreur de ce genre à la marche des différences.

La série d'observations publiées aujourd'hui se compose de deux parties bien distinctes : les observations faites à la Mâtire et les observations faites à l'entrée du bassin de Brest.

L'introduction rappelle ainsi aux lecteurs que les mesures réalisées entre 1807 et 1835 ne sont pas les premières du genre à Brest. Les auteurs reviennent avec des explications très succinctes, sur les premières mesures réalisées en 1679 (cf. 2.3), celles faites entre 1711 et 1716 (cf. 3.2.3), les observations exécutées entre 1773 et 1775 (cf. 3.5.3.6) et enfin les mesures obtenues entre 1778 et 1792 (cf. 3.5.4.4). Les hauteurs de PM entre 1756 et 1778 sont omises (cf. 3.5.3.6), certainement à cause de la méconnaissance de cette série de la part des savants. Les auteurs sont particulièrement durs avec Lalande en le critiquant de n'avoir pas su transmettre les observations qu'ils avaient commanditées entre 1773 et 1775. Certes, l'astronome n'a pas réussi à nous transmettre ces mesures, mais, à travers son traité (1781), il est le premier à avoir sauvé nombre de mesures grâce à la méthode de la "grande

¹ PV du Bureau des Longitudes, 2501^{ème} séance du 06 avril 1842.

² PV du Bureau des Longitudes, 2506^{ème} séance du 11 mai 1842.

duplication" et de son traité sur le flux et reflux de la mer, c'est-à-dire celles exécutées entre 1711 et 1716 (cf. 3.5.1) exécutées entre 1711 et 1716 (cf. 3.5.1).

Les auteurs affirment que les observations accompagnant cette notice introductive sont le fruit d'un seul homme Laplace, oubliant par là-même les deux autres co-auteurs du mémoire de 1803, à savoir Lévêque et Rochon, (cf. 4.2.2), et que leur qualité est discutable. Ainsi, ils concluent que seules les observations de Lorient faites par Pelhaste au début du 19^{ème} siècle méritent d'être conservées (cf. 4.3).

Ils terminent en indiquant qu'aucune mesure n'a été modifiée par rapport à leur source secondaire, même lorsque, pour certaines, des erreurs de copie leur apparaissent manifestes.

OBSERVATIONS FAITES A LA MÂTURE

Le lieu des observations a été l'emplacement appelé la Mâtüre, sur le côté Est (voir le plan) de l'entrée du port, entre la chaîne et le bassin de Brest, à environ trois cents mètres de ce bassin. Un ouvrier de l'atelier des boussoles se rendait tous les jours dans une petite cabane adossée à la Mâtüre, pour observer la hauteur de la mer, à l'aide d'un flotteur cylindrique d'environ quinze centimètres de diamètre, surmonté d'une tige sur laquelle on lisait les hauteurs. Ce flotteur se mouvait dans un prisme rectangulaire vertical, dont la section horizontale était un carré d'environ trente centimètres de côté. A la suite des observations de 1775, faites aux échelles du bassin de Brest, on avait déjà donné des ordres pour l'établissement de ce flotteur.

Les observations ont commencé à la Mâtüre en juin 1806 ; mais on a rejeté de la publication actuelle les six mois de cette année. Les observations de cette courte période étaient tellement peu régulières, il en manque un si grand nombre, celles que l'on a faites l'ont été avec si peu de soin, qu'il eût été impossible d'en tirer parti. En les introduisant dans le calcul parmi de bonnes observations, on ferait qu'affaiblir l'exactitude des résultats.

C'est dont au 1^{er} janvier 1807 que commence la publication des observations de la Mâtüre ; elle se termine à la fin de l'année 1811.

Pourquoi n'a-t-on pas continué les observations à la Mâtüre ? Plusieurs motifs ont déterminé l'abandon de cette station. D'abord, il arrive parfois, dans les grandes marées, que le pied du flotteur assèche. Un motif encore plus grave encore, c'est que dans l'emplacement de la Mâtüre il était impossible d'exercer sur l'observateurs une surveillance qu'il pût craindre à chaque instant, sans même l'apercevoir, et qui fût aussi active que dans l'intérieur, continuellement fréquenté, du bassin. La mer est, d'ailleurs, un peu plus tranquille à l'entrée du bassin qu'à la Mâtüre.

La question de savoir quelle confiance méritent les observations de la Mâtüre se présente naturellement ici. On avait signalé, en 1811, dans le sein du bureau des longitudes, quelques discordances entre les premières observations de la Mâtüre et celles qui se faisaient en même temps aux échelles du bassin ; cette discordance était alors attribuée aux observations du bassin. Mais, dans ces derniers temps, après l'impression des observations, on a fait prendre, à Brest, tous les renseignements dont on avait besoin pour bien faire connaître les divers modes d'observations des marées, et on a acquis la certitude que l'observateur du bassin communiquait ses observations à celui de la Mâtüre. Cette communication, soupçonnée vers la fin 1810, fut constatée au mois de mai 1811, et détermina l'autorité supérieure à abandonner l'établissement de la Mâtüre. Cependant M. Savary, en soumettant à une discussion approfondie toutes les observations contenues dans ce recueil, avait reconnu que les observations de la Mâtüre, prises dans leur ensemble, conduisent à des résultats moyens assez satisfaisants, bien qu'elles laissent quelque chose à désirer dans les détails.

L'heure des marées est donnée en temps vrai, et la hauteur, en mètres. Aucune note n'indique comment l'observateur de la Mâtüre réglait sa montre en temps vrai.

Immédiatement après les observations de la Mâtüre, on a placé les observations faites en 1810 aux échelles du bassin. Cette année sert de terme de comparaison et de lien entre les observations au flotteur de la Mâtüre et aux échelles du bassin.

Les observations à la mâture sont réalisées grâce au système imaginé par Baërt à Dunkerque en 1701 (cf. 3.1.2.1) et recommandé dans le mémoire de 1803. Des précisions inexistantes dans le mémoire précédemment cité, sont apportées sur l'appareil utilisé : le flotteur d'une section de 15cm de diamètre se déplace dans un prisme rectangulaire de section carré d'environ 30cm de côté. Sur le flotteur, se trouve la tige graduée en système métrique (sans plus de précision) sur laquelle les hauteurs étaient lues, le tout est localisé dans une petite cabane adossée à la mâture. L'heure est exprimée en temps solaire vrai, mais aucune indication n'apparaît sur le réglage de la montre, élément important dans le mémoire.

L'observateur, un ouvrier de l'atelier des boussoles mesura le niveau de la mer à partir du mois de juin 1806. Pour les 7 premiers mois, les mesures peu régulières, peu nombreuses et "*réalisées avec si peu de soin*" furent écartées de la publication ainsi limitée aux années 1807 à 1811.

Cet observatoire fut abandonné pour trois motifs :

- lors des grandes marées, la base du flotteur était asséchée ;
- la station, se trouvant dans une zone peu fréquentée rendait difficile la surveillance du travail de l'observateur. Le dernier contrôle de l'observateur remonterait au premier semestre 1810 environ d'après une lettre de Guépratte [1777-1852?], directeur de l'Observatoire de Paris, écrite à Rosily [1748-1832], académicien, membre de l'Académie de la Marine et du Bureau des Longitudes, datée du 23 mai 1813¹. Dans cette lettre, Guépratte loue l'intelligence et le travail réalisé avec soin par l'ouvrier. Tout juste se doutait-il que quelques observations devaient être transmises à la mâture par l'observateur des marées du bassin de Brest lors des BM de vives eaux (voir tableau 4.1) ;

- Les mesures n'étaient plus réalisées à la mâture. Un exemplaire des données mesurées au bassin de Brest était remis à l'ouvrier qui les utilisait pour écrire ces "propres" mesures. Cette communication, fut constatée au mois de mai 1811. Or, Guépratte, dans une autre lettre à Rosily indique qu'il "*a pris de nouveaux renseignements qui l'ont assuré que les observations de marées faites à la mâture doivent être en partie conformes à celles du bassin, car Salaun [l'observateur des marées au bassin de Brest] les remet tous les huit jours à l'observateur de la mâture, à l'exception des observations de nuit*"². Cette nouvelle missive datée de 1813, corrige la notice introductive qui indique que les échanges été confirmés en 1811.

¹ Guépratte. Lettre à Rosily, le 23 mai 1813. Archives Nationales, MAR/3/JJ/23.

² Guépratte. Lettre à Rosily, le 6 juin 1813. Archives Nationales, MAR/3/JJ/23.

OBSERVATIONS FAITES AU BASSIN DE BREST

Ces observations ont été faites avec plusieurs échelles près de l'entrée du bassin qui est fermé par un bateau-porte.

Les hautes mers ont été mesurées, du 1^{er} janvier 1812 au 1^{er} juin 1822, à l'aide d'une échelle gravée sur la pierre du revêtement Sud du bassin. Sa position est indiquée par le n°1, sur le plan qui se trouve à la fin du volume. La partie du revêtement sur laquelle sont gravées les divisions de l'échelle a une inclinaison de 1^m40 de base, sur 6^m61 de hauteur, ou de 11°58' par rapport à la verticale ; mais les divisions sont marquées de manière à donner immédiatement, en pieds et pouces, les hauteurs rapportées à la verticale elle-même. Dans les gros temps, on s'est servi quelquefois, pour la pleine mer, d'une échelle placée dans l'intérieur du bassin.

Les basses mers étaient observées avec une échelle, également en pieds et pouces, placée sur le flanc extérieur du bateau-porte. Cette échelle, marquée par le chiffre 3 sur le plan, s'élève jusqu'à neuf pieds et quelques pouces, et son zéro correspond au fond du bassin.

Toutes ces observations ont été faites par un seul et même observateur, le contre-mâitre Salaun, dont M. Guepratte loue particulièrement le zèle et l'exactitude. Les observations de 1810, dont nous avons parlé, ont aussi été faites au bassin, avec les échelles n°1 et 3, par le même observateur.

A partir de juin 1822, plusieurs observateurs se sont succédés à des époques que l'on n'a pas fait connaître. Ils ont continué à se servir de l'échelle du bateau-porte pour les basses mers ; mais, comme les divisions de l'échelle gravée sur la pierre se voyaient difficilement, on a eu recours à une échelle en bois appliquée contre le revêtement opposé au côté Nord du bassin. Cette échelle verticale, aussi divisée en pieds et pouces, a servi pour les hautes mers depuis le mois de juin 1822, jusqu'à la fin de 1835 ; on s'en sert encore actuellement. Sa position est indiquée par le chiffre 2 sur le plan.

La concordance parfaite de cette échelle avec celle qui est gravée sur la pierre a été reconnue en 1839, par un nivellement direct fait avec le plus grand soin par M. Trotté de la Roche, ingénieur en chef des ponts et chaussées, chargé des travaux du port de Brest. Ainsi les hautes mers observées sur l'échelle en bois n°2, depuis 1822, sont précisément celles que l'on aurait trouvées sur l'échelle n°1 gravée sur la pierre.

Dans l'établissement de ces échelles, on a préféré la division en pieds et pouces, à cause de la difficulté qu'il y avait à faire lire des mesures nouvelles aux observateurs dont on était obligé de se servir. On a craint que ce ne fût pour eux une cause d'erreurs involontaires. Les bulletins des observations de chaque jour sont remis à l'observatoire de Brest. Le directeur, M. Guepratte, les convertit en mesures métriques, et les adresse annuellement, ainsi transformées, au bureau des longitudes.

Enfin, il importe d'avertir que toutes les heures sont indiquées en temps vrai, jusqu'au 1^{er} janvier 1828, et en temps moyen à partir de cette époque. Le contre-mâitre Salaun réglait sa montre, tous les jours, d'abord à l'observatoire même ; mais, depuis 1816, l'observatoire ayant été déplacé, il allait prendre l'heure chez l'horloger de la marine, à qui M. Guepratte la donne régulièrement ; c'est ce qui se fait encore aujourd'hui.

Quant aux observations elles-mêmes, quant à la manière de déterminer l'instant et la hauteur de pleine et de basse mer, les notes de M. Guepratte portent que l'observateur, du moins à partir de 1812, ou de la série faites au bassin, inscrit les heures auxquelles le niveau atteint différentes divisions, un peu avant et un peu après l'instant du maximum ou du minimum. L'heure moyenne entre celles qui correspondent à des hauteurs égales, avant et après les positions extrêmes, est prise pour l'heure de la pleine et de basse mer.

Les hauteurs d'eau mesurées au bassin de Brest sont observées sur plusieurs échelles de marées :

- Les BM sont lues sur une échelle graduée en pieds et en pouces fixée sur la partie extérieure du bateau-porte et identifiée par le chiffre 3 sur la figure 2.3. Le zéro de cette échelle coïncide avec le fond du bassin et s'élève "jusqu'à 9 pieds et quelques pouces".

- Entre le 1^{er} janvier 1812 et le 1^{er} juin 1822, les PM sont mesurées "à l'aide d'une échelle gravée sur la pierre du revêtement Sud du bassin" (n°1 sur la figure 4.1.). Les graduations sont exprimées en pieds et en pouces et prennent en compte le fruit, c'est-à-dire l'inclinaison

des parois latérales du bassin ou des murs du bajoyer. Cette innovation permet d'avoir directement la hauteur d'eau sans avoir besoin de la convertir avec des calculs trigonométriques.

- A partir de juin 1822, comme les graduations gravées sur l'échelle en pierre devenaient illisibles, une échelle en bois fut installée sur la paroi latérale Nord du bassin (n°2 sur la figure 4.1).

La concordance des trois échelles entre elles fut établie en 1839 par un nivellement direct réalisé par M. Trotté de la Roche, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, chargé des travaux du port de Brest. Or les procès verbaux du Bureau des Longitudes indiquent que le nivellement date plutôt de 1832. En effet, lors de la séance du 11 juillet 1832, le Bureau des Longitudes pria le ministre de la Marine d'inviter *"les ingénieurs des Ponts et Chaussées en résidence à Brest à déterminer les hauteurs relatives des zéros des différentes échelles qui ont servi à l'observation des marées"*¹. Sur le procès verbal du 25 juillet 1832 est écrit : *"Le ministre de la Marine écrit qu'il autorise le préfet maritime de Brest à faire faire par M. Trotté de la Roche le nivellement entre différentes échelles sur lesquelles on a mesuré les hauteurs des marées à diverses époques"*². Finalement, que le rattachement ait été fait en 1832 ou en 1839, seul importe réellement le résultat. Entre l'échelle en pierre et l'échelle en bois *"la concordance [est] parfaite"*.

Il est étrange de voir que les graduations en pieds et en pouces sont toujours utilisées quelque 45 ans après l'introduction du système métrique comme unité légale en France. Une lettre de Guépratte datée du 4 août 1815 indique pourtant que *"conformément aux désirs de m. le Comte de Laplace, deux nouvelles échelles suivant la division métrique vont être opposées au bajoyers du bassin de Brest en ayant égard à leur inclinaison pour y compte les hauteurs journalières des marées ; dorénavant elles seront exprimées en mètre"*³. Cinq jours plus tard, Jurien⁴ [1763-1836] lui répond en recommandant, de la part de Laplace de *"compter en mètres et en décimètres, les hauteurs journalières de la marée"*⁵. Or les registres originaux des mesures entre 1819 et 1832⁶ et 1832 et 1836⁷ montrent que les observations étaient bien relevées en pieds et en pouces prouvant que les échelles n'ont pas été remplacées. L'utilisation de ce type de graduation, contraire à la recommandation n°4 du mémoire de 1803 est préférée au système métrique pour une raison simple : les observateurs, habitués à mesurer avec l'ancien système en pieds et pouces, système en "douzième" par rapport au système décimal métrique, préférèrent continuer à utiliser un système qu'il connaissait pour ne pas introduire des erreurs de lectures involontaires. Le responsable, convertissait les hauteurs en système métrique.

Jusqu'au 1^{er} janvier 1828, c'est le temps solaire vrai qui est utilisé pour les observations de PM et BM. Toutefois à partir de cette date, c'est l'utilisation du temps solaire moyen qui est d'usage. La montre de l'observateur était réglée à l'observatoire jusqu'en 1816, date de son déplacement puis à partir de ce déménagement, chez l'horloger de la marine.

La méthode employée à partir de 1812 pour déterminer les heures des PM et BM est celle définie par Picard et La Hire (cf. 2.3) perfectionnée par l'utilisation de plusieurs hauteurs

¹ PV du Bureau des Longitudes, 2023^{ème} séance du 11 juillet 1832.

² PV du Bureau des Longitudes, 2025^{ème} séance du 25 juillet 1832.

³ Lettre de Guépratte vu par le Général, Préfet Maritime, le 4 août 1815. Archives Nationales, MAR/3/JJ/21.

⁴ Jurien : deuxième division du ministre de la Marine, Conseiller d'état, Intendant des armées navales, Directeur.

⁵ Lettre de Jurien à Guépratte, le 9 août 1815. Archives Nationales, MAR/3/JJ/21.

⁶ Registre de PM et BM réalisées au Bassin de Brest entre 1819 et 1832. Archives Nationales, MAR 3JJ/153.

⁷ Copie du registre de PM et BM réalisée au Bassin de Brest entre 1832 et 1836. Archives du SHOM.

égales avant et après la hauteur extrême. Ce protocole est identique à celui rédigé en 1803 dans les points 5 et 6. Au cours des années, la méthodologie employée semble plus confuse avec la succession de plusieurs observateurs.

Si l'on cherche maintenant à apprécier la valeur, l'exactitude des observations contenues dans ce volume, en l'absence d'épreuves directes, de comparaisons faites sur les lieux et pendant un temps un peu long, c'est aux chiffres mêmes qu'il faudra demander les éléments de cette appréciation.

Or, en les discutant, on reconnaît facilement : qu'à la Mâturation, et ensuite au bassin de Brest, jusqu'en juin 1822, on a indiqué les heures des pleines et des basses mers à peu près de la même manière, seulement avec moins de régularité à la Mâturation qu'au bassin ;

Qu'à partir de juin 1822, on observa au bassin de Brest d'une manière différente ; que, terme moyen, l'observateur jugeait la mer pleine quatre minutes plus tôt, et la mer basse quatre minutes plus tard que dans le mode d'observation précédemment adopté.

Les six derniers mois de 1822 présentent une confusion entre les deux modes d'observation. A partir de 1823 commence nettement la seconde période, plus complète que la première ; elle est un peu plus irrégulière, au moins en apparence, dans les dernières années, à mesure que l'on se rapproche de l'époque actuelle, et semblable du reste à l'ancienne période d'observations de 1711 à 1716 : car, dans l'une et dans l'autre, la mer met moyennement huit à dix minutes de plus à descendre qu'à monter, tandis que, de 1807 à 1823, on donne les deux intervalles comme sensiblement égaux.

Déjà, en 1824, Laplace, en discutant les observations terminées alors, indiquait la différence dont on vient de parler, entre ces observations et celles de 1711, sans remarquer toutefois que, dans la dernière des années qu'il employait, en 1823, on était revenu à l'ancien résultat.

A quelle cause faut-il attribuer la différence signalée ?

Ce n'est point à des constructions faites dans le port : outre que l'état de choses est le même qu'avant et après une certaine époque, le changement a lieu précisément à l'instant d'un changement d'observateur.

Aura-t-on pris dans une série, des hauteurs correspondantes pour déterminer l'instant du maximum ? Se sera-t-on contenté, dans une autre, d'une seule observation ? Si l'on a toujours employé des hauteurs correspondantes, les aura-t-on prises à des intervalles plus grands à une époque qu'à l'autre ?

Si la mer mettait, en réalité, à Brest, des temps très-inégaux à monter et à descendre, comme cela se voit à Cherbourg, au Havre, à Dunkerque, ces différents modes d'observations introduiraient dans les résultats des différences très sensibles. C'est ce que remarquait fort bien, dès 1701, M. Baert, professeur d'hydrographie à Dunkerque.

Cette avant-dernière partie introductive s'attarde sur les mesures obtenues ainsi que sur leur analyse. Des comparaisons sont réalisées entre les deux grandes périodes : celle de 1806 à 1836 et celle de 1711 à 1716. Des explications sont données pour expliquer les différences constatées sur des écarts en temps. Il ne s'agit pas de modifications hydrodynamiques liées à l'activité anthropique, mais plutôt d'artefacts liés aux méthodes utilisées par chaque observateur pour mesurer le temps et l'heure de la PM ou BM. Ces réflexions, permises grâce aux longues séries de mesures, sont les premières du genre.

On trouvera à la fin du volume le plan du port de Brest, qui fera bien connaître l'état des lieux et les positions respectives des diverses échelles qui ont servi à l'observation des marées.

Le chiffre 1 indique l'endroit où se trouve l'échelle gravée sur la pierre du revêtement ; le chiffre 2, la position de l'échelle verticale en bois appliquée sur le revêtement opposé ; enfin, le nombre 3 marque la position de l'échelle placée sur le flanc du bateau-porte qui ferme le bassin de Brest.

Un peu avant du bateau-porte, on a marqué par deux lignes ponctuées un petit pont qui sert à passer d'un côté à l'autre du canal, entrée du bassin de Brest.

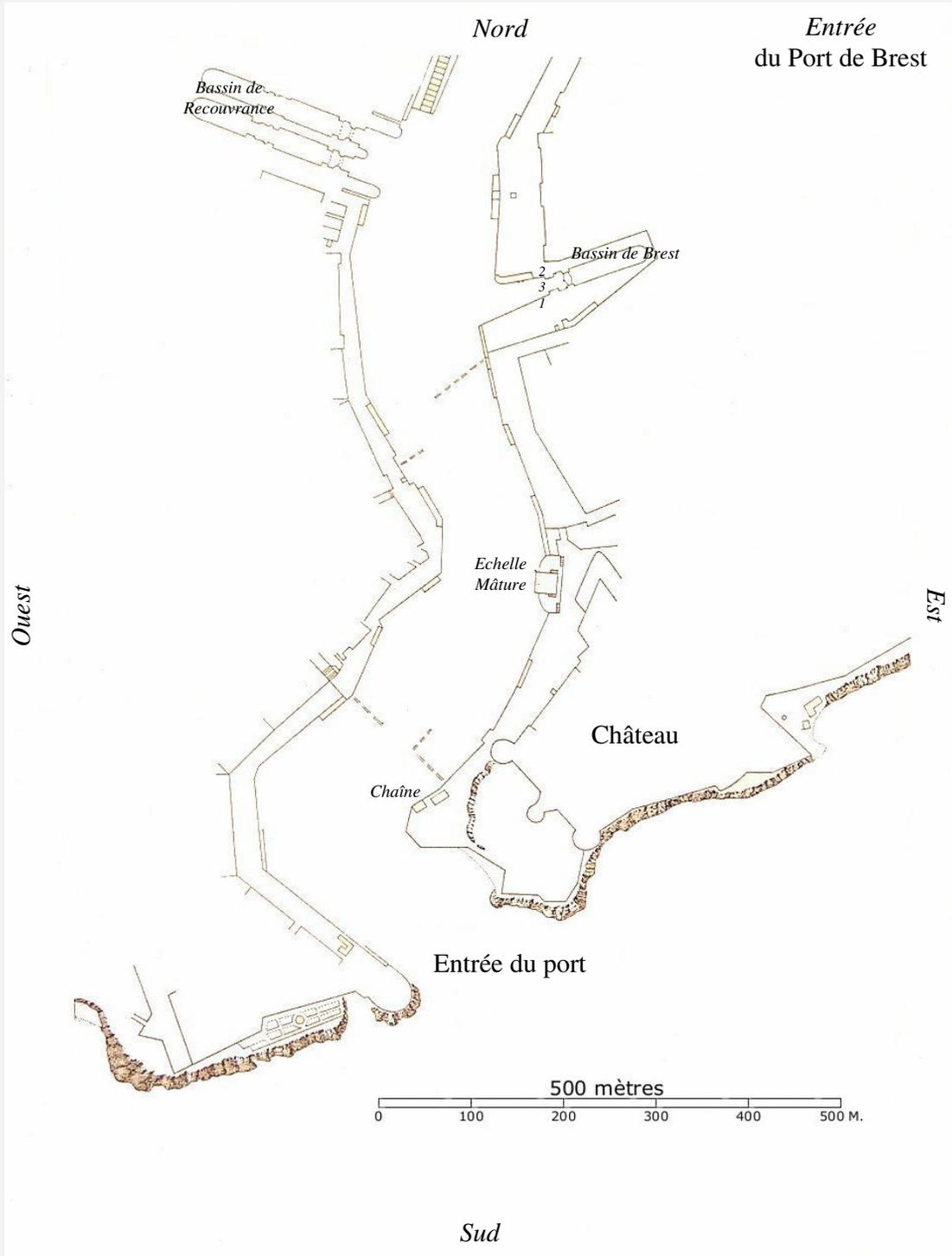


Fig. 4.1 – Plan figuratif du port de Brest, modifié.

Ce plan récapitule les différents sites où des observations du niveau de la mer ont eu lieu. Ils se trouvent tous à l'intérieur du bras de mer au sein duquel le port militaire de Brest s'est développé.

Une très riche correspondance s'établit entre le responsable des observations à Brest et le Bureau des Longitudes. Ces échanges, riches d'enseignements, sont rassemblés dans le tableau 4.1¹ :

Date d'envoi	Nom de l'expéditeur	Période des mesures	Observateur(s)	Divers	source
11/1806	Lancelin	?	Lancelin ?	<i>"Ces observations seront insérées dans la Connaissance des tems. Il serait intéressant d'avoir une suite d'observations de ce genre pendant toute une période des nœuds de la Lune."</i>	PV du BdL, 738 ^{ème} séance du 07/11/1806.
11/1806	Lancelin	?	?	<i>"M. Lancelin vient donner des renseignements sur les observations de marées faites à Brest."</i>	PV du BdL, 739 ^{ème} séance du 15/11/1806.
03/1808	Lancelin	10/1806 12/1807	Hubé	<i>"observations sur les marées à la mâturation."</i>	PV du BdL, 808 ^{ème} séance du 23/03/1808.
07/1808	Lancelin		Hubé	<i>"Le Bureau autorise [...] à faire passer à M. Hubé une gratification de 300 francs. M. Laplace y ajoute une somme de 100 francs."</i>	PV du BdL, 823 ^{ème} séance du 06/07/1808.
03/1809	Lancelin	05/1808 12/1808	?		PV du BdL, 857 ^{ème} séance du 01/03/1809.
02/1812	Lancelin	01/1811 12/1811	Lancelin ?		PV du BdL, 1010 ^{ème} séance du 19/02/1812.
10/1812	Guépratte	?	?		PV du BdL, 1045 ^{ème} séance du 30/10/1812.
03/1813	Guépratte	?	Hubé	<i>"On lit une lettre de M. Guépratt relative aux observations des marées qui se font à Brest en deux endroits [...] Une copie certifiée de la lettre adressée à M. le vice-amiral Rosily reste à l'Observatoire."</i>	PV du BdL, 1063 ^{ème} séance du 03/03/1813, PV du BdL, 1076 ^{ème} séance du 02/06/1813.

¹ URL : <http://alidade.ajlsm.com/sdx/alidade/pdf/FROBSPM-ALIDADE-MANU00001.pdf> (consulté le 5 octobre 2008) et communication personnelle de J. M. Feurtet.

Date d'envoi	Nom de l'expéditeur	Période des mesures	Observateur(s)	Divers	source
05/1813	Guépratte		Salaun au Bassin et un ouvrier de l'atelier à la mâturation	<p>"Les observations des marées [...] ont été faites sous direction au Bassin de Brest, par le nommé Salaun, maître calfat, chargé du bateau porte de ce bassin, cet homme est précieux pour ce travail, dont le mérite consiste dans beaucoup d'exactitude, les heures des marées sont comptées à une montre de poche qui est comparée chaque jour à la pendule de l'observatoire [...]"</p> <p>Le bureau des longitudes à du remarquer par le grand nombre d'observations de nuits que je fais faire prendre, le désir que j'ai d'être utile (dans les tems plus heureux j'obtenais pour Salaun de petites gratifications qui récompensaient son zèle, depuis près d'un an [en note : que je ne lui fai rien obtenir] ce n'est que par attachement pour moi qu'il a continué ce service, celui de maître calfat ne lui donne que trois jours de paye par semaine). A la mâturation les observations des marées y sont faites par un ouvrier de l'atelier, je les crois exactes, seulement dans les grandes marées le flotteur dont il se sert pour déterminer la hauteur reste à et je crois qu'alors mes observations lui sont communiquées par Salaun pour éviter [une lacune] qui auroient lieu dans son journal ; cet ouvrier est très intelligent, son travail doit être fait avec soin quoi que depuis plus de trois ans il n'ait été surveillé par personne"</p>	Archives Nationales Mar 3JJ23 ¹ .
06/1813	Guépratte			"Guépratte a pris de nouveaux renseignements qui l'ont assuré que les observations de marées faites à la mâturation devaient être en partie conformes à celles du Bassin, car Salaun les remet tous les huit jours à l'observateur de la mâturation, à l'exception des observations de nuit."	Archives Nationales Mar 3JJ23 ² .
07/1813	Guépratte	01/1813 06/1813	Hubé Salaun	<p>"[...] envoi le reçu des 300 francs que le Bureau des Longitudes a accordé aux sieurs Hubé et Salaun."</p> <p>"[...] une quittance de ces observateurs pour la somme de 300 francs que le Bureau leur a accordée."</p>	Archives Nationales Mar 3JJ23 ³ . PV du BdL, 1083 ^{ème} séance du 22/07/1813.
08/1814	?	07/1813 06/1814	?	"On discute les moyens à employer pour perfectionner ces observations et les rendre exactement comparables."	PV du BdL, 1135 ^{ème} séance du 17/08/1814.
02/1815	?	07/1814 12/1814	Guépratte ?	"On parle des avantages qu'on pourrait retirer d'observations de ce genre dans d'autres ports où les marées sont plus fortes et variables."	PV du BdL, 1159 ^{ème} séance du 01/02/1815.
02/1815	Guépratte	07/1810 12/1810		"On lui demande les six premiers et le 1 ^{er} mois de 1815."	PV du BdL, 1162 ^{ème} séance du 22/02/1815.
03/1815	Guépratte	01/1815 02/1815	Guépratte ?		PV du BdL, 1165 ^{ème} séance du 15/03/1815.

¹ Guépratte. Lettre au Comte de Rosely [1748-1832], membre de l'Académie de Marine et du Bureau des Longitude, le 23 mai 1813. Archives Nationales, MAR/3/JJ/23.

² Guépratte. Lettre à Rosily le 06 juin 1813. Archives Nationales, MAR/3/JJ/23.

³ Guépratte. Lettre à Rosily le 11 juillet 1813. Archives Nationales, MAR/3/JJ/23.

Date d'envoi	Nom de l'expéditeur	Période des mesures	Observateur(s)	Divers	source
03/1815	Guépratte	01/1810 06/1810	Guépratte ?		PV du BdL, 1170 ^{ème} séance du 22/03/1815.
01/1816	Guépratte	02/1815 12/1815	Salaun	"Il serait juste d'accorder une gratification à l'observateur Salaun, ce brave homme n'a rien reçu depuis plus de deux ans." "[...] l'observateur n'a reçu aucune gratification depuis deux ans. On propose d'accorder 200 francs et la proposition est adoptée à l'unanimité."	Archives Nationales Mar 3JJ19 ¹ . PV du BdL, 1208 ^{ème} séance du 24/01/1816.
02/1816	Guépratte		Salaun	"J'ai l'honneur de vous adresser [...] reçu de la gratification accordée à l'observateur Salaun par le Bureau des Longitudes ; cet honnête homme en est très reconnaissant [...]"	Archives Nationales Mar 3JJ19 ² .
07/1817	?	01/1816 06/1817	?	"On arrête de donner à l'observateur une somme de 200 francs, comme l'année dernière."	PV du BdL, 1280 ^{ème} séance du 30/07/1817.
02/1819	Guépratte	07/1817 12/1818	Salaun	"On propose d'accorder une gratification de 200 francs à M. Salaun. La proposition est adoptée à l'unanimité."	PV du BdL, 1360 ^{ème} séance du 24/02/1819.
03/1819	Guépratte		Salaun	"[...] adresser les remerciements de Salaun pour la gratification que le bureau des longitudes a bien voulu lui accorder, c'est un nouvel encouragement qui contribuera à entretenir le zèle qu'il a mis jusqu'ici dans les observations des marées."	Archives Nationales Mar 3JJ20 ³ .
10/1820	Guépratte	01/1820 06/1820	?		PV du BdL, 1445 ^{ème} séance du 11/10/1820.
04/1821				"Un membre demande si l'intention du Bureau des Longitudes est d'accorder la gratification de 200 francs à la personne qui fait les observations des marées."	PV du BdL, 1472 ^{ème} séance du 25/04/1821.
07/1822	?	01/1821 06/1822	?	"Ce tableau sera déposé dans les Archives de l'Observatoire."	PV du BdL, 1530 ^{ème} séance du 10/07/1822.
09/1825	Guépratte	?	?		PV du BdL, 1686 ^{ème} séance du 07/09/1825.
11/1825	?	01/1825 09/1825	?	"On demandera les observations de 1823 et de 1824 qui n'ont pas été envoyées."	PV du BdL, 1695 ^{ème} séance du 09/11/1825.
10/1826	?	10/1825 10/1826	?		PV du BdL, 1741 ^{ème} séance du 11/10/1826.
06/1827	?			"Le Bureau décide que l'employé du port auquel ces observations ont été confiées recevra une gratification annuelle de 300 francs."	PV du BdL, 1776 ^{ème} séance du 27/06/1827.
12/1830	?	02/1830 11/1830		"M. Bouvard est autorisé à payer une gratification annuelle qu'on accorde à l'observateur."	PV du BdL, 1943 ^{ème} séance du 08/12/1830.
12/1832	?	11/1831 10/1832	?		PV du BdL, 2044 ^{ème} séance du 12/12/1832.

¹ Guépratte. Lettre au Comte de Rosely, le 15 janvier 1816.

² Guépratte. Lettre au Comte de Rosely, le 06 février 1816.

³ Guépratte. Lettre au Comte de Rosely, le 11 mars 1819.

Date d'envoi	Nom de l'expéditeur	Période des mesures	Observateur(s)	Divers	source
12/1834	Guépratte	12/1833 11/1834	?		PV du BdL, 2145 ^{ème} séance du 11/12/1834.
12/1835	Guépratte	12/1834 11/1835	?		PV du BdL, 2195 ^{ème} séance du 09/12/1835.
09/1836	Guépratte	12/1835	?		PV du BdL, 2234 ^{ème} séance du 13/09/1836.
10/1836	Guépratte	01/1836 09/1836	?	". "	PV du BdL, 2240 ^{ème} séance du 26/10/1836.
11/1837	Guépratte	01/1836 10/1837	?	". "	PV du BdL, 2286 ^{ème} séance du 15/11/1837.
12/1838	Guépratte	11/1837 11/1838	?	". "	PV du BdL, 2334 ^{ème} séance du 05/12/1838.
01/1839				<i>"M. Beautemps-Beaupré annonce que sur sa demande, M. le ministre de la Marine a autorisé le payement de la somme de 300 francs pour les observations de marées faites à Brest en 1838 M. le ministre a également décidé que la même somme serait désormais annuellement portée sur son budget avec cette destination."</i>	PV du BdL, 2342 ^{ème} séance du 06/01/1839.
02/1840	?	12/1838 01/1840	?		PV du BdL, 2392 ^{ème} séance du 12/02/1840.
04/1840	?	01/1819 12/1832	?	<i>"M. Beautemps-Beaupré présente au Bureau les observations originales des marées faites à Brest depuis l'année 1819 jusqu'à l'année 1832. Le registre qui contient ces observations a été envoyé par le ministre de la Marine au vice-amiral Halgan en le priant de la transmettre au Bureau des Longitudes Il est accompagné d'une note de M. Guépratte relative à la manière dont ces observations ont été faites. Ce registre sera rendu plus tard au Dépôt de la Marine."¹</i>	PV du BdL, 2401 ^{ème} séance du 15/04/1840.
11/1840	Guépratte	01/1840 10/1840	?	<i>"elles [les observations] méritent toute confiance ; l'observateur a été surveillé à son insu, et qu'il s'acquitte avec exactitude des devoirs qui lui sont imposés."</i>	PV du BdL, 2430 ^{ème} séance du 11/11/1840.
01/1843	Guépratte	01/1841 10/1842	?	<i>"M. Beautemps-Beaupré engagera M. Guépratte à continuer à envoyer ces bulletins, pourvu toutefois qu'il en reste une copie collationnée à Brest, afin de se prémunir contre les accidents du transport."</i>	PV du BdL, 2541 ^{ème} séance du 18/01/1843.

Tab. 4.1 – Inventaire des expéditions des observations des marées faites à Brest entre 1806 et 1842.

¹ Le registre présenté par Beautemps-Beaupré se trouve aujourd'hui aux Archives Nationales, conservé à la cote MAR 3JJ/153. Comme le "père" de l'hydrographie moderne l'indique, il s'agit du registre original, car en plus des observations des marées se trouve consigné l'ensemble des mouvements du bassin, c'est-à-dire la liste complète des bateaux entrant et sortant du bassin de Brest. Par contre, la note de Guépratte n'a pas été conservée avec le registre et n'a pas été retrouvée.

Les envois de mesures au Bureau des Longitudes sont réguliers : entre 6 mois et 1 an. Si le responsable, Guépratte vient à oublier d'adresser les données, il est rapidement invité par les savants à s'exécuter. En retour de leurs services, les observateurs, sur sollicitation de Guépratte, reçoivent des gratifications annuelles en général réglées sur les fonds propres du Bureau des Longitudes. Il semble même qu'en 1808, Laplace gratifia les observateurs au moyen de ses deniers personnels. Le tableau ne permet pas en revanche de bien délimiter les périodes d'activités des différents observateurs. Il semble que Hubé, ouvrier de l'atelier des boussoles observe, à la mâtire entre 1806 et 1813, puis Salaun, maître calfat chargé du bateau porte du bassin de Brest, dont le nom revient entre 1813 et 1819. Pour les années postérieures, aucun nom d'observateur n'apparaît.

Ce tableau nous apprend enfin que les mesures du niveau marin ont continué à Brest au moins jusqu'en octobre 1842. Les manuscrits pour les années 1836 à 1842 n'ont pas été retrouvés malgré la collaboration du Bureau des Longitudes, endroit le plus à même de conserver ces registres. Malheureusement, au début des années 1980, de nombreux documents furent déplacés et détruits (communication personnelle de J.-M. Feurtet). Il est probable que les différents registres ont disparu à cette époque de relatif désintérêt pour la discipline. Les registres, n'ayant existé qu'en un seul exemplaire — comme le souligne Beautemps-Beaupré lors de la séance du Bureau des Longitudes du 18 janvier 1843 —, cela conférait pourtant une valeur patrimoniale exceptionnelle à ces documents transcrivant les mesures comprises entre 1836 et 1842. Une copie des observations se trouvant au SHOM, payée sur les fonds propres de Chazallon¹ et s'étalant du mois de novembre 1832 au mois d'avril 1836 permet toutefois de recueillir les données des 4 premiers mois de l'année 1836. De plus, une étude de concordance des marées entre les ports de Douarnenez et de Brest, réalisée entre le 6 mai et le 30 septembre 1837, permet d'obtenir 4 mois et demi de mesures supplémentaires pour l'année 1837. Cette relative perméabilité des observations du niveau marin entre le Bureau des Longitudes et les ingénieurs hydrographes est logique : bon nombre des hydrographes appartenaient à cette époque au Bureau des Longitudes comme Beautemps-Beaupré, Daussy, Chazallon. Elle n'a malheureusement permis que de conserver quelque 8 mois et demi de données sur les 74 mois de mesures.

4.5. Bilan d'action des académiciens.

Ayant appartenus aux grandes institutions de l'état, quelques savants, Cassini, Lalande, Laplace, Lévêque, Rochon, sont parvenus à codifier les méthodes de mesures du "*flux et reflux de la mer*". De mémoires en protocoles, ces savants ont perfectionné la manière d'observer le niveau de la mer. Trois procédures se sont succédées en un siècle : celle de Cassini en 1701, suivie par la proposition de Lalande en 1777 pour le compte de l'Académie Royale des Sciences, et enfin les recommandations de Lévêque, Rochon et Laplace en 1803 sous l'auspice de l'Institut. Si l'on en juge d'après les résultats obtenus et par les séries d'observations récoltées la réponse aux sollicitations académiques paraît bien faible. Entre 1701 et 1716, seulement quatre sites répondent à la demande ; avec le mémoire de 1778, seuls trois jeux de mesures sont envoyés à l'Académie ; enfin, les conseils rédigés par les savants de l'Institut en 1803 ne reçoivent d'échos que dans deux ports : Audierne et Granville.

¹ Manuscrit accompagnant diverses observations. Carton marée n°12, archives SHOM.

Pourquoi les demandes des académiciens furent-elles si peu suivies ? Observer le niveau de la mer n'est pas difficile en soi. En revanche, être quatre fois par jour, par tout temps, à l'observatoire une heure durant pour chaque PM et chaque BM, l'est davantage. Les savants ont bien compris qu'observer le flux et reflux de la mer est un travail pénible, d'autant plus lorsqu'il est difficile de rejoindre l'observatoire à cause des diverses activités portuaires. Les académiciens ont proposé des solutions, toutefois difficiles à mettre en œuvre, comme celle d'installer une échelle de marée loin de tout aménagement portuaire, mais, alors, loin aussi de toute habitation. Une autre raison du peu d'écho rencontré par les scientifiques pour mesurer le niveau marin vient certainement des intermédiaires entre les observateurs et les commanditaires. A chaque fois, se déroule le même scénario :

- 1- des savants rédigent un protocole recevant l'aval de l'Académie ;
- 2- le protocole est envoyé au ministre de la Marine à titre de proposition ;
- 3- du ministère de la Marine, ordre est donné aux professeurs d'hydrographie d'exécuter les observations ;
- 4- si des demandes sont formulées ou des questions sont posés par les professeurs d'hydrographie aux savants, elles transitent alors en retour via le ministère de la Marine ce qui ralentit la réactivité et/ou augmente les risques de pertes d'information.

Ainsi, les commanditaires n'avaient aucun moyen de pression auprès des observateurs car ces derniers sont sous les ordres du ministre de la Marine qui, de fait, a bien d'autres responsabilités plus urgentes à court terme que de vérifier que les mesures du niveau de la mer sont bien exécutées. Dans ce schéma incluant un intermédiaire, les savants perdaient une énergie importante à obtenir les mesures et le cas échéant, à obtenir tous les renseignements utiles pour exploiter ces observations. Forces perdues d'autant plus importantes lorsque deux savants se livraient à une compétition pour obtenir des données pour leur propre compte.

Cette difficulté rencontrée par les savants était d'autant plus accentuée que les observateurs, des professeurs d'hydrographie, réalisaient ce travail sans aucune contrepartie financière de la part du ministère ou de l'Académie. Ce n'est qu'avec les mesures faites à Brest en 1807 que des rémunérations financières commencent à être offertes aux observateurs. Les gratifications annuelles jouaient plusieurs rôles : celui de responsabiliser les observateurs à réellement faire des observations du niveau marin ; celui permettant d'obtenir davantage de mesures contraignantes, notamment de nuit par exemple ; mais surtout celui de motiver durablement les observateurs à réaliser des observations les plus précises possibles.

Lalande a très vite compris la valeur des jeux d'observations du niveau marin. Rares, difficiles à obtenir, mais indispensables pour étudier le "*flux et reflux de la mer*", c'est ainsi que l'astronome considère les observations. Il se rend compte que si des mesures ont bien existé par le passé, sans une large diffusion, il est difficile pour quiconque de les étudier et ainsi d'apporter sa propre contribution dans la discussion du phénomène des marées. Lalande publia ainsi de nombreuses mesures dans son traité de 1781. En 1833, sous les demandes pressantes de Lubbock désireux d'obtenir des hauteurs du niveau de la mer, le Bureau des Longitudes décida de faire imprimer les observations de Brest démarrant en 1807.

Malgré tout, c'est avec quelques unes de ces séries que des avancées sur la compréhension du phénomène des marées se sont appuyées. Ainsi, c'est avec les mesures faites à Brest entre 1711 et 1716 que Laplace vérifia en 1799 sa théorie dynamique de la marée s'appuyant sur

deux principes : les oscillations forcées et la superposition des mouvements. D'après Simon (2007), c'est grâce à cette méthode que les marées furent prédites en France jusqu'au début des années 1990. Les données obtenues à Brest en 1817 complétées par des mesures du vent et de la pression atmosphérique permirent à Daussy de publier dans la *Connaissance des Temps [...] pour l'an 1834*, la "*Hauteur du niveau moyen par différens vents*" ainsi que la "*hauteur du niveau moyen comparée à la pression barométrique*".

Chapitre 5. Nouveaux besoins de la Marine : naissance de l'hydrographie moderne.

"Pendant l'équinoxe, on sait que les marées sont ordinairement très-fortes, car, lorsque le soleil et la lune se trouvent en conjonction, leur double influence s'ajoute et accroît ainsi l'intensité du phénomène. C'était donc le cas d'observer avec soin la marée qui allait se produire sur le littoral du cap Bathurst. Jasper Hobson, quelques jours avant, avait établi des points de repère, une sorte de marégraphe, afin d'évaluer exactement le déplacement vertical des eaux entre la basse et la haute mer. Or, cette fois encore, il constata, quoi qu'il en eût, et malgré tout ce qu'avaient pu rapporter les observateurs, que l'influence solaire et lunaire se faisait à peine sentir dans cette portion de la mer Glaciale". Jules Verne. Le pays des fourrures (1876).

Jusqu'alors, l'un des plus grands soucis rencontrés par les commanditaires d'observations du niveau marin était d'obtenir de bonnes mesures du niveau de la mer, suivies et continues sur de longues périodes de temps. L'ensemble de ces critères reposait exclusivement sur le zèle des observateurs (cf. 4.4.3). Ces personnes les réalisaient de manière bénévole, en plus de leur charge statutaire. Des gratifications apparurent donc au début des années 1800 pour remercier leur dévouement mais surtout pour les impulser à produire, au fil du temps, des mesures de plus grande qualité et suivies sur plusieurs années.

Pour autant, les "mesureurs" des hauteurs d'eau n'étaient pas des "professionnels" de l'observation du niveau marin même s'ils bénéficiaient de quelques explications données par les savants et de la présence de référents in situ (professeur d'hydrographie, directeur d'observatoire astronomique...). Il faut attendre le début des années 1800 pour voir apparaître un nouveau corps de métier : les "observateurs des marées", maillon devenu indispensable pour le perfectionnement dans les mesures et la prédiction de la marée comme pour la connaissance bathymétrique des côtes de France.

Avant d'approfondir la relation entre l'hydrographie moderne et l'observation des hauteurs d'eau, revenons à celui qui fut le premier à imaginer l'observatoire marégraphique moderne : le chevalier de Sade.

5.1. Naissance de la tydologie

Le chapitre (cf. 1.4.1.2) reprend cette notion de "tydologie", terme fabriqué de toute pièce par Louis de Sade dans son ouvrage en deux tomes parus en 1810 et 1813. L'auteur, pour justifier son mémoire en forme d'instruction écrit : *"Notre attention s'est principalement portée sur l'Observatoire [...] et sur les suites d'observations plus convenables à faire pour l'avantage de la marine et pour le plus grand progrès des sciences"*. Le Chevalier de Sade, tire ensuite un état de l'art des observations tydologiques. Il note qu' *"il est étonnant que de toutes les parties de l'art nautique, la tydologie ait été la plus négligée. Elle tient pourtant de l'astronomie, aux sciences exactes, et à des observations très faciles à faire quand on habite un port de mer"*. Il est probable que Louis de Sade n'est jamais allé véritablement observer le niveau de la mer car, effectivement, s'il semble facile de l'observer, les difficultés pour obtenir des mesures sont nombreuses comme les chapitres 2 à 4 le témoignent. Il dénigre ensuite le mémoire rédigé en 1701 par Cassini en notant que *"ce petit écrit montre l'état de pauvreté où était la tydologie à cette époque et l'idée rétrécie que les savants en avaient. Les auteurs de cette espèce de règlement n'exigent point de résultats exacts, ils ne demandent que des à peu près [...]"* Pour se justifier, il prend comme exemple les observations faites à Brest entre 1711 et 1716 et écrit *"on les trouvera très grossiers [les mesures] en comparaison de ceux mêmes qu'on a employés dans ce temps-là pour faire des observations astronomiques"*. En effet, les instruments astronomiques présentent à cette époque, un niveau technique supérieur aux simples règles graduées servant à mesurer le niveau marin. Louis de Sade termine son *"état actuel des observations tydologiques"* en discutant de manière élogieuse sur l'ouvrage de Lalande qui a *"donné un recueil précieux de faits et d'observations tydologiques"* avant de conclure en exprimant : *"on voit à peine que toutes les observations qu'il rapporte, ont été faites sans suite, sans méthode, sans uniformité, d'une manière assez inexacte, et qu'elles sont renfermées dans des intervalles de temps très circonscrits. Elles sont sans contredit plus que suffisante pour les besoins de la marine ; mais la tydologie ne les considérera que comme des aperçus indicatifs pour ses recherches ultérieures, et dans l'état où nous les avons, elles ne peuvent point convenir à une science qui vise au grand et qui à la prétention de marcher de pair avec l'astronomie."* Il est certain que les diverses mesures du niveau marin que rapporte Lalande dans son ouvrage sont toutes obtenues avec des méthodes légèrement différentes les unes des autres. Des protocoles existaient mais étant rédigés par des savants n'ayant eu que peu ou pas l'occasion d'observer les hauteurs d'eau, ils étaient difficilement applicables. De plus, chaque recommandation laissait libre cours aux observateurs pour perfectionner les méthodes faisant ainsi apparaître pour chaque jeu de mesures, une procédure différente.

Après les critiques et la mise en exergue des lacunes concernant l'obtention des données d'observation, Sade propose sa méthodologie pour obtenir les données qu'ils souhaitent pour développer la tydologie. L'extrait ci-après reprend les spécifications contenues dans le premier chapitre de la seconde partie du livre premier :

Cet observatoire doit être placé au bord de la mer, et à quelque distance des plus hautes eaux, sur un local qui ne soit point humide, et dont les dehors soient agréables et spacieux... L'on ménageroit dans l'intérieur de cette observatoire un puits d'une profondeur de deux à trois pieds [65 à 97,5 cm], et même davantage, si on peut, au-dessous des plus basses eaux et de leurs ondulations. Ce puits communiqueroit avec le fond de la mer, par un canal de quinze à dix-huit pouces [40,5 à 48,75 cm] de large, couvert de manière que la hausse et la baisse des eaux ne soient produites que par celles des eaux de la mer, et qu'aucune autre cause ne puisse y contribuer en rien. Un flotteur surmonté d'une règle bien dressée et graduée avec soin seroit perpendiculairement sur le centre du flotteur, indiqueroit à chaque instant la mesure exacte de l'élévation des eaux. Pour plus de commodité, la graduation iroit de haut en bas, de manière que le point de zéro marquât celui des plus basses eaux ; on le placeroit même un peu plu haut, afin qu'il n'y eut point d'embarras ou de changement de signe dans le cas d'une baisse extraordinaire. Ce flotteur surmonté de sa règle graduée, est ce que nous appellerons un TYDOMETRE.

Cet observatoire renfermeroit en outre une pendule, des baromètres, des thermomètres, en un mot une collection complète des meilleurs instrumens de météorologie qu'on auroit pu se procurer.

Il est nécessaire que le tydologue s'assujettisse tous les jours à faire au moins 4 observations de son tydomètre, aux époques des plus hautes et des plus basses eaux ; qu'il prenne les mesures les plus exactes de leurs dimensions et les moments précis de leurs époques ; qu'il note le tout sur son journal, avec le relevé, pour le même instant, des hauteurs du baromètre et des degrés de chacun de ses autres instrumens de météorologie....

...La précision d'une minute, dans la mesure du temps, celle d'une demi-ligne [0,11 cm] dans les hauteurs de la règle graduée, suffiront, je crois, aux besoins actuels de la tydologie...Il est facile, si on le juge à propos, d'imaginer une machine d'horlogerie adaptée au tydomètre de manière que l'élévation des eaux s'y marque d'elle-même d'heure en heure, de minute en minute, et même de seconde en seconde. Le seul embarras que j'y vois, seroit le changement de papier ou de cadran tous les 24 ou 30 heures. Cette espèce d'horloge ne seroit pas difficile à construire, et son exécution ne seroit guère plus chère que celle d'une pendule ordinaire.

On parle toujours du niveau de la mer, comme d'une base fondamentale, d'une ligne ou d'un plan de niveau immuable, sur lequel l'on peut, avec toute assurance, rapporter toutes les observations de ce genre qu'on veut comparer entr'elles....Sur quelles raisons, sur quel prétexte a-t-on pu supposer que les rivages de la mer fussent une ligne d'un niveau égal et invariable dans tous ses points ?

LES PLANS DE NIVEAU, comme les plans du méridien, sont des plans arbitraires ; chaque observatoire doit en avoir un qui lui soit exclusivement affecté. Une table ou mieux encore, un bloc d'une matière indestructible, comme de granit, de porphyre, d'une lave dure et compacte, qui seroit bien et solidement établi sur un massif en pierre de taille, voilà LE PLAN DE NIVEAU que nous osons proposer.

Dès que les tydologues ou les niveleurs auront établi un plan de niveau, leur premier soin sera de chercher sa relation ou sa différence de hauteur, avec celle du premier plan de niveau du pays où ils se trouvent.

La méthode présentée par Sade ne propose aucune évolution fondamentale par rapport aux précédentes recommandations publiées jusqu'alors. Il se cantonne à reprendre au nom de l'observatoire, le protocole publié en 1666 par Moray (cf. 2.1). Il apporte juste des indications, sans les justifier, sur le diamètre du canal ainsi que sur la profondeur du puits en dessous des BM. Par contre, il innove en ce qui concerne les principes de mesure. Pour la première fois, des indications sur les précisions estimées nécessaires sont fournies : une minute pour le temps et une demi ligne pour la hauteur (0,11cm), même si de telles précisions sont impossibles à obtenir. Sade propose aussi de coupler l'échelle flottante déjà décrite à plusieurs reprises dans le passé, avec un système d'horlogerie et de papier changé régulièrement sur lequel serait portée la hauteur de l'eau à intervalle régulier. Malheureusement, il n'approfondit pas les conditions d'application de cette innovation en concluant que *"cette espèce d'horloge ne seroit pas difficile à construire"*. La référence zéro

de l'échelle de marée, le "tydomètre", fait également l'objet d'une analyse par l'auteur. Conceptuellement, il innove en parallèle dans la notion même de niveau de la mer. Pour lui, ce niveau n'est pas forcément stable et a donc pu différer dans le passé. Il propose de faire correspondre à certaines graduations de l'échelle, des références verticales marquées sur des blocs de roches résistant aux altérations et à l'érosion. Cette relation verticale entre l'échelle et les repères est complétée par le rattachement vertical des repères avec ceux du nivellement général du pays. Le dernier point soulevé par Sade, plus ou moins en filigrane dans le texte, est pourtant majeur. Il s'agit de l'observateur des marées ou "tydologue". Pour l'auteur, le "tydologue" doit réaliser quatre fois par jour, les observations en hauteur au moment des extremums du niveau marin. Il doit également noter les diverses constantes météorologiques relevées sur les instruments et effectuer des nivellements. Cette description du travail de l'observateur est pour la première fois, différente de tous les autres protocoles vus jusqu'alors ; pour réaliser les mesures, seuls le zèle, l'abnégation et la générosité des professeurs d'hydrographie permettaient aux savants d'obtenir des mesures. Ici, un tournant commence à s'opérer. L'observateur devient un "tydologue", autrement dit, une personne semblant être formée pour réaliser les mesures du niveau de la mer souhaitées et non plus le simple ouvrier travaillant à proximité d'une échelle de marée, par exemple.

Ainsi, même si elle est forte incomplète dans son développement, cette recommandation de Sade est vraiment innovatrice sous plusieurs aspects :

- Couplage de l'échelle flottante avec un système d'horlogerie notant les hauteurs d'eau à pas de temps précis ;
- Rattachement des graduations de l'échelle des marées à des repères de nivellement qui sont eux-mêmes rattachés avec les repères d'altitude nationaux ;
- Hypothèse que le niveau de la mer n'est peut-être pas immuable au cours des temps ;
- Naissance d'un nouveau métier, celui de "tydologue".

5.2. Les hydrographes, ces marins qui mesurent la mer.

Durant la seconde moitié du 18^{ème} siècle, autant grâce à l'abnégation de géographes tels que Giovanni Domenico Maraldi [1709-1788], Etienne-Nicolas de Calon [1726-1804] et Cassini III [1714-1784] que pour les procédures rigoureuses et scientifiques déployées, la topographie de la France connaît un incroyable essor. Avec ces géographes, la publication de cartes géographiques précises s'appuyant sur le canevas géodésique devient réalisable. En revanche, la topographie des fonds marins n'est connue que de manière très approximative.

En 1791, un homme embarque pour sa première mission scientifique, à la recherche de l'expédition de La Pérouse dans le Pacifique. *"Ce voyage est le premier où l'on fit usage des méthodes véritablement rigoureuses pour le levé et la construction des cartes et plans que l'on obtient en naviguant ..."*¹. Les années suivantes, il sera chargé de reconnaître les côtes conquises lors de la révolution et de l'épopée napoléonienne. C'est entre 1816 et 1838 qu'il édifiera son chef-d'œuvre, le pilote français rassemblant l'ensemble des reconnaissances hydrographique des côtes de France (Chapuis, 1999). Cet homme, c'est Beautemps-Beaupré, surnommé le "père de l'hydrographie moderne" par les anglais eux-mêmes¹ ! En plus des 249

¹ Anonyme. Notice sur les services de Mr Beautemps Beaupré. Pochette individuelle n°142, SHD-Marine Vincennes.

cartes et 279 vues de côtes contenues dans son œuvre, se trouvent 184 tableaux des observations des marées faites durant les campagnes de mesures.

5.2.1. Besoin de mesurer le niveau de la mer pour la réalisation des cartes bathymétriques.

Jusqu'alors, le personnel réalisant les levés bathymétriques se trouvaient sur des embarcations à partir desquelles ils mesuraient la profondeur à un instant et à endroit donné, avec des cordes lestées et graduées. Les variations de hauteur d'eau liées à la marée n'étaient pas prises en compte lors d'édification de telles cartes marines. Beautemps-Beaupré, constatant ces conditions de réalisation des cartes publiées explique l'intérêt de faire observer conjointement le niveau de la mer et énonce le protocole à mettre en place pour mesurer les hauteurs dans son ouvrage sur les "*Méthodes pour la levée et la construction des cartes et plans hydrographiques*", publié en 1808 et dont voici quelques extraits :

De la Réduction des Sondes.

Réduire des sondes, c'est ôter du brassiage trouvé sur tous les points d'une côte qui ont été sondés, à des jours différens et à toutes les heures de la marées, le nombre de pieds convenable, pour ne porter sur le plan que les profondeurs d'eau que l'on trouveroit sur ces mêmes points à l'instant précis de la plus basse mer.

Pour faire la réduction des sondes avec exactitude, il faut avoir observé, sur une échelle placée au bord du rivage, l'élévation de la mer de 10 en 10 minutes, ou de 15 en 15 minutes, pendant toute la durée des opérations, et connoître à quel point de cette échelle la mer descend dans les plus grandes marées ; ce que l'on peut savoir par des observations faites à l'époque des équinoxes, ou en comparant l'échelle sur laquelle ou fait des observations journalières, avec une autre échelle fixe et peu éloignée du lieu où l'on sonde.

Cette comparaison, qui doit être répétée plusieurs jours de suite, se fait en observant, en même temps, les marées sur les deux échelles ; et comme l'on sait, d'après l'échelle fixe, de combien la mer s'est tenue chaque jour au-dessus de son niveau le plus bas, il est aisé alors d'en conclure quel est le point où elle descend le plus à l'échelle d'après l'échelle on doit faire les réduction de sondes.

[...]

Lorsqu'on opère sur une étendue de côte un peu considérable, il ne suffit pas, pour pouvoir réduire les sondes avec exactitude, de faire observer les marées sur une seule échelle ; c'est pourquoi, ayant eu à lever la carte de la côte de France depuis Calais jusqu'à Flessingue, je plaçai des observateurs des marées à Dunkerque, Nieuport, Ostende, l'Ecluse de Flessingue : je réduisis les sondes prises entre deux de ces ports, d'après les résultats des observations de marées qui avoient été faites en même temps dans l'un est l'autre.

[...]

Nous pensons qu'il est essentiel de prévenir les personnes qui n'ont point l'habitude des opérations dont nous venons de donner le détail, que les échelles sur lesquelles s'observent les marées doivent être placées le plus près possible de l'entrée des ports ; car dans quelques circonstances nous avons trouvé de grandes différences entre l'élévation de la mer observée dans le fond d'un port et l'élévation observée au même instant sur des échelles placées en pleine côte.

Beautemps-Beaupré explique ainsi la nécessité d'observer la marée en complément des sondes. L'association des deux mesures permet de réduire toutes les sondes à une même référence commune, celle des plus basses mers. Ainsi, toute carte bathymétrique présente une homogénéité en termes des profondeurs exprimées.

Cette première recommandation expose la méthode employée par les hydrographes pour observer le niveau de la mer. Les mesures ont lieu toutes les 10 minutes ou tous les quarts d'heure sur une échelle principale, plus une secondaire si la première s'assèche. Les échelles doivent se trouver au plus près de la côte plutôt qu'à l'intérieur des terres. Pour réduire les sondes sur de grandes surfaces, il est de plus nécessaire de conduire cette observation du niveau marin en différents lieux. La procédure, succinctement exposée en 1808, est complétée dans un autre ouvrage, quelques années plus tard.

5.2.2. Comment observer le niveau marin lors des levés bathymétriques ?

En 1829, avec l'expérience de plusieurs campagnes hydrographiques, Beautemps-Beaupré et Daussy, également ingénieur hydrographe améliorent le protocole en le nommant "*observations du mouvement des eaux*". Ce protocole décrit dans le 4^{ème} paragraphe de l'*exposé des travaux relatifs à la reconnaissance hydrographique des côtes occidentales de France* est repris ci-après :

La première chose dont on doit s'occuper, au début d'une campagne, sur une côte où les eaux de la mer changent continuellement de niveau par l'effet de la marée, c'est de placer un certain nombre d'échelles divisées par pieds et pouces, sur lesquelles on observe ces changements ; attendu que c'est au moyen d'observations de ce genre que l'on peut, lors de la rédaction définitive des travaux, réduire au niveau des plus basses mers les sondes faites à toutes les heures du jour et de la marée.

Il est aisé de concevoir qu'il serait très difficile de sonder toutes les parties du plus petit port, au moment précis d'une basse mer de grande marée, et qu'il serait, à plus forte raison, impossible d'opérer de cette manière sur une grande étendue de côtes.

Le choix des localités où il peut être utile d'observer le mouvement des eaux est facile à faire ; mais il n'en est pas de même du choix des hommes à qui l'on doit confier le soin de ces observations, dont il dépend, en quelque sorte, l'exactitude du résultat des opérations hydrographiques d'une campagne.

Il semble, au premier coup d'œil, qu'il soit très facile de recueillir de bonnes observations du mouvement des eaux ; mais l'expérience m'a appris le contraire. On trouve difficilement d'abord des hommes assez dévoués pour consentir à rester pendant six mois sur le même point de la côte, à l'effet d'observer, chaque jour, de quart d'heure en quart d'heure, et depuis le point du jour jusqu'à la nuit close, l'élévation des eaux de la mer ; et il est plus difficile encore d'obtenir de ces observateurs, dont on est presque toujours éloigné, qu'ils ne marquent rien sur leurs cahiers, toutes les fois qu'ils ont oublié d'observer, ou qu'ils ont été forcés de s'absenter.

En supposant que l'on trouve des hommes dignes d'une confiance entière pour ce genre d'observations, il faut encore se garantir de beaucoup de causes d'erreurs indépendantes de leur volonté ; comme par exemple, le déplacement d'une échelle, le dérangement d'une montre, le mauvais temps, etc.

Une autre cause d'erreurs assez graves est celle qui tient à la nécessité d'avoir des échelles supplémentaires, quand il est impossible de placer l'échelle principale de manière que son pied n'assèche pas dans les plus grandes marées.

Il faut toujours avec l'attention de tracer un méridien près de chaque échelle, afin que l'observateur puisse régler sa montre toutes les fois que le soleil est visible à midi : il faut aussi aller visiter les observateurs du mouvement des eaux, aussi souvent que la chose est possible, et régler chaque fois leurs montres d'après celles dont on se sert pour sonder.

Quand la montre d'un observateur du mouvement des eaux se trouve avancer ou retarder d'un certain nombre de minutes au moment où l'on peut la régler, il faut la mettre à l'heure, et écrire sur le cahier de quelle quantité elle a été avancée ou retardée, mais ne rien changer aux heures des

observations faites précédemment.

Il n'est pas possible d'assigner le nombre d'échelles qu'il convient de placer, parce que cela dépend toujours des localités dans lesquelles on doit opérer.

Ainsi par exemple, j'ai pu me contenter de faire observer le mouvement des eaux sur trois échelles principales dans les environs de Brest, en 1816, 1817 et 1818 ; tandis que j'ai été obligé d'en placer sept depuis Cordouan jusqu'à Bordeaux, en 1825, et que deux échelles principales, l'une à Cordouan, et l'autre au port de Socoa (baie de Saint-Jean-de-luz), ont pu suffire dans la campagne de 1826.

Indépendamment des échelles principales sur lesquelles on doit observer constamment pendant toute la durée des opérations, il est nécessaire de placer des échelles secondaires dans les localités où l'on juge que le mouvement des eaux n'est pas le même qu'au large ; il en faut dans les baies dont les entrées sont fort étroites, et surtout dans les rivières.

Aussitôt qu'une échelle est en place, on doit observer soigneusement à quelle division de cette échelle correspond un objet fixe, afin de pouvoir la remplacer dans le cas où elle serait emportée par la mer, et reconnaître de quel nombre de pieds et de pouces le point zéro de la nouvelle échelle serait élevé ou abaissé par rapport au point zéro de l'ancienne.

Les tableaux des hautes mers et des basses mers observées sur plusieurs points principaux des côtes de France sont des extraits de nombreux cahiers d'observations qui ont servi pour la réduction des sondes : ceux de ces tableaux qui contiennent les observations faites dans la Loire en 1821, prouveront de quelle utilité il est, dans quelques circonstances, de multiplier les échelles secondaires.

Beautemps-Beaupré, seul auteur de ce paragraphe (Daussy ayant rédigé quant à lui *le précis des opérations géodésiques*) apporte dans son exposé, des renseignements précieux sur les causes d'erreurs possibles lors des relevés des hauteurs d'eau :

- Erreur humaine. Tout d'abord, d'après Beautemps-Beaupré le choix des observateurs est prépondérant. Observer le niveau de la mer semble simple, mais répéter cette opération au même endroit durant 6 mois tous les quarts d'heure lors de l'ensoleillement, l'est beaucoup moins. Seul et sans surveillance, à l'occasion d'une absence, l'observateur peut-être amené à interpoler des hauteurs sans le signaler.

- Problèmes matériels et climatiques. Le déplacement d'une échelle, le dérèglement d'une montre, des conditions météorologiques difficiles rendent les mesures délicates, sans même parler de l'installation d'échelles complémentaires lorsque l'échelle principale est asséchée lors des BM.

Afin de palier les ennuis matériels, Beautemps-Beaupré recommande de tracer une méridienne à chaque observatoire, afin de permettre à l'observateur de régler sa montre à midi. Ce dernier doit indiquer sur le registre la grandeur du décalage jour après jour. Concernant les déplacements des échelles, à chaque fois qu'une échelle est installée, l'hydrographe propose de la rattacher à un objet fixe. Ainsi, si l'échelle bouge, il est alors aisé de la replacer exactement comme elle était auparavant.

Il est étrange de constater que le protocole édicté 10 ans plus tard par le successeur de Beautemps-Beaupré, Bégat [1800-1882], soit plus succinct et moins précis comme le montre, le texte suivant, extrait de son traité de géodésie à l'usage des marins ou méthodes et formules trigonométriques relatives au levé et à la construction des cartes :

Observations de la marée.

21. Avant de placer les chiffres de sondes sur les divers calques, il faut les réduire, c'est-à-dire en déduire le brassage que l'on aurait trouvé si l'on avait sondé à l'instant des basses mers d'équinoxe. Pour être à même de faire cette opération, on établit bien solidement ... dans un lieu où les mouvements de la mer sont libres, une poutre divisée en pieds et pouces (on n'a pas encore adoptée les mesures métriques pour les sondes), et on observe de quart d'heure en quart d'heure à quels numéros de cette échelle correspond le niveau de l'eau. Aux approches de la marée haute ou de la marée basse on resserre l'intervalle des observations, afin de mieux déterminer les heures précises de la haute mer et de la basse mer. On est convenu de prendre pour ces instants ceux qui tiennent le milieu entre le moment où elle cesse de monter ou de descendre et ceux où elle commence à descendre ou à monter.

On tient note durant les observations de la direction et de la force du vent ; on observe aussi la hauteur du baromètre, afin de pouvoir apprécier l'effet produit par la pression atmosphérique sur le niveau de la mer.

[...]

Réduction des sondes

26. Lorsque la côte que l'on explore est une plage peu inclinée, on se trouve souvent dans la nécessité de placer plusieurs échelles auxiliaires, afin d'arriver jusqu'à la basse mer. On remarque alors le numéro auquel correspond le niveau de la mer à l'échelle qu'elle est sur le point de quitter et celui qu'elle atteint à celle où l'on va continuer les observations. Avec cette donnée on peut rapporter toutes les observations au zéro de la même échelle. On marque aussi sur une roche, on tout autre objet fixe du rivage qui se trouve dans le voisinage de l'échelle, la trace du niveau de l'eau relatif à l'une des quelconque de ses divisions. Avec cette précaution on pourra toujours rendre les observations comparables entre elles, quand bien même un accident obligerait de remplacer cette échelle par une autre.

Ici, Bégat ne fait état de conditions concernant l'observateur. Les observations ont lieu tous les quarts d'heure, mais avec un pas de temps plus petit lors des étales de PM ou de BM afin de pouvoir déterminer précisément l'heure de l'extremum. Cette information n'est pas indispensable pour la réduction des sondes ; elle l'est par contre pour la publication des tableaux de marées dans le *Pilote français* imprimé en 1844 (Chapuis, 1999). L'hydrographe reprend des indications similaires à celles de Beautemps-Beaupré pour le rattachement d'une échelle secondaire à l'échelle des marées principale. Enfin, Bégat justifie pourquoi l'observateur doit consigner les informations sur le vent ainsi que la pression atmosphérique suite à l'étude de Daussy publié en 1831 dans la *"Connaissance des tems"*. Il y est fait état de l'influence des phénomènes météorologiques sur le niveau d'eau, effets argumentés grâce à l'étude d'un grand nombre d'observations.

Pour compléter cette description, dans un rapport au ministre en 1859¹, Chazallon expose les critères de recrutement des observateurs des marées par Beautemps-Beaupré, qui "choisissait [...] des hommes presque illettrés. Ceux qui avaient reçu une certaine instruction s'astreignaient rarement à faire, en quelques sorte, le métier de machine et ils déguisaient leur manque d'assiduité en interpolant les observations". Ainsi, pour lutter contre les diverses fraudes possibles des observateurs de marée, Beautemps-Beaupré préférait-il écarter les personnes intelligentes et malines au profit d'autres moins "curieuses".

¹ Chazallon R. Rapport à Monsieur Hamelin, Ministre de la Marine, le 6 décembre 1859. Archives SHOM.

Beautemps-Beaupré a su transmettre à chacune des campagnes hydrographiques dont il avait la charge, toute sa rigueur scientifique pour la réalisation des cartes bathymétriques les plus précises jamais obtenues jusqu'alors. De nombreux ingénieurs hydrographes profitèrent des leçons inculquées par "*le père de l'hydrographie moderne*". L'un d'entre eux, Chazallon, simple élève lors la mission hydrographique de 1825 (Beautemps-Beaupré, 1829) ne pouvait pas se douter que, quelques années plus tard, son nom deviendrait indissociable du concept même de marégraphie.

5.3. Chazallon, "père" du premier réseau marégraphique français.

Etrangement, le nom de Chazallon n'a pas connu la même gloire et postérité que celui de Beautemps-Beaupré. Par exemple, son nom n'est pas cité une seule fois dans l'ouvrage de référence de Cartwright paru en 1999 : "*Tides, A Scientific History*". Pourtant, Chazallon est à tout jamais associé aux études sur la marée. Depuis la création des *Annuaire des marées* jusqu'au développement et l'installation de marégraphes sur les côtes de France en passant par la découverte des ondes quart, sixième et huitième diurnes. La rigueur, l'ingéniosité, la mobilité et le travail acharné de Chazallon permirent à la France d'avoir une couverture d'observatoires du niveau de la mer de premier ordre dès la fin de la première moitié du 19^{ème} siècle, observatoires appelés à fonctionner en continu durant plus d'un demi siècle. En 2008, j'ai rédigé une note dans la lettre de RONIM¹. Cette dernière dresse le travail de Chazallon pour hisser la France dans le peloton de tête des nations observant et étudiant le niveau de la mer.

5.3.1. Biographie de l'hydrographe.

Il convient, avant de poursuivre, de connaître le parcours d'Antoine Marie Remy Chazallon (portrait, fig.5.1), né le 17 nivôse an X (10 janvier 1802) à Désaignes en Ardèche, de parents agriculteurs et qui y est décédé, à l'âge de 70 ans le 23 décembre 1872².

Sa formation le conduisit le 14 décembre 1822, à l'école Polytechnique jusqu'au 1^{er} novembre 1824 où il fut incorporé dans le corps des ingénieurs hydrographes³. Sous la direction de Beautemps-Beaupré, il participa à l'élaboration du Pilote français lors des reconnaissances des côtes de France entre 1822 et 1837. En 1838, il s'attela à effectuer de nombreux calculs de prédiction, lesquels il publia l'année suivante en un premier *Annuaire des marées*. A partir de 1839, il fut chargé du service des marées, nouvel organe régi par le dépôt des cartes et plans de la Marine. Avec ses nouvelles attributions, pas moins de 15 missions lui seront affectées pour l'installation, la mise en place et le contrôle des marégraphes installés le long des côtes de France. De plus, il effectuera comme chef de

¹ URL : http://www.shom.fr/fr_act_oceano/maree/lettre RONIM 2008.pdf (consulté le 5 octobre 2008).

² Mairie de Désaignes. Acte de décès de Chazallon. S.H.D. – Marine Vincennes, pochette individuelle n°474.

³ Certificat d'admissibilité de Chazallon à l'école Polytechnique. S.H.D. – Marine Vincennes, pochette individuelle n°474.

mission, une dernière campagne de reconnaissance hydrodynamique autour du port du Havre en 1856. Chazallon gravit toutes les promotions offertes aux ingénieurs hydrographes : d'abord élève hydrographe au 9 décembre 1824, il fut promu ingénieur hydrographe de 3^{ème} classe le 8 avril 1829, puis ingénieur hydrographe de 2^{ème} classe le 27 mai 1841 avant de devenir ingénieur hydrographe de 1^{ère} classe le 15 septembre 1848¹. Sa carrière ne connaîtra pas d'autre avancement malgré l'ampleur de son travail ; la raison en est certainement son franc parler dans la préface de l'*Annuaire des marées* de 1848. En effet, Chazallon y critiqua non seulement des documents livrés au public par le dépôt de la Marine mais également les missions hydrographiques entreprises au large des côtes d'Italie, plus pour des raisons politiques que pour des choix de navigation². Pour cela, il reçut un blâme. Très attaché à sa terre, il mit sa carrière d'ingénieur hydrographe entre parenthèses lorsqu'il fut élu à l'assemblée constituante par les concitoyens de son département natal le 23 avril 1848 (Robert et Cougny, 1889). Chazallon abandonna sa carrière politique lors de la dissolution de l'assemblée par Louis-Napoléon Bonaparte le 2 décembre 1851 durant son coup d'état. Cet interlude parlementaire est certainement à lier avec la carrière politique de François Arago, éminent savant. Ce dernier, député sans interruption entre 1830 et 1852 et ministre de la Marine en 1848³ fit prendre conscience aux députés de l'intérêt d'observer la marée⁴ (5.3.2.1, 5.3.2.2). Chazallon par cet épisode, comprit-il alors, que pour soutenir les sciences, il fallait siéger au Palais Bourbon ?

Cinq ans plus tard, Chazallon, toujours désireux de servir les sciences, proposa ses services aux académies ouvrant des sièges dans la discipline où il excellait. Appuyé par Théodore Ducos, ministre secrétaire d'Etat, de la Marine et des Colonies, il présenta sa candidature pour la place de membre adjoint au Bureau des Longitudes laissée vacante suite au décès de Beautemps-Beaupré. Son dossier ne fut pas retenu, tout comme en 1856 lorsqu'il soumit sa candidature à l'Académie des Sciences dans la section géographie et navigation. Pourtant, l'inventaire des articles publiés par Chazallon dans les *Comptes-rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* est élogieux :

¹ Cahier des services de Chazallon. S.H.D. – Marine Vincennes, pochette individuelle n°474.

² Ministère de la Marine. Lettre au Directeur général du dépôt des Cartes et Plans de la Marine, le 03 novembre 1847. S.H.D. – Marine Vincennes, pochette individuelle n°474.

³ URL : <http://www.obsmp.fr/histoire/acteurs/arago.fr.shtml> (consulté le 5 octobre 2008).

⁴ Séances de la chambre des députés des 5 et 9 juin 1837.



Fig. 5.1. – Portrait de Chazallon (date inconnue). Index biographique – Archives de l'Académie des Sciences.

- Mémoire sur les marées des côtes de France, et particulièrement sur les lois du mouvement de la mer pendant qu'elle s'élève et qu'elle s'abaisse (1842) ;
- Sur les marées du port de Toulon (1842) ;
- Sur les observations des marées faites à Alger (1844) ;
- Sur l'installation d'un maréographe à Toulon (1844) ;
- Sur les marées d'Akaroa (Nouvelle-Zélande) (1844) ;
- Note sur la marée solaire de Brest (1854) ;
- Note sur l'oscillation du niveau d'équilibre des mers (1854) ;
- Réflexions sur les échelles de marée (1854) ;
- Sur le mouvement des diverses ondes dont se compose la marée (1856) ;

Souffrant à partir de 1857 d'une sciatique¹, l'hydrographe obtient à plusieurs reprises des congés pour se soigner. Lors de son congé pour maladie en 1857, l'armoire, servant à ranger l'ensemble des mesures "*régulièrement suivant leurs dates et suivant les ports*" provenant des différents observatoires, dont il "*avait la clé, et qui avait été construite exprès pour le service des marées, a été démolie ... Tous les documents qu'elle renfermait ont été éparpillés sur une table et sur le parquet et j'ai même trouvé un petit rouleau de courbes au pieds de l'escalier. Toutes les feuilles ont alors été placées pêle-mêle dans un placard sans rayons, dépourvu de clé pendant longtemps et situé dans une pièce ouverte à tout venant*". Cet extrait démontre l'esprit méthodique, de rigueur et ordonné de Chazallon. Nul doute que cet événement, dont la responsabilité était à imputer aux membres du personnel du dépôt des cartes et plans, a fortement marqué l'ingénieur et que son travail s'en est trouvé affecté.

Est-ce à cause de cet épisode ou de sa maladie qu'il reçut en décembre 1859 un nouveau blâme pour motifs d' "*ordres... exécutés avec une coupable lenteur... pour initier M. Gaussin aux méthodes de calcul... pour la rédaction de l'Annuaire des marées*"² ? Affaibli, fatigué, ayant sa vue très affaiblie³, il fit valoir ses droits à la retraite en octobre 1860, retraite qu'il obtint le 5 janvier 1861. L'ingénieur hydrographe se retira alors dans son village d'origine où il devint, d'après Robert et Cougny (1889), membre correspondant de l'Académie des Sciences le 5 juillet 1869.

Malgré les deux blâmes infligés par sa hiérarchie durant son parcours professionnel, Chazallon, révolutionna l'hydrographie côtière :

¹ Bégat. Lettre au conseiller d'Etat, directeur du Personnel, le 11 août 1857. . S.H.D. – Marine Vincennes, pochette individuelle n°474.

² Ministre de la Marine. Lettre au directeur général du dépôt de la Marine à Paris, le 21 décembre 1859. S.H.D. – Marine Vincennes, pochette individuelle n°474.

³ Chazallon R. Rapport et renseignements sur les marégraphes. Lettre du 6 décembre 1859 au Ministère de la Marine, Hamelin. Archives du SHOM.

- en donnant naissance au premier réseau d'observatoires automatiques du niveau de la mer en France suivant un protocole unique ;
- en proposant une solution simple et précise à l'un des problèmes majeurs des navigateurs : l'*Annuaire des marées*.

C'est pour tout cela notamment que Chazallon obtint plusieurs récompenses :

- l'ingénieur hydrographe fut élevé le 28 avril 1842¹ au rang de Chevalier de la légion d'honneur et non en 1871 comme l'indique Cartwright dans : Rémi Chazallon – A forgotten "ingénieur hydrographe" (2003a). Cette distinction, c'est grâce à Beautemps-Beaupré qu'il l'obtint. En effet, ce dernier avait déjà demandé par deux reprises, le 08 septembre 1838 et le 19 avril 1839 à ce qu'elle lui soit décernée².
- En 1859, Chazallon reçut une médaille d'argent de la Société d'Encouragement pour la mise au point du premier appareil à enregistrement mécanique du niveau de la mer en France³ (cf. 5.3.4.1.).

5.3.2. Pourquoi un tel réseau ?

A la fin des années 1830, une effervescence considérable stimule la France : la révolution industrielle, la conquête de nouveaux territoires et la compétition avec notre meilleur ennemi : l'Angleterre. Le dépôt des cartes et plans, futur Service Hydrographique de la Marine, géré par Beautemps-Beaupré (Chapuis, 1999) est un élément clef dans ce dispositif concurrentiel avec le pays d'outre-Manche. En effet, les nouveaux espaces se gagnent en prenant la mer et les échanges commerciaux maritimes explosent.

5.3.2.1. Perfectionnement des connaissances sur la marée.

Comme c'était déjà le cas par le passé (cf. chapitres 3 et 4), la volonté politique donne l'impulsion pour le premier réseau marégraphique français par sa densité et l'uniformité dans la réalisation des observations. De plus, ce premier réseau est également celui qui a duré le plus longtemps en France. C'est à Arago, en tant que député que l'on doit la prise de conscience par le pouvoir législatif et le pouvoir exécutif de la nécessité de faire observer les hauteurs d'eau sur plusieurs points des côtes de l'hexagone et de manière suivie. Chazallon note dans l'*Annuaire des marées* de 1839 qu' "*un député illustre, dont la haute intelligence a indiqué et provoqué tant de progrès scientifiques, a déjà appelé l'attention des Chambres sur le phénomène des marées et, en 1836 et 1837, 23,000 francs ont été votés pour cet objet sur la proposition de M. Arago*". Lors des séances des 5 et 9 juin 1837 à la chambre des députés,

¹ Fiche de Matricule de la Marine, septembre 1857. S.H.D. – Marine Vincennes, pochette individuelle n°474.

² Cahier des services de Chazallon. S.H.D. – Marine Vincennes, pochette individuelle n°474.

³ Chazallon R. Rapport et renseignements sur les marégraphes. Lettre du 6 décembre 1859 au Ministère de la Marine, Hamelin. Archives du SHOM.

Arago s'exprime sur la manière dont sont faites les observations des marées, afin d'obtenir les crédits pour la seconde année. Les paroles prononcées sur ce sujet, rassemblées par Barral (1855) dans la biographie dédiée à Arago, sont réunies ici avec, le premier discours :

1^{re} Séance du 5 juin.

M. le rapporteur du budget déclare que les observations des marées, dont, au reste, il reconnaît la nécessité, coûtent trop : quelques cadrans solaires, dit-il, et quelques mâts divisés ne sont pas si dispendieux. Il est vrai, Messieurs, qu'à une certaine époque les mâts divisés et les cadrans solaires suffisaient à l'observation des marées. Il n'en est pas ainsi aujourd'hui : la science est devenue plus exigeante ; il lui faut des fractions de minutes que les cadrans solaires ne peuvent pas déterminer ; il lui faut des montres dont la marche soit assez régulière pour donner l'heure de l'observation avec exactitude, quand le soleil ne se montre pas, et vous savez combien cela arrive souvent dans plusieurs de nos ports, et surtout à Brest.

J'arrive à faire des remarques analogues relativement aux mâts divisés. Sans doute, si la surface de l'eau était constamment tranquille, sa hauteur pourrait, à chaque instant, être facilement déterminée ; mais la mer est souvent très-agitée, on, est alors obligé de procéder par voie de moyennes, ce qui n'est ni commode ni exact ; et le ministère de la marine à l'intention de faire faire à l'avenir des observations dont il s'agit avec des machines ingénieuses d'une invention récente, et qui d'elles-mêmes enregistreront les hauteurs successives du niveau de l'eau.

Je termine par une autre considération bien propre à faire voir combien l'emploi de ces nouvelles machines est désirable. Là où des observations de marées ont été instituées, les observations de jour sont faites assidument ; celles de nuit, au contraire, manquent ; cependant la science en aurait le plus grand besoin. Eh bien, il ne faut pas mettre aux prises, la nuit et par un très-mauvais temps, la paresse et le devoir, car la paresse l'emporterait, et l'on aurait des observations supposées, fabriquées ; la machine coupera court à cette grave difficulté.

Le premier discours d'Arago à l'Assemblée Nationale est riche d'enseignements : tout d'abord, le rapporteur au budget semble très réticent à renouveler l'attribution de 23 000 francs pour l'observation des hauteurs d'eau. Il s'explique en arguant du fait que le prix d'achat du matériel nécessaire est très inférieur à la somme demandée. Arago développe alors que les anciennes techniques de mesures sont dépassées et que pour obtenir des données précises, aussi bien de jour comme de nuit, il faut les réaliser avec des outils modernes. Ainsi, dès 1837 au moins, de Rosamel [1774-1848], ministre de la marine entre le 6 septembre 1836 et le 31 mars 1839, présente son désir de faire observer le niveau marin par "*des machines ingénieuses d'une invention récente*" : les marégraphes (cf. 5.3.4.1).

Comme le souligne Arago, les marégraphes sont récents. La première machine, fabriquée en Angleterre par Palmer, ingénieur civil en 1831, fonctionna pour la première fois à Sheerness, entre le 6 et le 21 septembre de la même année (Cartwright, 1999). En 1837, si Arago ne nomme pas l'appareil, c'est tout simplement parce qu'on ne l'avait pas encore baptisé en français (cf. 1.4.1.3).

Chazallon expose dans l'*Annuaire des marées* de 1843 l'intérêt d'avoir des observations précises du niveau marin pour l'amélioration des sciences :

Si l'on possédait dans plusieurs ports une série non interrompue de bonnes observations on en déduirait, certainement, des conséquences fort précieuses pour la théorie des fluides ; car malgré les travaux des divers géomètres, il reste beaucoup à faire à ce sujet. Comment pourrait-il en être autrement lorsqu'on ne sait pas résoudre le problème hydrodynamique le plus simple, celui de l'écoulement par un grand ou petit orifice ?

Au reste, quelle que soit la puissance actuelle des mathématiques, on ne doit pas, dans leur

application à l'étude des divers phénomènes, s'abandonner sans réserve à ce seul guide, et l'expérience doit toujours marcher à nos côtés. C'est ainsi que Laplace a rectifié la formule de la vitesse de propagation du son, et, malgré ses admirables travaux, c'est ainsi que je crois être parvenu à perfectionner sa théorie des marées. [...]

Les esprits laborieux ne doivent donc pas rebrousser chemin, lors même qu'ils se trouvent conduits dans un champ déjà exploré par un homme de génie, la nature est tellement riche et féconde qu'il reste toujours quelque chose à glaner.

D'après l'extrait précédent, Chazallon explique que des observations précises permettent, de résoudre au moins partiellement divers phénomènes. Elles peuvent également améliorer les connaissances connues jusqu'alors. Grâce aux mesures exactes qu'il avait à sa disposition, l'ingénieur hydrographe réussit à perfectionner la théorie dynamique de la marée de Laplace qui n'en disposait pas d'autant (cf. 5.3.2.4).

5.3.2.2. Compétition "positive" avec les anglais.

Lors de la seconde intervention d'Arago à l'Assemblée Nationale, toujours sur le même sujet, le savant insiste sur la nécessité de faire observer le niveau marin à de multiples endroits des côtes françaises. Le ministre de la Marine réagit à ces injonctions. Les deux protagonistes prennent alors comme exemple ce qui se réalise outre-Manche. L'extrait, est repris sur la page suivante :

2^e Séance du 9 juin.

M. Arago : Je présenterai à la Chambre quelques observations succinctes sur les travaux scientifiques importants qui pourraient être exécutés par divers employés de la marine. Le corps enseignant maritime renferme cinq professeurs d'hydrographie de première classe, cinq de deuxième, six de troisième, vingt-huit de quatrième. Ces professeurs, je crois, ne sont pas aussi activement occupés qu'on pourrait l'imaginer ; je viens donc proposer à M. le ministre de la marine de vouloir bien les charger d'un travail qui leur ferait honneur et pourrait être d'une grande utilité, je veux parler de l'observation des marées. On ne fait aujourd'hui ces observations d'une manière régulière qu'à Brest. Il serait très-utile qu'on les suivît dans un plus grand nombre de ports ; vous procureriez ainsi aux navigateurs des données importantes sur l'heure de l'établissement, et vous fourniriez au géomètre et au physicien des éléments féconds en curieux résultats. Il est d'ailleurs une circonstance du moment qui me fait vivement désirer que M. le ministre de la marine prenne en grande considération l'observations que j'ai l'honneur de lui faire : nos voisins, les Anglais, s'occupent maintenant de ces observations des marées avec un soin, une suite, une exactitude, dignes des plus grands éloges. J'ai dans la main deux lettres, l'une de M. Whewhel de Cambridge, l'autre de M. Lubbock, de Londres, par lesquelles j'apprends que l'amirauté a ordonné que des observations fussent faites dans cinq cents points des îles Britanniques. Ces observations, comparées avec celles des côtes de France, conduiraient à des résultats également utiles à la marine et aux sciences spéculatives.

M. Le Ministre de la Marine : Je ferai observer à M. Arago que les Français contribuent à ce travail.

M. Arago : Je connais la nature de la demande qui vous a été adressée récemment. Il n'était question que d'observations simultanées faites à certains jours choisis ; tandis que je réclame des observations continues, permanentes.

M. Le Ministre de la Marine : On les fait sur un très-grand nombre de points. Je réponds à l'orateur

que je m'occuperai de donner suite à son idée. Je ne lui garantis pas de quelle manière je le ferai.

Arago propose ici que les 44 professeurs d'hydrographie composant les différentes classes soient chargés d'observer le niveau marin. Pourquoi ce choix ? Arago souhaitant certainement éviter les foudres du rapporteur au budget propose cette solution, économe en terme humain pour libérer un maximum d'argent dans l'achat d'appareils de mesures. Le choix d'Arago est d'autant plus judicieux que les protocoles de 1701 (cf. 3.2.1.) et 1803 (cf. 4.2.2) invitent aussi les professeurs d'hydrographie à réaliser des observations des hauteurs d'eau.

Il est probable qu'en 1835, les professeurs d'hydrographie furent aussi mis à contribution dans la première étude globale de la marée. Le long des côtes d'Europe et d'Amérique du Nord, pas moins de 666 observatoires disséminés aux USA, Espagne, Portugal, Belgique, Pays-Bas, Danemark, Norvège, Angleterre, Ecosse, Irlande et France mesurèrent au cours du mois de juin 1835 le niveau de la mer. Cette première synchronisation inter-nations de mesures de hauteurs de la mer aboutit en 1836, à la première publication sur le sujet dans les *Philosophical Transactions*, traité par le savant anglais Whewell [1794-1866]¹. Sur la totalité des observations, 16 le furent sur les côtes françaises. Le nombre de sites en France, même s'il semble modeste, représente néanmoins le travail d'autant de personnes. Seul les professeurs d'hydrographie, assez nombreux et biens répartis sur les côtes de France, pouvaient répondre à ce genre de demande d'actions simultanées.

Whewell reconduisit au mois de juin 1837 une campagne de mesures inter-nations du même genre dont les résultats furent publiés la même année. Les français observèrent le niveau de la mer sur 5 sites distincts : Brest, St Servan, Cherbourg, le Havre et Ouessant contre près de 500 observatoires pour les anglais ! Les échanges lors de la séance du 9 juin entre Arago et le ministre de la Marine portent justement sur cette campagne de mesures. Il est probable qu'Arago ait choisi le moment de son intervention à l'hémicycle durant cette campagne, pour sensibiliser au mieux les députés à sa demande : observer de manière permanente le niveau de la mer sur plusieurs sites au lieu d'en effectuer que de manière épisodiques les mesures.

De par sa culture scientifique, Arago put suivre de près ce dossier grâce à sa présence continue à l'Assemblée Nationale entre 1830 et 1852. Cela n'en fut pas de même pour les ministres de la Marine sur le même laps de temps. En effet, entre 1836 et 1850 pas moins de 17 ministres se succédèrent rendant d'autant plus difficile le suivi de ce projet si singulier pour un novice dans le domaine.

5.3.2.3. Limites des observations financées avec les fonds votés annuellement par l'Assemblée.

Le ministre de la Marine, obtient le dernier mot lors de l'échange à l'assemblée le 9 juin 1837 (cf. 5.3.2.2) en promettant à Arago de réfléchir à sa proposition. Chazallon, expose dans l'*Annuaire des marées* de 1839 la suite des événements : "*M. de Rosamel, pensant avec raison que l'on n'obtiendrait d'utiles résultats qu'autant que ces observations seraient faites*

¹ URL : <http://plato.stanford.edu/entries/whewell/> (consulté le 5 octobre 2008).

d'une manière convenable et uniforme, demanda au dépôt de la marine qu'un ingénieur hydrographe fût chargé de la direction de ces observations. Malheureusement quelques circonstances ont, sans doute, fait perdre de vue, une demande flatteuse pour le corps des ingénieurs, et toute dans l'intérêt de la science nautique". Ce n'est qu'en 1839, que Beautemps-Beaupré invite dans un Rapport, Halgan [1771-1852], directeur général du dépôt de la Marine à proposer le nom de Chazallon, "qui s'occupe de recherches sur les marées des côtes de France, soit spécialement chargé de la surveillance de ce service et qu'il reçoive l'ordre de se transporter sur tous les points des côtes de l'Océan où l'on fait maintenant des observations des marées, pour s'assurer d'abord de la manière dont ces observations ont été faites jusqu'à ce jour, et ensuite pour faire placer de nouvelles échelles et instruire de nouveaux observateurs dans les localités où il reconnaîtra qu'il est nécessaire d'en établir."¹ Dès lors, Chazallon, investi de ces nouvelles responsabilités, ne cessera jusqu'à sa retraite à diriger le Service des Marées.

A la suite de l'extrait précédent tiré de l'*Annuaire des marées*, Chazallon explique les limites des observations réalisées entre 1837 et 1839 : *"Il m'est pénible d'ajouter qu'il n'est guère possible de tirer parti de la plupart de ces observations, quoique faites avec beaucoup de zèle ; car les observateurs, abandonnés à eux-mêmes, ne pouvaient soupçonner la valeur de certains éléments qu'ils ont négligés. Ainsi, relativement l'heure de la haute mer, les uns admettent tacitement que c'est l'instant où la mer ne monte plus d'une manière sensible, les autres que c'est l'instant où elle commence à baisser d'une manière un peu sensible. Or, pour faire sentir le vague de pareilles déterminations il me suffira de dire que, lors des faibles marées, ces instants diffèrent quelquefois de 2 heures et ½. La seule détermination convenable est celle qui tient le milieu entre les deux instants précédents ; d'autant plus qu'on peut alors multiplier les observations et les rendre presque indépendantes de l'agitation de la mer".* Sans procédure à suivre pour mesurer le niveau de la mer, les observateurs étaient condamnés à définir eux-mêmes leur propre protocole. Comme l'explique Chazallon, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour mesurer, par exemple, l'heure de la PM. Plus grave, lorsque les observateurs déterminaient les hauteurs de façon très approximatives ou pire encore lorsqu'ils sous-traitaient leur travail à d'autres. C'est ce que Chazallon explique dans un rapport et renseignements sur les marégraphes en 1859² : *"la difficulté, plus grande encore, de trouver des observateurs sur l'exactitude et la sincérité desquels on puisse compter, rendit ces observations à peu-près inutiles. Ainsi les observations qui avaient eu lieu à Granville, en 1838 et 1839, se faisaient en prenant la hauteur des pleines mers à vue d'œil sur les assises de la jetée qui ont en moyenne un demi-mètre de hauteur ! A st Servan l'agent chargé des quatre observations journalières touchait pour cet objet une indemnité annuelle de dix-huit cents francs et faisait faire son service par un ancien jardinier qui ne savait ni lire ni écrire, ni reconnaître l'heure sur une montre. En outre, l'échelle de marée, presque illisible, était inclinée d'environ 30° avec la verticale par suite du jeu des haubans".* Le manque de rigueur des observateurs, la multiplicité des méthodes rendent difficiles l'étude et la comparaison des mesures entre elles. Uniformiser les protocoles et de former des observateurs triés sur le volet devient de plus en plus indispensable.

¹ Beautemps-Beaupré. Rapport à Monsieur Halgan vice-amiral, Pair de France, Directeur général du dépôt de la marine, le 1^{er} mai 1839. Archives SHOM.

² Chazallon. Rapport à Monsieur Hamelin, Ministre de la Marine, le 6 décembre 1859. Archives SHOM.

5.3.2.4. Prédire et propager : naissance de *l'Annuaire des marées*.

Les mesures du niveau marin, obtenues jusqu'alors grâce au concours des observateurs des marées permirent à Laplace, avec les observations faites à Brest, de définir et perfectionner sa théorie dynamique de la marée : la réponse de la mer à la force génératrice de la marée prenant la forme d'ondes générées de manière diffuse à travers les océans. L'utilisation de la formule de Laplace est de deux types :

- Application complète de la formule de Laplace pour le calcul des hauteurs de PM et BM ;
- Utilisation des composantes semi-diurnes seules, pour le calcul de l'heure de la PM à partir de l'heure de la PM précédente, par une méthode itérative et détermination de l'heure de la BM encadrée par les deux PM.

Grâce à cette méthode, il devint alors possible de prédire la marée, mais pour le seul port de Brest. Pour les autres ports, des "*corrections locales*" étaient appliquées aux résultats théoriques déduits pour Brest (Chazallon, 1839). C'est en 1839 que fut publié le premier *Annuaire des marées* au monde. Cet annuaire, c'est en France qu'il a effectivement vu le jour, soit un an avant la publication par Whewell de l'annuaire anglais souvent donné comme le premier du genre (Gillet, 1998). L'auteur à l'origine du véritable premier annuaire n'est autre que Chazallon. Il explique dans le premier volume de *l'Annuaire des marées* (1839) d'où lui est venue une telle idée :

Les marées étant très-considérables dans la plupart de nos ports de l'Océan, et les moyens employés par les marins, soit pour obtenir l'heure, soit pour apprécier la grandeur du flux à un jour donné, étant trop peu précis, j'ai pensé que l'on accueillerait avec plaisir l'annuaire qui renfermerait ces quantités calculées pour tous les jours de l'année. A la vérité le bureau des longitudes, dans sa sollicitude pour les navigateurs, publiait annuellement les coefficients relatifs au port de Brest pour l'époque des syzygies ; mais, outre que les marées des diverses localités ne sont pas rigoureusement proportionnelles à ces coefficients, j'ai pu me convaincre bien souvent que l'immense majorité des caboteurs ne savait pas tirer parti de ces nombres. [...]

L'idée de l'annuaire que j'offre aux navigateurs remonte aux années 1831-1832, époques où j'étais employé à lever le plan des îles Chausey et de Ecrehoux. Le phénomène des marées se développe très en grand dans ces localités, et les courants qui en résultent, surtout dans la déroute, sont d'une violence extrême qui plus d'une fois a failli m'être funeste.

J'ignorais alors que M. Simonin, professeur d'hydrographie au Croisic (actuellement à Granville avait déjà voulu, dès 1828, réaliser une idée analogue, et s'était livré à ce sujet à de longs et pénibles calculs. Je regrette que l'on n'ait pas à cette époque secondée les louables efforts de ce professeur. Comme approximation, son travail eût déjà été utile aux navigateurs.

La raison pragmatique est le principal moteur qui a dirigé Chazallon dans l'invention de *l'Annuaire des marées* : lorsqu'on est en mer, il est difficile de se lancer dans de longs calculs pour déterminer l'heure et la hauteur de la BM par exemple. De plus, les pilotes de bateaux n'avaient pas tous les connaissances nécessaires pour utiliser les formules de Laplace. Cette réflexion, Chazallon ne l'aurait certainement pas menée s'il n'avait pas été directement confronté aux réalités du terrain. Il comprit rapidement que le futur développement des échanges maritimes allait conduire à construire des bâtiments accusant des tonnages de plus en plus importants et donc, ne pouvant entrer dans les ports qu'à des moments précis comme il l'écrit dans *l'Annuaire des marées* en 1843 :

A mesure que les cartes et les plans des côtes de France, qui ont été explorées avec tant de soin, se répandront de plus en plus dans la marine marchande, l'utilité de l'Annuaire des marées se fera mieux sentir. Plusieurs localités, regardée comme d'un abord facile et dangereux, cesseront d'être aussi redoutables quand on connaîtra d'une manière précise, au moment de la pleine mer ou de la basse mer, la quantité d'eau que l'on trouve sur certains dangers. Le marin intelligent pourra même se créer, au milieu des écueils, de nouvelles passes qui, selon l'état de l'atmosphère, abrègeront ses courses, et devront, par conséquent, accroître ses bénéfices ; car le temps est d'une grande valeur parmi les populations laborieuses. Le temps, c'est de l'argent, dit un proverbe anglais.

L'Annuaire donnant tous les jours, pour chaque lieu, l'heure de la pleine mer et de la basse mer, ainsi que la grandeur de la marée, le navigateur pourra en déduire, par l'observation et la comparaison avec l'heure du plein à la côte voisine, des remarques importantes et profitables sur la force et la direction des courants. Ces sortes de données pourront surtout se recueillir dans les parages très fréquentés, dans les traversées de Bayonne à Bordeaux, de Bordeaux à Nantes, au Havre, à Dunkerque, etc.

Lorsque la navigation à la vapeur aura pris plus d'extension, la prédiction exacte des marées acquerra une nouvelle utilité ; car la marche des vapeurs étant beaucoup plus indépendante de la direction des vents que celle des bâtiments à voile, on peut prévoir l'instant où ils s'engageront dans telle ou telle passe, l'instant où ils s'engageront dans telle ou telle passe, et s'assurer ainsi à l'avance s'ils y trouveront une quantité d'eau convenable. Les départs pourront être réglés en conséquence ; il en résultera moins de désagrément pour les passagers et plus de régularité dans le service, ce qui est d'une haute importance dans les affaires commerciales.

Chazallon prend aussi conscience que les échanges maritimes, jusqu'alors tributaires du vent vont rapidement être bouleversés avec les bateaux à vapeur, naviguant indépendamment des conditions météorologiques. Cette "révolution sur mer", rendant indispensable une connaissance des heures et hauteurs des PM et BM appelait tout naturellement à voir publier les *Annuaire des marées*.

Après la publication du premier *Annuaire des marées*, l'hydrographe s'aperçut que les prédictions, calculées à partir de la méthode de Laplace n'étaient pas parfaites comme il l'écrit dans ce même *Annuaire des marées* (1843) :

Lorsque je commençai à m'occuper du phénomène des marées, j'étais bien loin de songer à la nécessité de modifier les formules de la mécanique céleste, je me proposais seulement d'en tirer parti pour la prédiction des marées, et je pensais qu'il suffirait de déterminer convenablement les constantes qu'elles renferment pour les rendre applicables aux diverses localités. En s'appuyant sur ces formules, on devait pouvoir prédire, les hauteurs de la mer non seulement aux instants du maximum ou du minimum, mais encore à un instant quelconque ; c'était dans ce but que j'avais inséré une table fort simple dans l'Annuaire 1839 [...] Cette table n'a pas été reproduite dans l'Annuaire de 1840, parce que je reconnus bientôt qu'elle fournissait, pour certains ports, des résultats trop erronés et dès lors il devint manifeste pour moi que les formules de Laplace étaient incomplètes.

Chazallon, après s'être aperçu de diverses imperfections dans la formule de Laplace, réussit à perfectionner les équations de cet illustre savant en découvrant des "ondulations assez considérables dont personne n'avait encore signalé l'existence, et dont la période est $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{12}$ de jour lunaire. C'est principalement à la marée engendrée par la première ondulation qu'est due la différence entre la durée du flot et du jusant et la tenue du plein dans divers ports". Cette découverte fit l'objet d'une communication scientifique parue dans les *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des sciences* en 1842.

Cette formule, dite de Laplace-Chazallon ne sera définitivement abandonnée pour calculer les *Annuaire des marées* qu'au début des années 1990, le SHOM lui préférant depuis lors pour prédire la marée dans tous types de milieux¹, la méthode harmonique, plus universelle et plus précise.

5.3.3. Présentation de la structure.

Duperré [1775-1846], ministre de la Marine et des Colonies, nomma Chazallon en 1839 à la direction du Service des Marées. Cette nomination insuffle la mise en place du premier réseau marégraphique français. En quelques années, des observatoires se construisent tout le long du littoral français, restant pour la plupart en fonctionnement durant plusieurs décennies.

5.3.3.1. Sa mise en place.

Chazallon explique dans l'*Annuaire des marées* de 1840 que, rapidement après sa nomination au poste de responsable du service des marées, il dut : *"D'après les ordres de l'amiral Duperré, ministre de la marine, et sur proposition expresses du vice-amiral Halgan, directeur du dépôt des cartes et plans de la marine, je viens de parcourir une partie du littoral afin d'organiser un meilleur mode d'observations de marée, et j'espère, avec l'appui et les conseils des hommes éminents du bureau des longitudes, réussir dans l'accomplissement de la tâche qui m'a été confiée"*. En 1840, le nom du Bureau des Longitudes, gage scientifique de la mise en place du réseau marégraphique apparaît dans les écrits officiels de Chazallon. De plus, l'organisme avait encore à cette époque, la responsabilité de l'obtention des mesures faites à Brest. Pourtant, l'assemblée ne sera plus guère consultée par Chazallon dans ses choix et décisions.

S'intéressant aux déplacements de Chazallon pour la mise en place du réseau, Duperré commanda à l'ingénieur hydrographe un état des lieux sur le service des observations des marées. Cette demande se déclinant en 5 points :

- 1° Les lieux d'observations définitivement choisis ;
- 2° Les travaux à exécuter et les instruments à installer sur chacun de ces lieux ;
- 3° L'ordre dans lequel ces travaux doivent être entrepris ;
- 4° Les agents à employer sur chaque point ;
- 5° La répartition à faire du fond accordée pour la dépense du service dont il s'agit.

Le rapport rédigé par Chazallon à l'attention d'Halgan² fut envoyé au Ministre au mois d'août 1840 accompagné d'une lettre émanant de Beautemps-Beaupré³. Des extraits du

¹ URL : http://www.shom.fr/fre_page/fr_act_oceano/maree/maree14.htm (consulté le 5 octobre 2008).

² Chazallon R. Rapport à Halgan, le 5 août 1840. Archives Nationales, MAR/10/JJ/503.

³ Beautemps-Beaupré. Lettre à Duperré, le 8 août 1840. Archives Nationales, MAR/10/JJ/503.

document sont repris ci-après, les numéros correspondant à ceux des points énoncés précédemment :

1°- Les lieux d'observation définitivement choisis se réduisent, quant à présent, aux localités suivantes : Brest, St Servan & Cherbourg.

Je ne pourrai émettre d'opinion sur les autres localités qu'après les avoir vues & étudiées. Dans le système d'observations le plus largement conçu et abstraction faite de toute dépense & de toute difficulté d'exécution, je proposais l'établissement de 9 observatoires, savoir :

1 dans la Méditerranée et 8 dans l'Océan ; à Cordouan, aux environs de l'île d'aix, à Brest, à St Servan, à Cherbourg, au Havre, à Boulogne et aux environs de Dunkerque.

Dans le système le plus restreint, il faut 6 observatoires. L'un sera établi dans la Méditerranée et les 5 autres dans l'Océan, aux environs de l'île d'aix, à Brest, à St Servan, à Cherbourg et au Havre.

C'est par ce dernier système qu'il convient de débiter ; trois points sont déjà déterminés et 3 autres restent à étudier.

2°- Les travaux à exécuter actuellement sont de deux sortes ; d'abord, la construction d'un puits de marée à Brest et à St Servan (il en existe un à Cherbourg) et ensuite la construction d'un maréomètre ou mécanisme destiné à noter de lui-même les mouvements de la mer.

Voici, en gros de quoi se composera cette machine. Un flotteur d'environ 1 mètre de diamètre sera placé dans le puits où l'eau de la mer s'introduira par un petit canal ; ce flotteur éprouvera la même oscillation que l'Océan et, au moyen d'un stilet ou d'une plume dont il sera armé, il laissera, sur une feuille de papier, l'empreinte de ses diverses positions. Cette feuille de papier sera entraînée par le mouvement de rotation d'un tambour mis en jeu à l'aide d'une horloge soigneusement exécutée. La même feuille de papier portera en outre l'empreinte des variations barométriques, thermométriques, de la direction & de la force du vent. L'organisation de cet instrument est surtout la chose délicate et je vais m'en occuper d'une manière toute particulière ; après quoi, Général, j'aurai l'honneur de vous soumettre mes idées sur cet objet.

Au reste, la construction du puits de marée est une chose indispensable est indépendante du mécanisme en question.

3°- Les travaux de construction pourront être entrepris simultanément à Brest & à St Servan, dès que l'Ingénieur hydraulique chargé de sa construction aura dressé ses plans et désirs.

J'ai proposé de charger de ces travaux l'Ingénieur B^{on} Menu de Mesnil, actuellement attaché au port de Brest ; cet ingénieur est sous les ordres de Mr Trotté de la Roche.

4°- Un seul agent sera employé dans chaque localité ; leur service ne sera ni bien difficile, ni fort gênant. Ils seront chargés de surveiller le mécanisme, de le monter, de changer le papier tous les 3 ou 4 jours et de tenir un journal. Des appointements de 1.000 f à 1200 fr permettront certainement d'avoir des hommes consciencieux.

5°- Les dépenses primitives pour la construction des puits de marée varieront d'une localité à l'autre. Dans le rapport, en date du 3 mars 1840 [non trouvé] que j'ai eu l'honneur de vous adresser, j'avais évalué ces dépenses à 4 ou 5.000 fr. par localité ; mais à Brest, cette moyenne sera peut être dépassée à cause de la convenance de mettre cette construction en harmonie avec ce qui existe déjà dans ce port ; il en sera probablement de même à St Servan où les marées sont considérables et presque doubles des marées de Brest. Au reste, c'est à l'Ingénieur hydraulique chargé de ces constructions qu'il appartiendra de faire, avec connaissance de cause, un devis détaillé de ces dépenses.

Quand à la construction et à l'installation de chaque maréomètre, une somme de 3.000 fr. sera, sans doute, suffisante.

Ce rapport fait suite à un document du 3 mars 1840 qui, n'a pu être retrouvé. Chazallon, explique dans le point 1, que les ports de Brest, Saint-Servan et Cherbourg, où il a eu

l'occasion de se rendre, présentent toutes les qualités requises pour l'installation d'un observatoire du niveau marin. L'ingénieur hydrographe identifie 6 ou 9 sites, suivant les moyens financiers alloués à cette entreprise, pour y établir des stations de mesures. Le point 2 s'attarde à expliquer le fonctionnement du marégraphe et l'installation obligatoire de l'appareil dans un puits de tranquillisation (cf. 5.3.4.1). Le 3^{ème} point propose que les sites de Brest et St Servan soient les premiers à voir la construction des observatoires. Les deux dernières réponses s'attardent sur des questions d'ordre financier, une première depuis 1679 !

Pour mener à bien son projet, Chazallon expose à la suite de son rapport, les propositions qu'il souhaite voir accomplir :

Enfin voici Général [Halgan], les propositions que j'ai l'honneur de vous soumettre.

1° Donner à Mr le B^{on} Menu de Mesnil, Ingénieur hydraulique à Brest, sous les ordres de M. Trotté de la Roche, & à M. Chazallon, Ingénieur hydrographe, l'ordre de se rendre à Cherbourg, dans le courant de 7^{bre} [septembre], ou vers les premiers jours d'8bre [octobre], pour examiner les puits de marée de cette localité et se transporter de là à St Servan. Arrivé dans ce dernier port, lors des grandes marées de septembre ou d'octobre, ces ingénieurs étudieront la nature des roches, examineront les difficultés de construction & après quoi l'ingénieur Menu de Mesnil adressera au Ministre de la Marine [Duperré] ou à Mr le Directeur général du dépôt de la Marine [Halgan], ses plans et devis relatifs à la construction d'un puits de marée à St Servan.

Ce même ingénieur enverra également les plans et devis relatifs au port de Brest.

2° Donner l'ordre à Mr le chef de service de St Servan de tenir à la disposition de l'Ing^r Chazallon, 1° un ou deux mâtereaux divisée en centimètres et disposée en échelle de marée ; leur longueur totale ou bout à bout devra former un développement de 15 mètres, au moins. 2° deux grappins et des haubans pour fixer & maintenir verticalement ces échelles de marée.

3° Autoriser l'ing^r Chazallon à faire faire pendant un mois ou 6 semaines quelques observations de marée sur l'emplacement même du puits à construire.

Ces observations, analogues à celles qui ont été faites sur les côtes de France, par l'ordre de Monsieur Beautemps-Beaupré, nécessiteront une dépense de 5 fr. par jour.

Ces dépenses préliminaires pourraient être faites sur les fonds spécialement affectés aux observations de marée, car j'ai reconnu que les observations qui se font actuellement sont inutiles et j'ai déjà émis l'opinion de les voir cesser à St Servan, à L'Aberwrach, à Ouessant, à Douarnenez à Audierne & à l'île Tudy.

Les deux premiers points rassemblent les objectifs d'une mission afin d'étudier in situ le puits de marée à Cherbourg et de déterminer le meilleur site où installer un puits ne s'asséchant pas à Saint Servan. En effet, à cet endroit le marnage peut atteindre les 15 mètres lors des vives eaux d'équinoxe. La dernière proposition, tant qu'à elle, tend à confirmer le site choisi à Saint Servan. Pour ce faire, une partie des fonds affectés aux observations des marées votés par le parlement (cf. 5.3.2.3) sont affectés au paiement de la solde d'un observateur des marées durant plusieurs semaines à Saint Servan. Ces observations serviront à valider le site pressenti.

En 1841, dans le cadre d'une étude de la marée en Méditerranée¹, commanditée par le ministre de la marine sur ses conseils, l'ingénieur hydrographe se rendit à Toulon². Il y fit réaliser une campagne de mesures durant les mois d'août et septembre avec un maréomètre qu'il prit soin d'installer lui-même³. Comme il l'indique dans l'article paru pour l'occasion dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences* de 1842, le maréomètre

¹ Chazallon. Lettre au général ?, le 4 juin 1841. Archives SHOM, Géodésie-Géophysique.

² Anonyme. Lettre au ministre de la marine, Duperré, le 10 juin 1841. Archives SHOM, Géodésie-Géophysique.

³ Chazallon. Lettre au général ?, le 10 août 1841. Archives SHOM, Géodésie-Géophysique.

est "un simple tube rectangulaire composé de quatre planches de 2 mètres de haut sur 0^m,20 de large ; la partie inférieure plongeait dans la mer, l'eau s'y introduisait par un très-petit orifice et venait soulever un flotteur en liège placé dans l'intérieur du tube. Les mouvements de ce flotteur étaient indiquée par une tige faisant corps avec lui et dont la partie supérieure glissait le long d'une planche verticale divisée en centimètres. Tout cet appareil était solidement installé au lieu appelé la Pile, situé dans la darse de l'Est. Afin de s'assurer que la ligne de flottaison ne variait pas sur le corps du flotteur, on avait placé à côté du tube une échelle qui servait de point de repère lorsque la mer était très-calme". Deux ans de réflexion permirent à Chazallon d'inventer cette machine dont le principe se rapproche davantage du premier appareil imaginé par Sir Moray en 1666 (cf. 2.1) que du MCM (cf. 5.3.4.1). Loin d'être automatiques, les mesures obtenues à l'aide de cet appareil ne sont pas directement enregistrées par ce dernier, mais lues par un observateur. Pour limiter les lacunes de données, Chazallon explique que "*l'observateur des marées est en pension chez le gardien de la pile, de sorte qu'il n'interrompra pas ses observations pour aller prendre ses repas*"³. Néanmoins, ce maréomètre ne permet pas la mesure du niveau marin de manière automatique et continue.

Pourtant, quelques années plus tard, différents sites français se voient équipés de marégraphes grâce à une nouvelle intervention de Chazallon. L'ingénieur hydrographe rédige une lettre à sa hiérarchie, le 10 décembre 1843, pour qu'elle informe le nouveau ministre de la Marine, l'amiral de Mackau [1788-1855] du rapport qu'il avait rédigé en 1840. Cette lettre de 1843 est plus qu'une simple demande, c'est un appel du cœur par Chazallon. Ce dernier commence à montrer des signes de lassitude lorsqu'il termine d'exposer l'importance de l'étude des marées par ces propos : "*je viens donc [...] renouveler en les précisant davantage, si c'est possible, les propositions que j'ai déjà faites dans un rapport [...] le 3 mars 1840*". Cette lassitude est palpable, encore, lorsque Chazallon, responsable du Service des Marées déclare être dans l'ignorance formelle de l'état d'avancement de la construction des puits de marée dans les deux ports précédents mais qu'il a "*la certitude qu'aucun puits de marée n'a été construit*". Chazallon remet en avant également, l'argument de compétition avec les anglais (cf. 5.3.3.2.) en écrivant : "*nous nous trouvons actuellement devancées par le gouvernement anglais qui a déjà fait établir des puits de marée à Pembroke, à Plymouth, à Portsmouth et à Sheerness*". Chazallon poursuit son exposé sur les dimensions et emplacements des puits de marée : "*l'emplacement du puits de Brest peut être choisi soit près de la grille d'entrée de l'arsenal, soit près de la mâture ; mais pour le puits de Saint-Servan il n'existe qu'un seul emplacement convenable pour obtenir les basses mers ; cet emplacement est situé à la pointe Bécharde, à environ 280m dans l'E.S.E. de la balise la mercière placée à l'entrée de la Rance, ou, en d'autres termes, à 15 à 20 mètres vers le S.E. du débarcadère construit sur cette pointe*". Il achève cette partie en expliquant l'intérêt de la pérennité de ces constructions : "*L'on ne doit pas perdre de vue surtout qu'il est extrêmement important que ces travaux soient exécutés d'une manière solide et durable, de telle sorte que, dans cinq à six siècles, nos successeurs puissent s'assurer, par les repères tracés sur le parement des puits, s'il est survenu un changement quelconque dans le niveau d'équilibre des mers et puissent mesurer l'étendue de ce changement. Diverses causes pourraient produire cet effet [...] nos prédécesseurs ne nous ont malheureusement laissé aucun terme précis pour point de comparaison. Les Egyptiens seuls avaient gravé des points de repère dans leurs nilomètres ; mais les documents de ce peuple si remarquable sont perdus pour nous*". Ces extraits, écrits il y a 165 ans, sont toujours bel est bien d'actualité et s'inscrivent parfaitement dans les thématiques scientifiques actuelles, notamment pour l'étude de l'élévation du niveau de la mer. Tout comme Lalande (cf. 3.5.1.), Chazallon comprend qu'il est indispensable de pérenniser les observations acquises, mais en plus, l'hydrographe relie ce principe à celui de la conservation des sites ayant permis les mesures. C'est cette pérennité indispensable des

repères et de toutes les informations gravitant autour des observations du niveau de la mer (métadonnées) qui permet aujourd'hui d'exploiter au mieux les observations anciennes.

Le 24 décembre 1859, soit une année avant de partir en retraite, Chazallon, reçoit l'ordre de *"déposer aux archives du dépôt, avant le 30 décembre [...] toutes les feuilles de courbes de marées depuis l'établissement des marégraphes, avec l'indication du point de repère du zéro de chacune d'elle"*. Il en profita pour tirer un bilan des marégraphes fonctionnant ou ayant fonctionné sous sa direction¹. Le tableau 5.1 rassemble la date de mise en fonctionnement et le résumé des diverses interventions de Chazallon pour l'ensemble des sites ayant eu un MCM installé.

¹ Chazallon R. Lettre à l'Ingénieur en Chef, le 30 décembre 1859. Archives SHOM, Géodésie-Géophysique.

Ports	Période de fonctionnement	Renseignements divers (ordres pour Chazallon). Sauf cas contraire, les appareils étaient gérés par le service des marées ¹ dépendant du ministère de la marine ² .
Alger	04/1843- 1852	- Ordre de s'y rendre pour installer un marégraphe. Exécuté du 14/01 au 05/05 1843 ³ . - Appareil géré par les ingénieurs des travaux hydrauliques ¹ .
Toulon	29/08/1844 -	- Ordre reçu en 1841, afin de s'y rendre pour l'inspection du service d'observations des marées. 1841 ³ . - Ordre reçu le 14/06/1844, afin d'y installer un marégraphe ³ . - Appareil se trouvant près de l'atelier des gouvernails ² . - Ordre reçu le 25/08/1846, afin d'y vérifier l'appareil. Exécuté du 11/09 au 11/10/1846 ³ . - Ordre reçu le 18/07/1857, afin d'y vérifier l'appareil ³ .
Marseille	23/10/1849 - 05/05/1851	- Demande d'étudier le phénomène particulier des raz de marée ⁴ - Ordre reçu le 10/06/1847, afin d'y installer un marégraphe de petite taille. Exécuté du 25/08 au 02/11/1849 ³ . - Ordre reçu le 7/06/1851 afin d'y procéder au démontage de l'appareil ³ .
Sète	?	- <i>"Deux marégraphes ont été établis à Cette par les ingénieurs des Ponts-et-Chaussées"</i> ² .
Brest	04/01/1846 -	- Ordre reçu le 03/11/1845, afin d'y installer un marégraphe ³ . - Ordre reçu le 17/07/1846, afin d'y vérifier l'appareil ³ . - Ordre reçu le 26/08/1850, afin d'y vérifier l'appareil ³ . - Appareil se trouvant près de la mâture ² .
Saint-Servan	26/10/1850 -	- Ordre reçu le 14/03/1845, afin d'y étudier un projet de puits de marée. Ordre du 13.03/1845 ³ . - Ordre reçu le 26/08/1850, afin d'y installer un marégraphe ³ . - Appareil se trouvant près de la pointe Béchard ² .
Cherbourg	12/05/1847 -	- Ordre reçu le 14/03/1847, afin d'y installer un marégraphe ³ . - Ordre reçu le 26/08/1850, afin d'y vérifier l'appareil ³ . - Appareil se trouvant dans l'avant-port militaire ² .
Le Havre	17/09/1850 -	- Ordre reçu le 26/08/1850, afin d'y installer un marégraphe ³ . - Appareil se trouvant près de la tour François 1 ^{er} ² .
Rochefort	10/11/1858 -	- Ordre reçu le 16/06/1858, afin d'y installer un marégraphe ⁵ . - Appareil se trouvant à l'extrémité Est de l'Arsenal ² .
Fort Enet	04/07/1859 -	- Ordre reçu le 04/06/1859, afin d'y installer un marégraphe ⁶ . - Appareil se trouvant à l'embouchure de la Charente ² .
Quillebeuf	1857 -	- Appareil géré par les ingénieurs des Ponts et Chaussées ¹ . - Petit appareil prêté par la Marine ² .

Tab. 5.1. – Inventaire des marégraphes installés par Chazallon.

¹ Chazallon R. Lettre à l'Ingénieur en Chef, le 30 décembre 1859. Archives SHOM, Géodésie-Géophysique.

² Chazallon R. Rapport à Monsieur Hamelin, Ministre de la Marine, le 6 décembre 1859. Archives SHOM.

³ Anonyme. Fiche matricule de la Marine sur Chazallon, septembre 1859. Pochette individuelle n°474, SHD-Marine Vincennes.

⁴ Chazallon R. Lettre à l'Amiral ?, le 31 mai 1847. Archives SHOM, Géodésie-Géophysique.

⁵ Directeur du matériel. Note pour la direction du personnel, le 16 juin 1858. Pochette individuelle n°474, SHD-Marine Vincennes.

⁶ Directeur général du dépôt. Lettre au ministre de la marine, Hamelin, le 04 juin 1859. Pochette individuelle n°474, SHD-Marine Vincennes.

Finalement, entre le rapport rédigé par Chazallon en août 1840 et la date effective de fonctionnement d'un marégraphe dans l'un des trois ports donnés comme prioritaire, il aura fallu attendre 6 ans. Étrangement, le premier port à avoir été équipé d'un marégraphe français ne se trouve pas en métropole mais à Alger, alors nouvellement acquise par la France (1830). En 1841, le port d'Alger est en pleine construction grâce à l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées Poirel (1841). C'est peut-être grâce à cela qu'en 1843, le premier MCM de France fut inauguré à ce port. Malheureusement pour lui, Chazallon n'aura pas la primeur des observations. En effet, Aimé publie en 1844 un mémoire s'appuyant sur les mesures obtenues avec le marégraphe. Chazallon lui répond (1844b) en débutant sa lettre par une déclaration de paternité de l'installation et donc implicitement des observations : " [...] à Alger [...] il m'a été possible d'y installer un maréomètre qui fonctionne depuis le mois de mai 1843. Je n'ai pas encore reçu copie des observations, mais je vois avec plaisir [...] que M. Aimé, plus heureux que moi, a pu profiter des données recueillies par le maréomètre". Attaqué dans le texte de Aimé, l'ingénieur hydrographe réplique en démontant point par point les arguments de son concurrent. Cette passe d'arme illustre le caractère "fort" de Chazallon.

Le port de Brest accueille l'installation du premier marégraphe sur la côte Atlantique française à la fin de l'année 1845 pour voir son fonctionnement vraiment démarrer au mois de janvier 1846. C'est le début de la plus longue série de mesure en continu en France et l'une des plus importantes dans le monde.

Le site de Saint-Servan, prioritaire dans les vœux de Chazallon ne commencera à fonctionner en 1850. Pourtant dès 1848, la revue *Le Magasin Pittoresque* dirigé par Charton fait référence à cet observatoire, dépassant largement tout ce qui avait pu être fait jusqu'à présent : le bâtiment est l'écrin nommé maréomètre dans la revue devant recevoir le maréographe. D'après le périodique, "*le maréomètre est une tour octogonale de 5 mètres de largeur à sa base, et de 3^m,50 à son couronnement, ce qui lui donne une forme légèrement pyramidale [...] Le couronnement est à une hauteur telle qu'il puisse dominer les plus hautes marées ; celles de 1845, qui fut de plus de 13 mètres [...] Une pont suspendu de 19 mètres de longueur, établit la communication entre la terre et la rive opposée de la vieille cale de Saint-Père*". A la lumière des chiffres, il est simple de comprendre pourquoi il a fallu attendre 4 années de plus par rapport à Brest pour voir cet observatoire fonctionner.

D'autres observatoires comme Toulon, Marseille et Sète complètent la couverture le long de la Mer Méditerranée tandis que les sites de Rochefort, Fort Enet, Cherbourg, Le Havre, Quillebeuf améliorent les connaissances sur les côtes "océaniques". Déjà, les Ponts et Chaussées s'intéressent aux mesures du niveau de la mer à Quillebeuf et Sète grâce à l'utilisation de marégraphes.

Au début des années 1860, après bien des soucis, le premier réseau marégraphique en France fonctionne. Pas moins de 7 observatoires mesures simultanément, au quatre coins du pays, le niveau marin : 1 se trouve en méditerranée, 3 le long des côtes atlantique et 3 baignent au bord de la Manche. Ce résultat est surtout l'accomplissement d'un seul homme : Chazallon. Comment cette structure a-t-elle évolué après le départ de celui qui l'avait initié ?

5.3.3.2. Son évolution.

Gaussin, successeur de Chazallon, prend la direction du service des marées jusqu'en 1885. Aucun document, nul article portant sa signature n'a été retrouvé durant les 24 années où il dirigea cette structure.

Les observateurs des sites de Cherbourg, du Havre, de Saint Servan, de Brest, de Rochefort et du Fort Enet répondirent au questionnaire ainsi que, plus surprenant, un ingénieur originaire de La Rochelle présente le futur observatoire pour cette ville. Profitant entre 1855 et 1862, de la construction à proximité du vieux port de La Rochelle, d'un bassin à flot extérieur¹ la construction d'un puits de tranquillisation est ajouté à l'ensemble. Le seul observatoire de Méditerranée géré par le Service des Marées, Toulon ne répond pas à la demande et pour cause : depuis 1861, il ne fonctionne plus. Cet arrêt n'est pas une surprise, déjà en 1859, Chazallon proposait au Ministre de la Marine de *"supprimer le service de Toulon en laissant l'instrument à la disposition des Ponts et Chaussées"*².

Trois documents émanant de deux services distincts : le service du Nivellement Général de la France et le SHM présentent les sites équipés d'un marégraphes respectivement en 1882, 1905 et 1934. Ils permettent de suivre l'évolution du réseau marégraphique français résumé dans le tableau 5.2 :

PORTS.	Date d'établissement (1882) ³	En fonctionnement (1905) ⁴	Période de fonctionnement (1934) ⁵
Le Havre	1850	oui	1850-1920
Cherbourg	1846	oui	1850-1920
Saint-Malo (Saint-Servan)	1849	oui	1850-1917
Brest	1845	oui	1846-1931
Saint-Nazaire	1861	oui	1863-1920
Rochefort		oui	1860-1918
Fort d'Enet			1859-1873
Fort Boyard	1873	oui	1874-1909
La Rochelle			1863-1874
Saint-Jean-de-Luz (Socoa)	1875	oui	1875-1920
Toulon			1844-1861

Tab. 5.2. – Inventaire des marégraphes en fonctionnement après l'ère Chazallon géré par le Service Hydrographique.

¹ URL :

<http://www.culture.gouv.fr/culture/inventai/itiinv/larochelle/LaRochelle/Dossiers/HTML/IA17000233/Notice.html> (consultée le 5 octobre 2008).

² Chazallon R. Rapport à Monsieur Hamelin, Ministre de la Marine, le 6 décembre 1859. Archives SHOM.

³ Lallemand C., E. Prévot (1927). Le nivellement général de la France de 1878 à 1927. Exposé préliminaire, procès-verbaux, documents administratifs, comptes rendus des travaux du service. Paris, imprimerie nationale.

⁴ Rollet de l'Isle (1905). Observation, étude et prédiction des marées. Publication SHOM, n°13-155, 287p.

⁵ Courtier A. (1934). Données numériques concernant les marées des côtes de France. Publication SHOM, n°14-1016, 71p.

Entre les différentes sources, quelques incohérences sur les dates apparaissent pour les observatoires de Cherbourg, Saint Servan, Brest, Saint-Nazaire et Fort Boyard. Les échanges d'informations, d'un service à l'autre ne devaient probablement pas être très exacts.

En 1863, deux nouveaux observatoires complètent le réseau existant. Le premier à Saint-Nazaire, le second à La Rochelle comme la note d'inspection des marégraphes de 1861 le laisser supposer. En 1873, à cause de l'envasement fréquent du puits de tranquillisation, Bouquet de la Grye [1827-1909], propose le déplacement du marégraphe installé au fort Enet vers le fort Boyard¹. En 1874, c'est au tour du marégraphe installé à Rochelle d'être envoyé à Saint-Jean-De-Luz². Cette fois, c'est à cause des perturbations causées par l'ouverture des portes du bassin à flot sur les mesures que le déménagement de l'appareil est exécuté.

Le cas du site de Fort Boyard est atypique parmi l'ensemble des autres observatoires : Depuis 1882, aucun individu ne souhaite occuper le poste d'observateur des marées. Plusieurs raisons sont avancées comme : l'impossibilité de quitter le fort durant plusieurs jours et donc de devoir y habiter continuellement ; la difficulté de vivre dans des conditions difficiles sur le fort ; la principale : "*la difficulté de se procurer des vivres [...] effraie les observateurs*"³. Pour résoudre le problème, différentes commissions conclurent au transfert du marégraphe vers l'île d'Aix. Finalement, pour éviter des dépenses liées au déménagement de l'appareil, il fut décidé de motiver les candidats par un salaire attractif. Alors que partout ailleurs, le salaire d'un observateur des marées s'établissait à 800 francs, pour celui occupant le poste au fort Boyard, le montant s'élevait à 1400 francs. Pourtant, les difficultés de recrutement perdurèrent et lorsqu'en 1909, l'observateur Bourdin, donna sa démission, il ne fut pas remplacé et les mesures cessèrent.

Entre 1917 et 1920 ce fut le tour des observatoires de Saint-Servan, Rochefort, du Havre, Saint-Nazaire, Saint-Jean-De-Luz de voir le désengagement du SHM. Rollet de l'Isle [1859-1933?], responsable du service des marées entre 1902 et 1920 en est peut-être à l'origine. Le cas du marégraphe de Cherbourg est un peu particulier : à partir de 1885 il est indépendant du SHM. Il se trouve géré depuis par la direction des Travaux Hydrauliques⁴. Les tables de concordance, tirées des observations semblaient suffisamment longues, précises et immuables pour permettre le calcul des prédictions dans l'*Annuaire des marées* à l'aide de la méthode de Laplace-Chazallon (communication personnelle B. Simon). Les mesures devenaient donc inutiles.

Ce désengagement de la Marine, à mesurer le niveau de la mer n'a pas signifié pour autant la fin des observations. Ainsi, d'après Courtier (1934) pour le Havre, Cherbourg et Saint-Nazaire, les marégraphes passèrent sous l'autorité des Ponts et Chaussées locaux qui poursuivirent les mesures. Cette continuation fut certainement commandée par l'intérêt des capitaineries à avoir en temps réel, les hauteurs d'eau aux ports. Le Service Hydrographique obtint après 1920, quelques mesures des sites de Cherbourg et Saint-Nazaire (annexe A), mais rien en provenance du port du Havre.

¹ Lefèvre (1880). Note sur les variations de la marée à Rochefort, à Enet et au Fort Boyard. SHD-Marine Rochefort, cote 2D⁴_{5y}.

² Anonyme (1874). Note sur le journal bi-mensuel des marées. Archives SHOM.

³ Dubruquois [1823-1985], directeur du dépôt des Cartes et Plans de la Marine. Lettre au Ministre de la Marine, Brun [1821-1897], le 07/03/1883. SHD-Marine Vincennes, cote DD²2053.

⁴ Hatt. Proposition de régler les marégraphes sur le temps moyen à l'Ingénieur en chef du SHM, le 4 décembre 1893. Archives SHOM.

5.3.3.3. Les autres réseaux de mesures du niveau de la mer.

Les marégraphes dépendant du ministère de la Marine n'ont pas été les seuls à mesurer le niveau marin en France. Dès la fin du 19^{ème} siècle, deux services dépendant du ministère des Travaux publics, pour les besoins de leurs missions, observèrent également les hauteurs d'eau. Il s'agit des services des Ponts et Chaussées et de Nivellement Général de France.

Les missions des Ponts et Chaussées : la gestion des voies navigables ; le contrôle des crues ; les installations portuaires ; les constructions d'ouvrages côtiers ; l'entretien d'ouvrages hydrauliques, rendaient les mesures du niveau de la mer indispensables. Tout comme le paragraphe précédent, le tableau 5.3 rassemble l'ensemble des appareils gérés par ce service :

PORTS.	Date de l'établissement (1882) ¹	Période de fonctionnement (1934) ²	Autorité dont le marégraphe dépend (ou a dépendu).
Dunkerque	1859	1865-1874	P. C. Dunkerque.
		1897-1899	<i>Idem.</i>
Calais		1891-1899	P. C. Calais.
Boulogne	1876		
Le Havre		1920-1932	P. C. Le Havre.
Heaux de Brehat		1889-1896	P. C. Saint-Brieuc.
Saint-Nazaire		1920-1931	P. C. Saint-Nazaire.
Cordouan (et Graves)	1877	1905-1931	P. C. Bordeaux.
Arcachon	1877		
Le Boucau		1899-1931	P. C. Bayonne.
Sète	1857		
Nice	1882		

Tab. 5.3. – Inventaire des marégraphes gérés par le service des Ponts et Chaussées jusqu'en 1934.

Heaux de Brehat et Cordouan sont deux exceptions sur le tableau 5.3 : les mesures y ont lieu au bord de phares. Le service des phares et balises, dépendant des Ponts et Chaussées fut mis à contribution pour l'occasion. Pour l'ensemble des ports, de grands remaniements (agrandissements, approfondissements, aménagements) ont cours durant la seconde moitié du 19^{ème} siècle. Les aménagements portuaires, avec la construction d'ouvrages hydrauliques, obligeaient avant de les effectuer à connaître dans le détail les mouvements de la mer. Une fois les aménagements terminés, les hauteurs d'eau furent poursuivis pour les besoins des capitaineries. Le Havre, Saint-Nazaire, Cordouan (Pointe de Grave) sont tous les 3 situés dans des estuaires de fleuves. Avant de pouvoir contrôler les crues, il fallait en connaître l'importance en les mesurant. La comparaison entre les tableaux 5.2. et 5.3. montre qu'en 1920, lorsque le SHM se désengagea des observations en métropole, les mesures se

¹ Lallemand C., E. Prévot (1927). Le nivellement général de la France de 1878 à 1927. Exposé préliminaire, procès-verbaux, documents administratifs, comptes rendus des travaux du service. Paris, imprimerie nationale.

² Courtier A. (1934). Données numériques concernant les marées des côtes de France. Publication SHOM, n°14-1016, 71p.

poursuivirent au Havre et à Saint-Nazaire. Était-ce avec les mêmes matériels, aux mêmes endroits ? Pour autant, à la même époque, des observatoires furent installés le long des côtes des anciennes colonies françaises.

En plus des développements portuaires, le pays connaît un formidable essor dans l'aménagement du territoire avec la construction de ponts, de canaux, de routes, du chemin de fer. Durant les différentes étapes des travaux, les mesures des hauteurs du sol deviennent indispensables. Bourdaloüe [1798-1868] en 1857 est chargé de mettre en place le Nivellement Général de la France. Les altitudes mesurées, sont rapportées à des plans de comparaison divers posant des problèmes de cohérence entre les départements. En 1859, le réseau est suffisamment avancé pour que Bourdaloüe étudie les mesures relevées en les comparant aux niveaux marins de divers ports. Les résultats révélant des écarts importants, ne sont pas satisfaisants. Son successeur, Lallemand [1857-1938] poursuit ses travaux au sein du Service de Nivellement Général de France (NGF), fondé en 1884¹.

Lallemand (1888a) expose pourquoi le NGF observe les hauteurs d'eau et étudie les niveaux de la mer : *"Il y aurait intérêt à déterminer le niveau moyen de la mer dans le plus grand nombre possible de points le long des côtes, et à rattacher ensuite les résultats au réseau général des nivellements continentaux, de manière à constituer une sorte de nivellement littoral des mers. [...] la connaissance du niveau moyen le long des côtes permettrait de fixer la surface de niveau de comparaison, qui doit être, à la fois, l'horizon fondamental des nivellements, la base de toutes les opérations géodésiques"*. Pour les obtenir, Lallemand explique que les lectures à l'échelle de marée sont incertaines et que le dépouillement des marégrammes implique des opérations longues et délicates. Il propose *"pour pouvoir multiplier les postes d'observations [...] de posséder un instrument simple et peu coûteux, qui facilitât les calculs en éliminant les indications inutiles"*. Cet appareil, c'est le médimarémètre (cf. 1.4.2.3). En 1935, Vignal fait un inventaire des médimarémètres fonctionnant le long des côtes méditerranéennes : 11 se trouvent en France dont 3 en Corse, 7 sont installées sur les côtes Algérienne, Tunisienne et Marocaine et 2 le long du littoral Tunisien. L'étude de Descosy [?-?], chef du Service du Nivellement à l'IGN en 1957, présente l'ensemble des médimarémètres en fonctionnement le long des côtes françaises². Le tableau 5.4. les énumèrent :

¹ URL: http://www.ign.fr/telechargement/education/fiches/relief/Historique_nivellement.pdf (consulté le 5 octobre 2008).

² Descosy G. (1957). Etude des variations du niveau moyen de la mer pour l'ensemble des médimarémètres. Association Internationale de Géodésie, section d'Océanographie.

	Médimarémètres	Période de fonctionnement
Façade Atlantique	Le Conquet	[1930-1939] – 1956
	Les Sables d'Olonne	[1890-1899] – 1956
	La Pallice (La Rochelle)	[1890-1899] – 1956
	Biarritz	[1890-1899] – [1930-1939]
	Saint Jean de Luz	[1890-1899] – 1956
Côte Méditerranéenne	Marseille A	[1890-1899] – 1956
	Marseille B	[1890-1899] – 1956
	Port-Vendres	[1890-1899] – 1956
	Sète	[1890-1899] – 1956
	Port-de-Bouc	[1890-1899] – 1956
	Martigues	[1890-1899] – 1956
	La Ciotat	[1890-1899] – 1956
	Villefranche	[1910-1919] – 1956
	Ajaccio	[1910-1919] – 1956
	Bastia	[1910-1919] – 1956
	Bonifacio	[1910-1919] – 1956

Tab. 5.4. – Inventaire des médimarémètres installés en France en 1957 (les périodes entre crochets ne sont pas plus précises dans le texte de Descossy).

Les médimarémètres, dont les plus anciens sont installés depuis 1890, permettent d'avoir en continu, 65 années de mesures du niveau moyen de la mer. Malheureusement, Descossy écrit que *"depuis 1955, le Service du Nivellement est chargé de centraliser les résultats des marégraphes dont certains sont destinées à remplacer les médimarémètres actuels"* : en effet, les résultats obtenus avec les médimarémètres sont inexploitable (1.4.2.3.).

Afin de déterminer l'origine d'altitude du système d'altitude du NGF, un observatoire en maçonnerie fut édifié à Marseille, dans l'Anse Calvo. A l'intérieur, un marégraphe totalisateur enregistre à la fois la hauteur d'eau instantanée mais aussi le niveau moyen de la mer sur la période de temps souhaitée. Le fonctionnement de l'appareil est décrit par Wöppelmann (1997). Le niveau moyen de la mer, mesuré entre le 1/2/1885 et le 1/1/1897 permet de fixer le zéro Lallemand, repère fondamental à toutes les altitudes en France. Malheureusement, aucun autre site n'a connu l'installation d'un observatoire comme celui de Marseille. Comme Lallemand (1888a) l'explique, *"l'appareil construit par Reitz est très coûteux par lui-même et par l'installation qu'il exige"*. Pour autant, 123 ans après son installation, le marégraphe fonctionne encore, sans avoir bougé de son écran. C'est un cas unique en France.

Avec l'évolution des structures, les ports autonomes et les Directions Départementales de l'Équipement (DDE) notamment, conservent dans leurs archives, lorsqu'elles n'ont pas été déposée aux Archives Départementales ou pire détruit, la trace des nombreuses observations passées du niveau de la mer réalisées par les services du ministère des Travaux Publics. Par exemple, plusieurs années d'observations de hauteurs de PM et BM, réalisées par les Ponts et Chaussées aux ports de La Rochelle et La Pallice ont été trouvées dans les archives départementales de Charente-Maritime (annexe A). Ce patrimoine, méconnu, le plus souvent inexploité, appelle, dans le cadre des problématiques actuelles à être au plus vite inventorié, expertisé, numérisé, contrôlé et étudié.

5.3.4. Observatoires marégraphiques.

Plusieurs éléments sont indispensables dans la mise en place d'un observatoire marégraphique. L'appareil de mesures est inutile sans puits de tranquillisation, sans abri pour le protéger, sans échelle de marée ni moyen d'obtenir précisément l'heure pour régler et vérifier la bonne marche du marégraphe ; Lorsque tous ces éléments sont réunis, il faut un protocole rigoureux pour guider l'observateur des marées dans sa tâche. Sans ces bases, les mesures sont difficilement exploitables. Tout d'abord, voici le détail de fonctionnement d'un marégraphe à flotteur.

5.3.4.1. Automatisation des observations grâce à l'invention du marégraphe.

Le Grand Larousse Universel (1992) définit le marégraphe comme l' "appareil enregistrant automatiquement les variations du niveau de la mer en un point donné, pour permettre de mesurer son niveau moyen" tandis que le Larousse du 20^e siècle (1931) limite sa définition à l' "instrument enregistrant automatiquement les mouvements du flux et de reflux de la mer". Quant au *Dictionnaire Universel des Sciences, des Lettres et des Arts* édités par Hachette (1872), le maréographe ou marégraphe est décrit comme "un instrument qui permet d'observer journallement et avec précision toutes les variations des marées. Il consiste essentiellement en une bande de papier sans fin qui se déroule par un mouvement d'horlogerie et sur laquelle le flot et le jusant, à l'aide d'un flotteur, tracent une courbe qui représente l'amplitude de la marée". Durant plus d'un siècle, la signification du nom marégraphe évolue, en fonction des besoins d'utilisation et de l'évolution technologique de l'appareil. La plus ancienne définition est la plus proche de l'appareil pensé par Chazallon.

Le Larousse universel de 1928, explique à l'aide d'un schéma, repris dans la figure 5.2. comment s'agence et fonctionne ensemble, les éléments d'un observatoire automatique du niveau de la mer depuis le puits, le flotteur et le marégraphe.

Légende de la figure :

M, puits communiquant avec la mer de façon que l'eau y reste calme ; F, flotteur dont le mouvement vertical se transmet à l'aide du fil B, enroulé sur la poulie fixe A ; D, roue clavetée sur la poulie et autour de laquelle s'enroule, en sens contraire de B sur A, le fil D passant sur des poulies de renvoi R, R, R et à l'extrémité duquel est attaché un contrepoids P ; S, style muni d'une plume qui s'appuie sur la surface du cylindre enregistreur C.

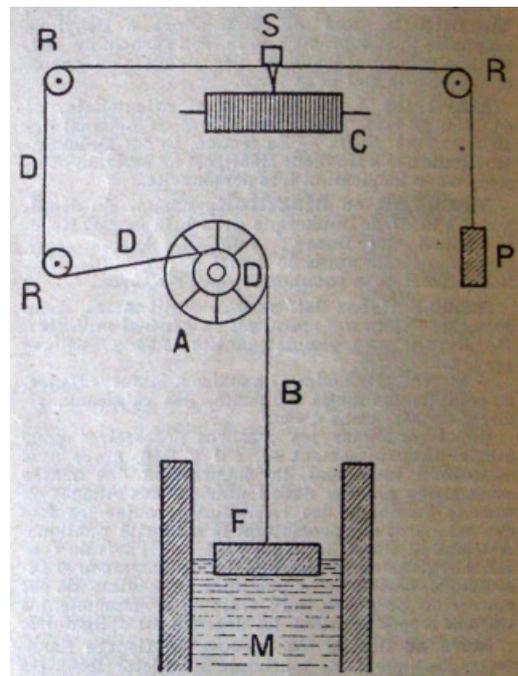


Fig. 5.2. – Schéma de fonctionnement du marégraphe (Larousse, 1928).

Dans l'*Annuaire des marées* (1844), Chazallon présente la personne qui a construit le marégraphe d'après ses plans : il s'agit de "Wagner neveu" [1790-1855]. Cet horloger reçut en 1844, une médaille d'or décerné par le jury central sur les produits de l'industrie française, dans la catégorie horlogerie de haute précision, récompensant "*les connaissances théoriques dont il a fait preuve dans la composition de tous ses mécanismes, et par le talent de construction qu'il a développé dans leur parfaite exécution*"¹. Il y est fait état que "*l'esprit inventif de cet habile artiste [Wagner neveu] ne s'est pas exercé seulement sur les machines à mesurer le temps, on le retrouve dans la composition d'un appareil nouveau, destiné à enregistrer simultanément et sans le concours d'un observations, les variations dans les hauteurs des marées et les hauteurs barométriques en rapport avec elles*". Chazallon a choisi, pour la réalisation du marégraphe, l'un des meilleurs horlogers du moment.

Dans son rapport au nom du Comité des arts mécaniques sur le marégraphe, Le Chatellier expose le principe de fonctionnement de l'appareil qui permit à Chazallon d'obtenir la médaille d'argent de la Société d'encouragement en 1855 et dont voici des extraits² :

"L'appareil soumis à la Société d'encouragement a été appliqué par M. Chazallon, ingénieur hydrographe, à l'étude des phénomènes des marées. [...] le comité des arts mécaniques doit rendre compte à la Société de l'heureuse application faite par ce savant ingénieur des moyens mécaniques destinés à enregistrer par le tracé des diagrammes les observations des phénomènes naturels à la nature des marées [...] Il y a longtemps déjà qu'on a songé à employé des moyens mécaniques pour les observations des marées. [...] Vers 1833, un ingénieur anglais construisait un système analogue ; mais au moyen d'un petit cylindre mis en mouvement par un mécanisme d'horlogerie, on avait sur la surface du cylindre la courbe des marées tracée par un crayon et réduite à un vingtième. M. Chazallon a conçu et M. Wagner, sur les indications de M. Chazallon, a réalisé sur un principe analogue un mécanisme très-complet, qui permet d'enregistrer avec une netteté très-remarquable tous les détails du mouvement de la mer. Cet appareil fonctionne depuis plusieurs années dans nos principaux ports. L'appareil se compose : 1° d'un cylindre horizontal en métal recouvert en drap et sur lequel on enroule un feuille de papier bien tendue ; 2° d'un mécanisme d'horlogerie qui fait tourner le cylindre ; 3° d'une forte règle correspondant à la règle supérieure et sur laquelle roule un chariot ; 4° du chariot indiqué ci-dessus qui porte le style traceur (ce style est une pointe sèche rigide dans le sens horizontal, qui presse sur une bande de papier à décalquer) 5° d'un flotteur placé dans un puits de marée ; 6° de deux poulies dont l'une reçoit le fil auquel est suspendu le flotteur et dont l'autre, réduite dans le rapport de 10 à 1, supporte un fil qui fait courir le chariot sur son support. On obtient ainsi des courbes dont les abscisses sont proportionnelles au temps, et les ordonnées proportionnelles à la hauteur de la marée. [...]"

Des plans du marégraphe de Chazallon sont conservés aux archives du SHOM. L'ensemble des pièces utilisées pour la confection du marégraphe y est reproduit à des formats plus ou moins réduits de sorte qu'il serait possible de produire à nouveau des marégraphes de ce type. Accompagnant ces schémas, les figures 5.3. illustrent le montage final de l'appareil :

¹ Anonyme. Rapport du jury central sur les produits de l'Industrie française en 1844. Imprimerie de Fain et Thunot, Paris, 978p.

² Migne (1860). Dictionnaire des inventions et découvertes anciennes et modernes. Imprimerie Migne, Paris, 1419p.

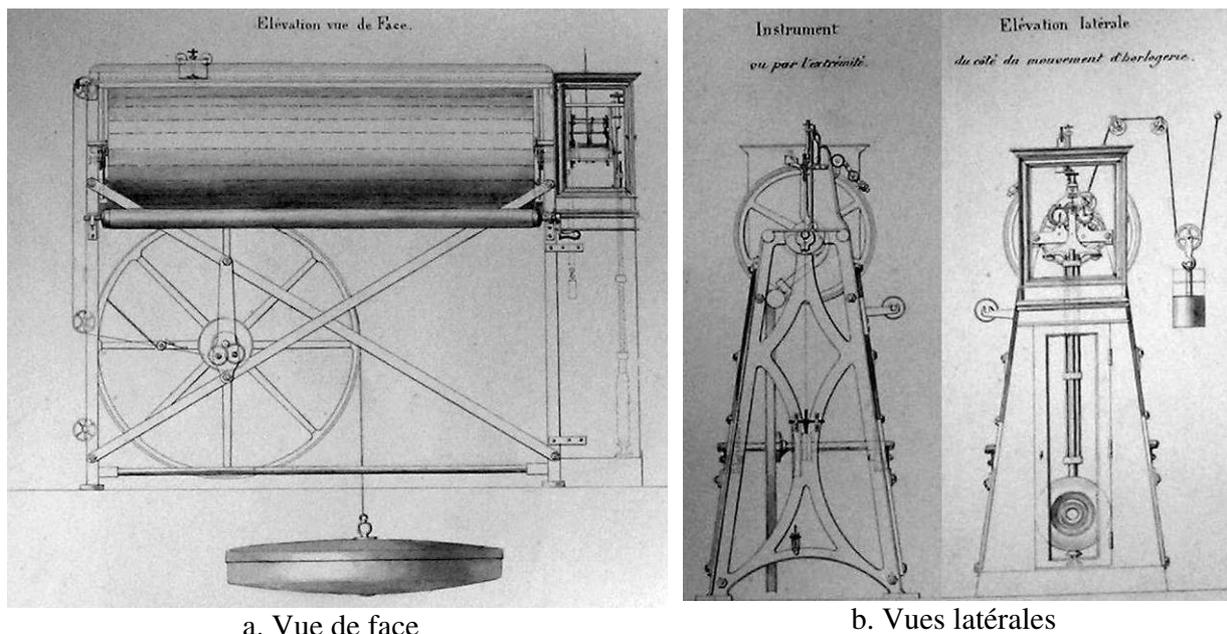


Fig. 5.3. – Gravures du marégraphe de Chazallon (Archive SHOM, portefeuille 12-7.47).

Que le marégraphe soit le meilleur et le plus précis, sans puits de tranquillisation, l'appareil ne peut fonctionner que de manière très approximative. Chazallon qui l'a bien compris, l'explique dans l'*Annuaire des marées* de 1844 :

Les ingénieurs des ponts et chaussées attachés aux grands travaux hydrauliques de nos ports ont été les premiers à reconnaître l'utilité d'un annuaire des marées ; mais je regrette qu'ils aient rarement songé à construire un puits pour observer les mouvements oscillatoires de l'Océan. Cherbourg et Alger sont encore les seuls ports qui possèdent un puits de ce genre. Le noyau vide a un mètre de diamètre ; les marches en hélice qui servent à y descendre ont environ un demi-mètre de longueur et le fonds du puits est au-dessous du niveau des plus basses mers. Ces dimensions en largeur pourraient être gênantes dans quelques localités ; mais il y aurait peu d'inconvénients à supprimer l'escalier en hélice et à le remplacer par une simple échelle dans un refoulement du parement du puits. [...] En Angleterre il existe plusieurs puits de ce genre. [...] Concevons un puits mis en communication avec la mer ; plaçons-y un flotteur armé d'une longue tige verticale faisant corps avec lui et portant à son extrémité supérieure un crayon horizontal. Alors, à mesure que la mer s'élèvera ou s'abaissera à l'extérieur, elle s'élèvera ou s'abaissera également dans l'intérieur du puits, en vertu des lois de l'hydrostatique, et le flotteur, ainsi que le crayon suivront le même mouvement. [...] Comment pourrait-il en être autrement lorsqu'on ne sait pas résoudre le problème hydrodynamique le plus simple, celui de l'écoulement par un grand ou petit orifice ?

Chazallon comprend de suite, la difficulté de concevoir un puits de tranquillisation à cause des nombreuses variables pouvant influencer. Simon (2007) le confirme et l'explique : la réponse dépend non seulement des tailles et formes du conduit, de l'orifice et du puits ; des conditions hydrodynamiques différentes entre l'intérieur et l'extérieur affectant la viscosité, les vagues, les différences de densité...etc ; les conditions environnementales jouent aussi un rôle dans l'envasement et les concrétions au niveau des différentes parties du puits.

5.3.4.2. Pérennité des échelles de marée, la référence verticale.

Chazallon partage ses réflexions sur les échelles de marée en 1854b. C'est le seul document qui détaille de la sorte, l'intérêt de pérenniser des échelles pour l'observation du niveau marin que l'étude les matériaux choisis pour leur confection.

Jusqu'à présent, *"les échelles de marée [...] n'étaient établies que pour les besoins du moment et non dans un but d'avenir, sont souvent enlevée soit par suite de détérioration, soit pour être repeintes ou remplacées ailleurs, et leur nouveau zéro, ou point de départ, se trouve rarement à la même hauteur que l'ancien"*. Sans uniformité dans les repères verticaux utilisés lors de différentes campagnes d'observations, l'étude du niveau moyen par exemple est tout simplement impossible.

Pour répondre à ce problème, Chazallon ne souhaite pas poursuivre l'utilisation d'échelles de marée en bois, sujettes au pourrissement et à l'effacement des unités de graduation. Il entreprend des recherches sur la pérennité des échelles de marée fabriquées avec des matériaux différents. Il fait construire suivant un même modèle et un même étalon deux échelles de marée. La première est fabriquée à la Manufacture de Sèvres. Elle est en porcelaine avec des divisions en oxyde vert de chrome. Quatre ans plus tard, elle est aussi neuve qu'au premier jour d'installation. Ce n'est pas le cas de la seconde. Taillé dans de la lave du Vésuve, les divisions deviennent illisibles en moins de deux années à cause d'une multitude de coquilles microscopiques incrustées dessus. C'est le bon sens qui a guidé Chazallon dans le choix d'installer des échelles en porcelaine. Simon (2007) confirme en indiquant que le matériau utilisé pour construire une échelle des marées *"doit résister à la corrosion et être facile à nettoyer afin d'assurer une lecture correcte de la graduation"*. Aujourd'hui, les échelles de marée du SHOM sont en plastique, matériau in-corrodable et in-pourrissable.

Nulle part, Chazallon ne parle du fruit. Il s'agit de l'inclinaison de l'échelle de marée par rapport à la verticale que cette dernière présente une fois installée contre un quai ou une jetée. Rollet de l'Isle (1905) explique qu'il faut corriger du fruit les graduations de l'échelle de façon à ce que chaque lecture sur l'échelle donne la hauteur verticale.

Chazallon, pourtant sensibilisé à la pérennité des observatoires, n'a jamais fait état de relation entre les graduations de l'échelle de marée avec des repères de nivellement. En effet, même si les échelles de marée deviennent durables dans le temps, un événement extraordinaire ôtant l'échelle n'est pas impossible. Dès lors, comment installer précisément une échelle de marée se superposant parfaitement à l'ancienne pour l'observatoire ?

5.3.4.3. Les observateurs, garants de mesures précises.

Même si le marégraphe mesure de manière automatique le niveau de la mer, la présence humaine reste indispensable pour surveiller et contrôler la bonne marche de l'appareil afin d'obtenir les données les plus fiables. Chazallon dès 1850 fait imprimer les instructions pour les observateurs du marégraphe entièrement repris ci-après :

Instructions pour les observateurs des marégraphes

1° Chaque observateur des marées doit avoir à sa disposition, dans le bureau du marégraphe :

Un registre, dit journal des marées, pouvant comprendre deux années d'observations ;

Un journal bi-mensuel sur lequel doivent être reportées la plupart des observations consignées dans le journal des marées ;

Un tableau sur lequel on porte les hauteurs de la mer à chaque quart d'heure d'après les courbes fournies par les marégraphes ;

Des feuilles quadrillées servant à l'observateur pour tracer en courbes la pression barométrique transformée en pression équivalente d'eau de mer ;

Enfin un tableau contenant deux tables destinées à corriger de la variation de pression barométrique les hauteurs de la pleine mer et de la basse mer.

2° Le journal bi-mensuel des marées est envoyé au bout de deux ans au dépôt de la marine.

3° Le journal bi-mensuel, le tableau des hauteurs de la mer à chaque quart d'heure, les courbes fournies par les marégraphes, celles qui donnent la pression barométrique, sont adressés tous les deux mois, par la voie hiérarchique, à l'ingénieur chargé du service des marées, et revêtues de la signature du Directeur de l'Observatoire du marégraphe. Les courbes doivent être roulées et non pliées.

4° L'observateur des marées veille à ce que le marégraphe fonctionne convenablement et soit toujours réglé en temps vrai, à trente ou trente-cinq seconde près.

Une montre à secondes indépendantes lui sert pour cet objet. Il la porte, chaque deux jours, chez le Directeur de l'Observatoire (ou chez le Professeur d'Hydrographie) ; celui-ci la règle matériellement en temps vrai et inscrit dans le journal des marées, sur la page Remarques diverses, de combien elle avançait ou retardait sur ce temps.

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

6° Pour régler le marégraphe, l'observateur ne touche jamais au balancier qui bat la seconde ; il se contente de dégager la fourchette. Si le marégraphe avançait de trente quatre secondes, par exemple, il dégagerait la fourchette et la maintiendrait immobile jusqu'à ce que le balancier eût exécuté trente-quatre oscillations et au même instant il restituerait à ces deux organes leur solidarité.

Pour la facilité du réglage il vaut mieux que le marégraphe ait une légère tendance à l'avance ; il suffit pour cela de toucher à la vis de rappel qui surmonte le balancier.

Si l'observateur remarque que sa montre, réglée par le Directeur de l'Observatoire, fait éprouver un saut brusque (deux ou trois minutes) à l'heure du marégraphe dont la marche est habituellement régulière, il s'abstiendra de faire la correction avant d'avoir prévenu de ce fait M. le Directeur, qui a pu se tromper de signe en appliquant l'équation du temps.

7° L'observateur s'assure chaque jour de l'exacte concordance des heures indiquées simultanément par la pendule du marégraphe et par le tambour sur lequel est enroulé le papier où se tracent les courbes. A cet effet, à une certaine heure précise, quart ou demie, il presse le traçoir ou le crayon, de manière à former sur le papier un petit point bien visible qu'il marque ensuite à l'encre. S'il s'aperçoit d'un dérangement dans la concordance des heures, il en recherche la cause et consigne le fait sur son journal à l'article Remarques diverses.

8° La feuille des courbes reste en place pendant un mois (à moins d'instructions contraires) ; elle est changée le premier jour du mois.

Sur trois ou quatre points de ses extrémités elle doit être collée sur le drap du tambour, afin qu'elle ne puisse glisser.

9° Dès que cette opération est terminée, l'on abat une des roulettes extrêmes seulement, afin que la pointe du crayon ne puisse s'engager dans les petits trous qu'elles forment sur le papier. On n'abat tout le système des roulettes qu'au moment de l'enlèvement de la feuille. Lorsque la nouvelle feuille est placée, on embraye le tambour et l'on place le crayon noir.

10° Pendant les premiers jours du mois et sans interrompre le jeu de la machine, l'agent trace avec une équerre ad hoc les amorces des heures et des demi-heures. Il pointille sur plusieurs endroits commodes les courbes des trois premiers jours du mois, afin de pouvoir aisément les reconnaître plus tard sans courir le risque de les confondre avec les courbes du 15, du 16 ou du 17 ; il est bien entendu que ces opérations doivent être faites avec précautions et sans appuyer le bras trop fortement sur le tambour.

11° Le 18 de chaque mois, à midi précis, le crayon noir sera remplacé par un crayon rouge, à moins d'instructions contraires.

12° Lorsque la feuille des courbes a été détachée du tambour, on inscrit à l'encre, sur plusieurs points du parcours de chaque courbe, le jour du mois auquel elle appartient ; on trace en noir les lignes qui indiquent les heures et les demi-heures ; on trace en rouge celles qui indiquent les quarts et les trois quarts.

13° Les courbes tracées au crayon sur les feuilles doivent être religieusement respectées lorsqu'il est nécessaire de les renforcer à l'encre (noire, rouge, verte) ; on doit avoir grand soin d'en suivre les diverses sinuosités, à l'exception toutefois des très-petites ondes formant des dents de scie, dans ce cas on fait passer la courbe coloriée par le milieu. On laisse subsister les traces du crayon, qui ne doivent jamais être effacées avec de la gomme. Les courbes des trois premiers jours du mois sont tracées en couleur verte.

14° Pour déterminer l'heure et la hauteur des pleines mers et des basses mers, on cherche le point maximum et le point minimum de chaque courbe au moyen d'une petite équerre qui sert à trouver la tangent au sommet de la courbe. Lorsque les sommets sont très-aplatis on trace une petite corde horizontale, c'est-à-dire parallèle à la trace des roulettes, à un ou deux millimètres du sommet, et l'on prend le milieu de cette corde pour point de tangence au sommet et par conséquent pour l'heure de la pleine mer ou celle de la basse mer. Le point, ainsi déterminé sur la courbe, est indiqué par un petit trait vertical qui la coupe, ainsi qu'on le voit ci-après.

15° Les heures et les hauteurs qui leur correspondent sont inscrites dans la colonne du journal des marées intitulée heure et hauteur de la pleine mer ou de la basse mer. La hauteur est exprimée en centimètres.

16° L'agent du marégraphe, au moyen du mètre ou du double décimètre mis à sa disposition, extrait des courbes les hauteurs relatives à chaque quart d'heure en partant de minuit et les inscrit sur le tableau intitulé : hauteur de la mer à chaque quart d'heure.

17° Lorsque la mer est belle, l'observateur observe à l'échelle des marées, placée près du marégraphe, l'heure et la hauteur de la mer vers le moment du plein et du bas de l'eau. Il consigne ces observations sur son journal dans les colonnes intitulées : heure, hauteur à l'échelle, et il inscrit au-dessous la hauteur donnée à la même heure par le marégraphe. Il indique aussi, dans la colonne agitation, l'état de la mer, en exprimant en centimètres l'amplitude de ses vagues ; amplitude qu'il apprécie au moyen de l'échelle placée extérieurement près du puits de marée.

18° Deux fois par mois, vers l'époque des syzygies (le lendemain ou le surlendemain de la nouvelle ou pleine lune, ou un peu plus tard si la mer était trop agitée) l'agent observe, de quart d'heure en quart d'heure, à la même échelle, la hauteur de la mer pendant sept heures consécutives. Ces observations sont inscrites dans les colonnes qui leur sont destinées à la page intitulée : remarques

diverses. La montre dont on se sert pour ces observations doit être en concordance parfaite avec la pendule du marégraphe.

19° L'observateur des marées consigne en outre sur son journal les observations météorologiques indiquées par l'entête des colonnes.

Il note la force et la direction du vent. Il observe, autant que cela lui est possible, la hauteur du baromètre de 3 heures en 3 heures (de 6 heures du matin à 9 heures du soir). Pour rendre, en hivers surtout, les observations de 6 heures du matin et celles de 6 heures et 9 heures du soir plus faciles, l'observateur pourra les faire chez lui au moyen d'un anéroïde mis à sa disposition. Ce dernier instrument étant sujet à des altérations, on compare assez souvent sa marche avec celle du baromètre Fortin, en faisant des observations simultanées sur chaque instrument. On n'en fera usage qu'à défaut d'observations faites avec le baromètre à mercure. (L'observateur pourra être dispensé de faire les observations météorologiques lorsqu'elles sont déjà faites à l'Observatoire du port. Dans ce cas il se borne à en faire la transcription sur son journal et sur le cahier bi-mensuel.)

20° Les observations barométriques doivent être réduites à la température zéro, au moyen de la table 1. Elles sont en outre transformées en pression équivalente d'eau de mer au moyen d'une petite table (n°2) de correspondance et dans l'hypothèse que 3 millimètres de mercure équivalent à 40 millimètres d'eau de mer.

Dans la table de correspondance n°2, la pression de 760 millimètres de mercure est désignée par 1,000 millimètres d'eau de mer. Ce dernier nombre a été choisi pour la facilité des calculs.

21° Au moyen des feuilles quadrillées dont il a été fait mention à l'article 4, l'observateur des marées trace en courbes la pression barométrique transformée en pression équivalente d'eau de mer. Sur ces feuilles l'intervalle des lignes représente 2 heures et le jour se trouve ainsi représenté par douze intervalles consécutifs. Pour les hauteurs, chaque intervalle représente 10 millimètres. Les observations faites pendant le jour servent à tracer à vue d'œil celles de la nuit ; cette interpolation graphique permet d'obtenir à peu près la pression pour l'instant de la pleine mer et de la basse mer.

Cette pression, ainsi conclue, est inscrite en centimètres dans la colonne du journal intitulée : correction de la pression barométrique ; elle s'ajoute à la hauteur de la pleine mer et de la basse mer placée à côté et le résultat de l'addition s'inscrit dans la colonne intitulée : hauteur corrigée.

*L'ingénieur hydrographe de 1^{re} classe, chargé du service des marées,
R. Chazallon.*

Les instructions assignées aux observateurs des marées par l'ingénieur hydrographe sont détaillées de manières exhaustives suivant 21 points :

- Les 3 premiers points décrivent les documents sur lesquels l'observateur doit noter diverses mesures et les modalités d'envoi au dépôt de la Marine, diminutif du Dépôt des Cartes et Plans. Le journal bi-annuel ou journal des marées (n°2) renferme toutes les heures et hauteurs des PM et BM déterminées à partir des marégrammes (voir n°14 et n°15), les lectures sur l'échelle des marées (n°17 et n°18) et les observations barométriques associés aux conditions météorologiques (n°19). Le journal bi-annuel est envoyé tous les 2 ans au dépôt contrairement au journal bi-mensuel qui lui est expédié tous les 2 mois accompagnés des marégrammes non pliés mais roulés. D'après F. Pons, développeur du Logiciel de NUMérisation des enregistrements graphiques de Niveaux d'EAU (NUNIEAU), sur les 150 années de marégrammes confondues qu'il a eu à numériser, aucun n'était plié (communication personnelle). Est-ce la recommandation de Chazallon qui a été suivie par tous ou est-ce le bon sens qui a guidé les différentes institutions à ne pas plier les marégrammes ? En tout état de cause, hormis un délai d'exécution plus long, la numérisation des marégrammes pliés, ne doit pas poser problème, d'après F. Pons. Le Directeur de l'Observatoire du site, responsable du marégraphe signe le journal bi-mensuel qui renferme

les hauteurs du niveau de la mer lus tous les quarts d'heure sur le marégramme (n°16). A partir de 1898, dans un nouveau protocole non signé mais reprenant en majeure partie celui de Chazallon, les hauteurs sont extraites seulement heure par heure ;

- Les points 4 à 7, portent sur le réglage du temps. Ils sont détaillés dans la section suivante (cf. 5.3.4.4) ;

- Les instructions 8 à 16 présentent les modalités d'installation du marégramme sur le tambour de l'appareil, énumèrent les différents repères en temps notés par l'observateur, expliquent la signification des différentes couleurs utilisées pour tracer les hauteurs d'eau et donnent la marche à suivre pour extraire du marégramme, les hauteurs d'eau tous les quarts d'heure ainsi que les heures et hauteurs des PM et BM. La détermination des dernières mesures (n°14) est nouvelle car jamais depuis 1679, elle n'avait été proposée. Cette procédure fut rendue possible grâce aux enregistrements en continu de la hauteur d'eau en fonction du temps ;

- Les procédures 17 et 18, commandent des observations de hauteur d'eau lues sur des échelles de marée, placées à l'extérieur du puits de tranquillisation, appartenant à l'observatoire. Ces lectures à l'échelle servent à vérifier la bonne marche du marégraphe. Elles permettent aussi de contrôler le puits de tranquillisation, lequel peut être obstrué et ainsi fausser les mesures marégraphiques ;

- Les dernières instructions (19 à 21) portent sur les mesures météorologiques à relever. Ainsi, la pression atmosphérique est observée de 6h00 à 21h00 de 3h00 en 3h00 (n°19) et réduites à la température zéro et au niveau moyen de la mer (n°20). Au moment de chaque PM et chaque BM, la pression atmosphérique est jointe dans le cahier bi-annuel (n°21).

Grâce aux différentes instructions, les observations des marées réalisent leur travail dans un cadre strict parfaitement bien délimité. Avec l'installation des 5^{ème} et 6^{ème} marégraphes le long du littoral français à Enet et Rochefort en 1859, 6 observateurs exercent dans ce corps de métier. C'est durant cette année qu'est publié l'arrêté ministériel sur l'organisation des postes marégraphiques et du service des marées officialisant ce corps de métiers existant depuis déjà 16 ans ! Le décret, modifié en 1882 est repris entièrement sur la page suivante¹ :

¹ Arrêté ministériel : B.O. 2^e 5. p.451.

1^o) Décret ministériel concernant l'organisation du Service des Marées au dépôt de la marine dans les ports militaires et dans les ports de Commerce. Paris le 25 novembre 1859.

- I. Le service des marées est centralisé au dépôt de la marine.
- II. L'Ingénieur chargé de ce service rédige, au moins une année à l'avance, l'annuaire des marées. Il prépare les instructions de détail pour les ports et adresse au directeur général du dépôt toutes les propositions intéressant le service.
- III. Dans chacun des ports où il y a un marégraphe, les observations de marées et les calculs élémentaires auxquelles elles donnent lieu, sont confiées à des observateurs des marées.
- IV. Ces observateurs sont proposés par les majors généraux, ils sont nommés et révoqués par les préfets maritimes. Ils sont choisis parmi les officiers marinières retraités ou demi-soldés et reçoivent une indemnité annuelle de 600 à 800 francs.
- V. Ils sont placés sous les ordres immédiats des directeurs d'observatoires, dans les ports militaires et sous ceux des professeurs d'hydrographie dans les ports de commerce.
- VI. Les instructions du dépôt leur sont transmises par l'intermédiaire des directeurs d'observatoires ou des professeurs d'hydrographie chargés de la surveillance de leur service et de la transmission au dépôt de leurs registres, feuilles d'observation et courbes de marées. Ces divers documents seront conservés aux archives du Dépôt. Les directeurs d'observatoire et professeurs d'hydrographie donnent chaque année sur les observateurs des marées, des notes qui seront adressées hiérarchiquement au ministre pour être transmises au dépôt. Ils joindront à ces notes un rapport sur l'état du matériel et la manière dont fonctionne l'établissement.
- VII. Le matériel des observateurs des marées fait partie du matériel scientifique du dépôt de la marine (sciences et arts).
- VIII. Il sera composé des instruments suivants :
 - 1^o) Un marégraphe ;
 - 2^o) Une montre à secondes en argent ou un chronomètre compteur ;
 - 3^o) Deux thermomètres ordinaires ;
 - 4^o) Un baromètre Fortin ;
 - 5^o) Un baromètre anéroïde ;
 - 6^o) Un mètre en bois divisé à biseau ;
 - 7^o) Une règle en fer de 1^m à 1^m.50 ;
 - 8^o) Une règle en fer de 0.40 à 0.75 ;
 - 9^o) Un double décimètre et une équerre en fer divisée à biseau ;
 - 10^o) un petit étui de mathématiques contenant trois tire-lignes.
- IX. Les instruments sont délivrés à titre de prêt aux observateurs des marées, qui en demeurent responsables d'après les règles en vigueur pour le matériel de la marine. Un inventaire des objets prêtés reste entre leurs mains. Une expédition de cet inventaire, signés par eux et certifiée, suivant le cas par le directeur de l'observatoire où le professeur d'hydrographie est adressé chaque année au ministre pour être transmise au dépôt de la marine.
- X. Les dépenses du matériel, autres que celles stipulées à l'article 8, incombent au service des travaux hydrauliques.

Disposition transitoire.

Les agents actuels pourront conserver leurs fonctions.

Paris le 25 novembre 1859

Approuvé :

*L'Amiral, Secrétaire d'Etat de la marine
Signé Hamelin.*

2^o) Modifications à apporter au règlement du 25 novembre 1859, sur l'organisation du Service des Marées au dépôt de la Marine, dans les Ports militaires et dans les Ports de Commerce. Paris, 20 avril 1882.

A la date du 20 avril 1882, le Ministre a décidé que l'article 4 de l'arrêté ministériel du 25 novembre 1859, sur le service des marées, sera modifié ainsi qu'il suit :

IV. Ces observateurs sont proposés par les Majors généraux ; ils sont nommés et révoqués par les Préfets maritimes. Ils sont choisis de préférence parmi les officiers marinières, retraités ou demi-soldiers, et parmi les anciens serviteurs de la marine. A défaut de candidats de cette catégorie, on pourra appeler à ce poste tout observateur présentant des garanties suffisantes de capacité. Ces observateurs reçoivent une indemnité annuelle de 600 à 800 francs.

Dans ce décret, les articles I, III, VI, VII, VIII et IX reprennent les instructions pour les observateurs des marégraphes donnés par Chazallon. Le bon fonctionnement d'un observatoire ne peut se faire qu'avec un personnel motivé, compétent et professionnel dans les charges qui leurs incombent. Entre 1859 et 1882, les observateurs étaient choisis parmi d'anciens marins, habitués aux rigueurs militaires (article IV). La difficulté à trouver un observateur pour Fort Boyard en 1882 (cf. 5.3.3.2) oblige la modification de cet article pour élargir la candidature à toute personne "*présentant des garanties suffisantes de capacité*". Il est étonnant de découvrir qu'à partir de 1859, les observateurs des marées ne sont plus nommés par le responsable du Service des Marées. Cette tâche devient celle du préfet maritime qui nomme ou démet les observateurs sur proposition des majors généraux. Néanmoins, le chef du service des marées propose toujours, comme l'indique l'extrait de cette lettre de Chazallon au ministre de la Marine, des noms d'observateurs¹ :

[...] *J'avais désigné pour la conduite du marégraphe [de Saint Servan] le fils du pilote Aymiès qui avait servi sous les ordres de M. Beautemps-Beaupré. Le fils avait été employé pendant trois à quatre ans aux observations des marées ; j'avais été témoin de son assiduité et M. Beautemps-Beaupré lui avait délivré de bons certificats. Sa maison se trouvant d'ailleurs la plus rapprochée du puits de marée, rendait la surveillance facile. M. le Directeur général n'accepta pas ma proposition et fit nommer M. Louvel. Cet agent remplissait assez bien son service mais y renonça en 1851. Je proposai de nouveau le fils Aymiès qui ne fut pas accepté et l'on désigna M. Tréhouart.*

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'apprit que l'instrument ne marquait plus l'heure d'une manière exacte. Je fis part de ces faits à M. l'Ingénieur en chef et à monsieur le Directeur général. J'espérais cependant qu'il serait possible de tirer parti de ce travail, mais cette illusion vient d'être détruite il y a environ trois semaines, 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. [...]

Malheureusement, même si le responsable du service des marées propose des individus pour la surveillance du marégraphe, il n'est pas toujours suivi. Parfois, comme c'est le cas pour l'observatoire de Saint-Servan, cela entraîne un gâchis au niveau des mesures obtenues qui deviennent inutilisables. Pour palier à ce genre d'ennuis, le responsable des marées ne pouvant être présent en permanence aux côtés des différents observateurs est secondé, dans cette surveillance du personnel, par les directeurs locaux des observatoires astronomiques ou les professeurs d'hydrographie (V). Quelques jours après la publication du décret ministériel de 1859, Chazallon se chargea d'envoyer au Ministre la notation des différents observateurs suivant l'appréciation de leur responsable.

¹ Chazallon R. Rapport à Monsieur Hamelin, Ministre de la Marine, le 6 décembre 1859. Archives SHOM.

En 1861, une inspection complète des marégraphes fut ordonnée donnant lieu à un rapport individuel pour chaque observatoire¹. Le questionnaire à remplir, décomposé en 10 chapitres était très exhaustif :

Local : grandeur ; éclairage ; chauffage ; salubrité ; distance du puits ; hauteur au dessus de la B.M. ;

Puits : dimension, orifice d'introduction de l'eau ; oscillation de la hauteur du fond par rapport à la B.M. ; dimension du flotteur ; vide entre les parois du puits et le flotteur, mode d'attache ; liaison du flotteur au marégraphe ; contrepoids ;

Marégraphe : dimension et détails de l'instrument ; durée de la révolution du cylindre ; longueur du cylindre ; moyen de faire concorder les heures du cylindre et celles de l'horloge ; chariot ; traçoir ; mode d'attache du papier ; longueur du papier envoyé de Paris ; durée de ce papier ; crayons de couleur ; moyen de différencier les courbes :

Zéro : zéro du marégraphe par rapport au zéro des sondes des cartes ou par rapport à plusieurs points communs ; remise du marégraphe au zéro après la rupture du fil du flotteur ou de celui du chariot ;

Temps : moyen de régler l'heure du marégraphe : - avec une montre à secondes, - avec un compteur ;

Matériel : matériel réglementaire ; instruments utiles à ajouter ;

Echelle de marées : position de l'échelle ; distance au marégraphe ; facilité d'observer ; longue vue pour cela ; la Basse-Mer à l'échelle peut-elle toujours s'observer ;

Journaux : Quand se fait le dépouillement des courbes pour obtenir l'heure et la hauteur des P.M. et B.M. ? Même question pour les tableaux de la hauteur de la mer de quart d'heure en quart d'heure ; Avec quelle approximation ? Envoi des journaux bi-mensuels et des tableaux de hauteur de la mer ; envoi des journaux bi annuels ; quel approvisionnement de journaux et papiers faudrait-il ? Heure de présence de l'observateur ? observations météorologiques ;

Communication aux autres services : communication des observations marégraphiques aux autres services ; soit en les laissant prendre copie par des hommes accrédités pour cela ; soit en leur donnant copie moyennant rémunération ;

Personnel : Rappeler aux directeurs d'observatoire et professeurs d'hydrographie les notes qui leur sont demandées par l'arrêt du 25 9^{bre} [novembre] 1859.

Ce formulaire s'intéresse aussi bien sur le local où sont effectués les mesures, le puits qui permet au flotteur de se mouvoir, au marégraphe qui est l'organe indispensable à l'observatoire avec ses réglages en hauteur et en temps, l'échelle de marée qui permet de vérifier la bonne marche de l'appareil, les journaux ou plus largement, les méthodes de dépouillements des marégrammes et, enfin, des informations sur la communication des mesures à d'autres services. Ce questionnaire, anonyme, est certainement l'œuvre de Gaussin. Il s'agit, pour ce dernier, de connaître précisément l'ensemble des observatoires qu'il supervise. Etrange quand on sait que Gaussin travaillait dans le service des marées aux cotés de Chazallon. Il est probable que la relation entre les deux hommes n'était pas au beau fixe et donc, Chazallon avant de partir n'a certainement pas légué à son successeur, l'ensemble de ses connaissances sur les observatoires. Cela expliquerait d'autant mieux le blâme infligé à l'ancien chef du service (cf. 5.3.1).

¹Anonyme. Inspection des marégraphes, 1861. Archives SHOM, cote IV- 2/4 ; 3.

5.3.4.4. Réglages en temps des appareils.

Parler du réglage en temps des marégraphes peut paraître surprenant de prime abord. Pourtant, au cours du 19^{ème} et début du 20^{ème} siècles, les marégraphes furent calés sur différents temps : d'abord aux temps locaux ; puis réglés sur des temps assignés par diverses conventions et lois permettant l'utilisation d'une heure commune sur de larges secteurs géographiques.

Dès l'aube de l'Humanité, la mesure du temps repose sur ce que l'on croyait irrécusable et immuable : la rotation de la Terre autour de son axe provoquant le mouvement apparent du Soleil dans le ciel et donc l'alternance des jours et des nuits. Cette notion du **Temps Solaire Vrai** (TSV) d'un lieu correspond à l'angle horaire du Soleil en un lieu et à un instant donnés. Il s'agit du temps directement lu sur les cadrans solaires. D'après J. L. Simon & al. (1997), le TSV présente l'inconvénient de ne pas être régulier à cause des inégalités de l'ascension droite du Soleil dues à l'excentricité de l'orbite terrestre et à l'inclinaison de l'orbite terrestre par rapport à l'équateur. La somme de ces inégalités est à la source de l'équation du temps.

D'après les éphémérides astronomiques de 2001, pour s'affranchir de ces irrégularités qui atteignent 30 minutes au cours de l'année sur le TSV (figure 5.4), le **Temps Solaire Moyen** (TSM) fut introduit en France à partir de 1816. Ce TSM est donné par un Soleil moyen fictif se déplaçant dans le plan de l'équateur céleste, sur une orbite circulaire, à vitesse constante. La figure 5.4 illustre la relation variable au cours de l'année entre le TSM et le TSV (TSM-TSV). Elle s'annule quatre fois par an, mi-avril, mi-juin, mi-septembre et fin décembre. Lorsque l'équation du temps est positive (respectivement négative) le TSV est en retard (respectivement positive) par rapport au TSM. Elle atteint son maximum vers la mi-février ($\approx +14\text{min}$) et son minimum début novembre ($\approx -16\text{min}$). L'équation du temps varie même au cours de la journée et évolue très lentement d'une année sur l'autre.

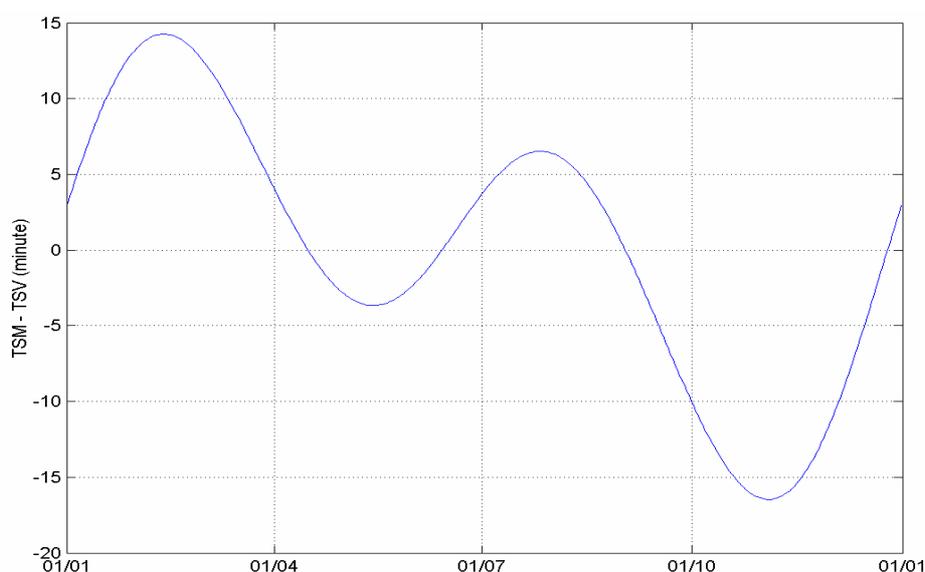


Fig. 5.4. – Variation annuelle de l'équation du temps (TSV – TSM) pour 2008. Le TSV dure exactement 24h00 les 4 jours de l'année où l'équation du temps est égale à 0.

Le TSM comme son nom l'indique change d'un lieu à l'autre. Avec le développement des moyens de communications (train, navigation portuaire), l'utilisation d'une heure commune sur un territoire étendu devient indispensable. En France et Algérie, le Temps Civil (TC) de Paris (TSM de la capitale) fut choisi et appliqué par la loi du 14 mars 1891.

A la suite de la conférence de Washington en 1884 le temps civil de Greenwich devient le temps légal universel, plus sous le nom de **Temps Universel** [TU]. Le TU n'est autre que le TSM de Greenwich auquel est ajouté 12 heures (pour faire commencer le jour à minuit et non pas à midi et ainsi éviter le changement de quantième au cours de la journée). Selon la loi du 9 mars 1911 en vigueur jusqu'en 1978, l'heure légale en France était l'heure du TC de Paris retardée de 9 minutes 21 secondes. Cette loi signifiait tout simplement que l'heure en France adopte le TU. Cette loi fut remplacée par le décret du 9 août 1978 qui stipule que *"le temps légal est obtenu en ajoutant ou en retranchant un nombre entier d'heures au temps universel coordonné"*. Ce décret officialise l'usage des heures d'hiver (TU+1) et heures d'été (TU+2) apparu pour la première fois en France en 1916.

Dans les instructions pour les observateurs de marégraphes rédigés par Chazallon (cf. 5.3.4.2), les articles 4 à 7 discutent du réglage en temps. L'article 4 stipule que les marégraphes doivent être réglés en temps vrai, c'est-à-dire en TSV. Etrange car au cours de l'année, un jour en TSV varie de 23 heures 59 minutes 30 secondes à 24 heures 00 minute 30 secondes. Cette irrégularité du jour amène les observateurs à régler journalièrement la marche du marégraphe (point 6) qui fonctionnait grâce à un système d'horlogerie mesurant de manière régulière le temps. Cette utilisation du TSV est source d'erreur comme le suggère Chazallon dans l'article 6 : *"Si l'observateur remarque que sa montre, réglée par le Directeur de l'Observatoire, fait éprouver un saut brusque (deux ou trois minutes) à l'heure du marégraphe dont la marche est habituellement régulière, il s'abstiendra de faire la correction avant d'avoir prévenu de ce fait M. le Directeur, qui a pu se tromper de signe en appliquant l'équation du temps."* Le directeur de l'Observatoire fournissant à l'observateur des marées un TSV calculé à partir du TSM. Plusieurs niveaux d'erreurs peuvent se présenter : erreur de signe dans l'application de l'équation du temps pour passer du TSV au TSM ; réglage de l'appareil sur le TSM au lieu du TSV ; non réglage du marégraphe durant plusieurs jours entraînant une dérive du TSV...

Pourquoi Chazallon ordonna-t-il de régler les marégraphes sur le TSV alors que depuis 1816, le TSM, plus commode et non entaché par les dérives journalières, était utilisé en France ? L'ingénieur en chef du Service des Instruments et Marées entre 1885 et 1902, Hatt donne la réponse dans une lettre à l'ingénieur en chef du SHM en 1893¹ : *"L'usage du temps vrai trouvait sa justification dans les procédés proposés par M. Chazallon pour la séparation des ondes solaires et lunaires et pouvait être défendu à ce titre malgré les inconvénients qu'entraînait la variabilité de la période"*. Dans sa lettre, Hatt expose les nombreux inconvénients rencontrés avec l'utilisation du TSV : *"le dépouillement des feuilles de marégraphe se fait beaucoup plus péniblement par suite de la nécessité de ramener le temps vrai en temps moyen que si les ordonnées correspondaient exactement aux divisions horaires moyennes et exige un temps plus considérable pour être affecté"*. A partir de 1898, les instructions pour les observateurs sont retouchées (cf. 5.3.4.2) en introduisant le réglage des marégraphes sur le TSM et non plus sur le TSV. Le titre des feuilles de dépouillement de cette époque l'étaye : *"hauteur de la mer à chaque heure (temps moyen du lieu) prises sur les courbes du marégraphe"*. Avant cette date, les feuilles de dépouillements avaient comme

¹ Hatt. Proposition de régler les marégraphes sur le temps moyen à l'Ingénieur en chef du SHM, le 4 décembre 1893. Archives SHOM.

titre : "hauteur de la mer à chaque quart d'heure (temps vrai), prises sur les courbes du Marégraphe".

Enfin, l'article 7 des recommandations de Chazallon revêt aujourd'hui une importance capitale lors de la numérisation des marégrammes. Tous les jours, suivant une heure ronde, quart ou demie, une marque était appliquée sur le marégramme installé autour du tambour. Ces marques permettent d'augmenter pour chaque hauteur, sa précision en temps. D'après Simon (2007), une précision de l'ordre d'une minute dans la datation de la hauteur d'eau est généralement considérée suffisante pour les études relatives à la marée.

5.3.4.5. Principales erreurs liées aux mesures du MCM.

Malheureusement, un certain nombre d'erreurs sont inhérentes à l'utilisation des marégraphe à flotteur. Le tableau 5.5 fait l'inventaire de ces limites grâce à l'expérience du personnel du SHOM plus particulièrement grâce aux indications de Lucas et Le Goff :

Type d'erreur	Descriptif	Nature	Moyen de détection	Remèdes
Mécanique	Jeu dans les engrenages, corrosion, marégramme mal fixé/installé, saut du fil	A	Comparaison des mesures avec un autre appareil	Entretien régulier du MCM
Mesure des hauteurs	jeu du marégramme calage du marégramme	S	Lors du dépouillement	Recalage en hauteur si possibilité
Mesure du temps	Mauvais calage en temps Variation de la marche de l'horloge	S	Comparaisons des observations avec les prédictions	Correction possible.
Puits de tranquillisation	Envasement	S		Curage régulier
	Mauvais dimensionnement	S		Pas de correction possible
Dépouillement	Numérisation	A	Comparaison des écarts-types entre les observations et les prédictions	

Tab. 5.5 – Principales sources d'erreurs sur les mesures causées par les MCM (Nature : A (Accidentelle) et S (Systématique) d'après Lucas et Le Goff (communication personnelle).

Comme le tableau 5.5 le souligne, le rôle de l'observateur (cf. 5.3.4.3) est prépondérant dans le calage en temps (cf. 5.3.4.4) et en hauteur (cf. 5.3.4.2) des marégrammes. Il l'est tout autant pour l'entretien mécanique du marégraphe, sujet à une usure usuel. En revanche, les erreurs introduites par une mauvais dimensionnement ou par un envasement du puits de tranquillisation (cf. 5.3.4.1) sont aujourd'hui impossibles à corriger. Il faut donc prendre soin, lors de la conception d'un observatoire, de bien le calibrer et procéder à des curages réguliers, lorsque l'envasement du puits l'exige.

5.4. Evolution des besoins de la marine depuis la fin de la première guerre mondiale.

Depuis la fin de la première guerre mondiale, l'intérêt de la Marine pour les observations marégraphiques n'a cessé d'évoluer. Deux périodes ressortent : la première entre 1920 et 1980 où par désintérêt, les mesures sont réduites au seul port de Brest ; la seconde à partir des années 1980 avec l'émergence des problématiques nouvelles.

5.4.1. L'âge sombre de la marégraphie française : 1920 – 1980.

Alors qu'un regain d'intérêt surgit pour la marégraphie au lendemain du premier conflit mondial (fig. 5.5), la Marine française stoppe ses mesures à la fin des années 1910. A travers le monde, les organismes travaillant sur ces observations se regroupent en 1933 derrière un service ayant comme but premier de publier les niveaux moyens de la mer. Quelques années plus tard, il fournit en plus des instructions pour réaliser les mesures. La France, nation impliquée dans cette structure, suit alors les recommandations qui en émanent.

5.4.1.1. Situation mondiale.

A partir de 1920, le réseau mis en place par Chazallon et géré par le SHM ne compte plus qu'un seul marégraphe fonctionnant à Brest (cf. 5.3.3.2). Les Ponts et Chaussées et les Travaux Hydrauliques prennent la direction de certains observatoires gérés jusqu'alors par la marine (cf. 5.3.3.3). Avec le Service de Nivellement, les 3 organismes pour leurs besoins spécifiques, poursuivent les observations. Dès lors, avec la multiplication des Services, la notion de réseau et d'unicité dans les méthodes utilisées pour mesurer le niveau de la mer n'existe plus.

Tandis que la marégraphie est abandonnée par le principal organisme qui l'avait initiée depuis la seconde moitié du 19^{ème} siècle en France, les côtes des autres pays se couvrent d'observatoires et les intérêts d'observer la mer redoublent. C'est à cette époque, en 1933, qu'est fondé, à l'Observatoire de Bidson, le PSMSL. Il s'agit d'un centre de collecte international des données du niveau moyen de la mer. L'organisme est responsable de la conservation et de la distribution des données ainsi que de leur analyse et explication¹. Aujourd'hui, la banque de données contient plus de 1980 stations. La distribution temporelle, de la première année de mesures de chacun des observatoires se trouvant au PSMSL est représentée sur la figure 5.5. Sur 113 années, entre 1807, année de départ de la plus ancienne série de mesures disponibles au PSMSL faites à Brest et 1920, arrêt des observations par la marine française, 232 stations sont référencées sur 113 années. Ce nombre est presque

¹ URL : <http://www.pol.ac.uk/psmsl/> (consulté le 5 octobre 2008).

identique à celui déterminé pour la période comprise entre 1921 et 1940, qui dénombre 226 observatoires pour 20 années seulement !

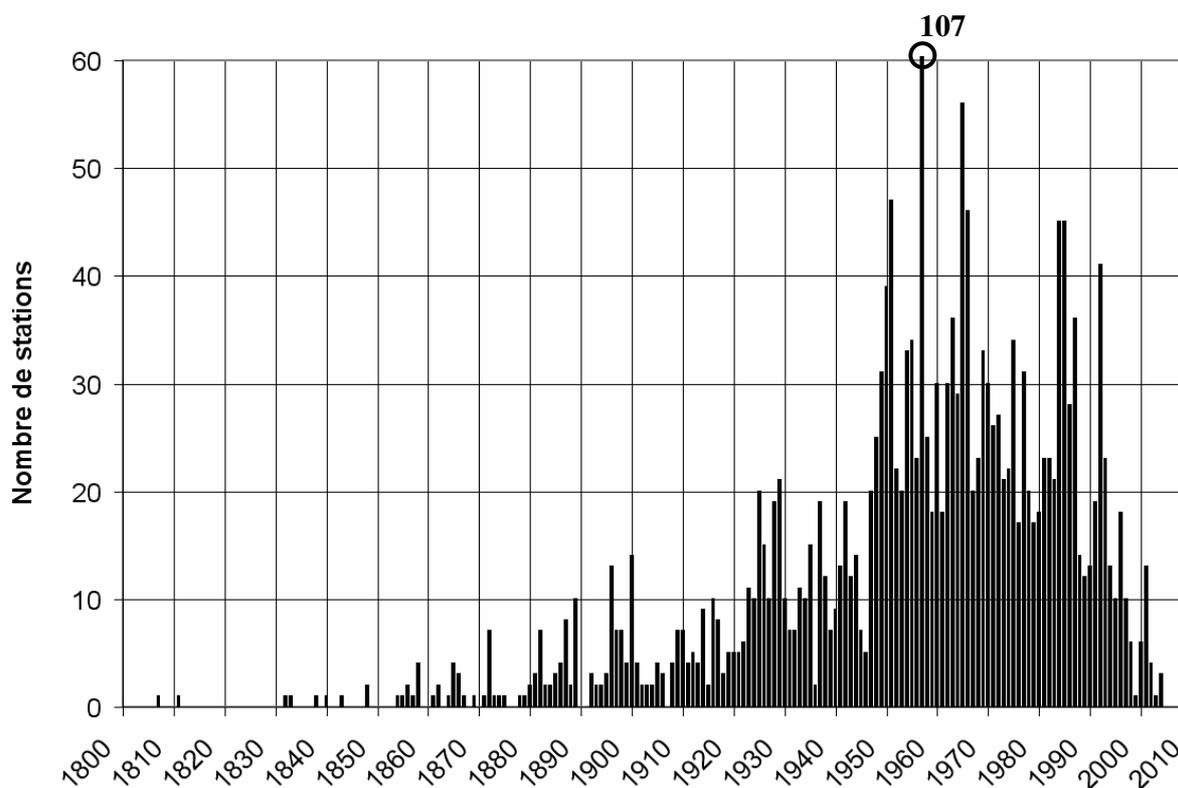


Fig. 5.5 – Distribution temporelle pour chacune des 1984 stations disponibles au PSMSL de la première année de mesures.

Durant la seconde guerre mondiale un nouveau réseau, installé par les forces occupantes, va se développer en France. Les ports militaires n'ayant pas fait l'objet de mesures du niveau de la mer depuis plusieurs décennies sont équipées de marégraphes comme à Boulogne, Calais, Cherbourg Lorient et La Rochelle - La Pallice. Ce réseau ne fonctionna que brièvement disparaissant en même temps que le dernier observatoire géré par le SHM sous les bombardements alliés en 1944. Il faudra attendre 1949 pour qu'un nouvel observatoire soit reconstruit dans cette ville.

En 1955, la Marine Nationale, outre la gestion du marégraphe de Brest, a sous sa responsabilité, les marégraphes installés à Toulon, Bizerte [Tunisie] et Dakar [Sénégal]. Seul les enregistrements de Brest étaient alors régulièrement dépouillés par le Service Hydrographique au contraire des trois autres sites qui ne faisaient pas l'objet de traitements et d'analyses particuliers¹. De plus, Koenig rajoute dans sa lettre : *"je crois utile d'attirer votre attention sur la difficulté d'obtenir, de la part d'un personnel insuffisamment spécialisé, des enregistrements de marée qui soient rigoureusement corrects en heure et en hauteur. L'expérience a montré au Service Hydrographique que la surveillance des marégraphes était une opération très délicate demandant beaucoup de minutie, en raison des nombreuses causes d'erreur qui peuvent intervenir (irrégularité du mouvement d'horlogerie, dérèglement du*

¹ Koenig P. [secrétaire d'état à la Marine, Service Central Hydrographique]. Lettre au ministre des Travaux Publics des Transports et du Tourisme, le 24 septembre 1955. Archives SHOM.

style, obstruction partielle du tube faisant communiquer le puits avec la mer, avarie de l'échelle de contrôle, etc...)".

5.4.1.2. Protocole établi en 1961 par le PSMSL.

La seule instruction trouvée au SHOM, pour cette période, est la *Publication Spéciale* n°43 du Bureau Hydrographique International paru en 1961. Ce document est né d'une prise de conscience du PSMSL. En effet, les valeurs moyennes mensuelles et annuelles du niveau de la mer publiées par le service ne présentaient pas "toutes la valeur exigée par les recherches scientifiques modernes". L'article : les conditions minima requises pour le fonctionnement d'un marégraphe rédigé par Disney, chef-adjoint de la Division des Marées et Courants de U.S. Coast and Geodetic Survey se décompose en 2 parties : la première discute de l'observatoire tandis que la seconde donne des conseils aux observateurs des marées.

La première partie se décompose en 8 points :

Le premier point présente les qualités d'un bon l'observatoire : *"la profondeur ne doit pas être inférieure à 5 feet" [≈1,52m]* au-dessous de la plus BM possible ; la station doit être située sur *"une côte ouverte ou dans une baie ayant une large ouverture vers la mer"*.

Les deuxième et troisième points s'intéressent à l'orifice permettant la communication de la mer avec le puits de tranquillisation. L'orifice doit avoir *"une dimension suffisante pour permettre un libre accès de la marée tout en atténuant l'effet des grosses mers"* ; un orifice unique est préférable à plusieurs petits car il sera plus difficilement obstrué et plus facilement lavable ; l'obstruction de l'orifice peut fausser des erreurs dans l'enregistrement par le marégraphe du niveau de la mer ; cette entrave à la mer peut être liée à l'accumulation de sédiments ou à la prolifération d'algues à l'entrée du conduit.

Le quatrième point s'attache aux rattachements entre l'échelle de référence et *"au moins trois repères de marée stables"*. Ces rattachements doivent avoir lieu lors de l'établissement de la station puis une fois chaque année ou plus fréquemment si l'échelle de référence est déplacée.

Le cinquième point explique que le marégraphe doit être contrôlé en temps et en hauteur au moins deux fois par semaine mais de préférence chaque jour. Le contrôle en hauteur s'effectue en comparant des mesures lues sur l'échelle des marées avec celles obtenues par le marégraphe. De même, le temps donné par l'appareil est comparé à celui d'une montre parfaitement bien réglée.

Le sixième point expose les taux de réduction minimales tracés sur les marégrammes : l'échelle minimum des temps doit être d'au moins de 6 inches [15 cm] pour 24h00 mais l'emploi d'échelles de temps de dimensions suffisantes atteignant jusqu'à 24 inches [60 cm] par 24h00 permet l'enregistrement de tsunamis, seiches et onde de tempête. L'échelle des hauteurs doit être telle que les lectures puissent être faites au dixième de foot [3 cm].

Le septième point précise que les horloges commandant les marégraphes doivent pouvoir fonctionner sans dériver en temps durant au moins 8 jours surtout si personne ne peut s'occuper de l'appareil durant ce laps de temps.

Le huitième point détaille le rôle central qu'a l'observateur des marées vis-à-vis d'un fonctionnement satisfaisant d'un marégraphe. *"Il doit avoir reçu des instructions complètes sur ses devoirs et il doit être persuadé de l'importance d'observations soignée"*. Un fonctionnement convenable de l'appareil exige une coopération étroite et régulière entre l'observateur et le bureau qui dépouille les enregistrements. *"Tout mauvais fonctionnement ou modification de l'équipement ou de la méthode d'observation doit être immédiatement noté par l'observateur et ces renseignements doivent être envoyés systématiquement au bureau de dépouillement"*, toutes les semaines par exemple.

Ce dernier point empiète sur la seconde partie des recommandations donnant des conseils aux observateurs. Il s'agit ici d'avertissements pour que la personne ayant en charge le fonctionnement du marégraphe sache résoudre différents problèmes :

- Si la courbe de marée dessinée par le marégraphe est déformée (tracé anormalement plat lors des étales de PM et BM ou par une série de marche d'escaliers lors du flot et jusant), un frottement dans les parties mobiles du marégraphe est en cause.
- Si l'enregistrement de l'étales de la PM est anormalement long comme la courbe dessinée lors du jusant, l'orifice permettant la communication entre la mer et le puits est obstrué. *"Lorsque les puits sont en fer, des plaques de rouilles tombent à l'intérieur de la conduite et peuvent recouvrir la prise à agir comme une valve à sens unique"*. La mer remplit normalement le puits mais, lors du jusant, l'eau dans le puits se trouve emprisonnée. Pour éviter les risques d'obstruction, le conduit doit être nettoyé au moins une fois par mois.
- Si le puits du flotteur n'a pas un axe vertical, il peut arriver que le flotteur frotte sur les parois. La position du marégraphe doit être réglée de sorte que le flotteur soit centré dans le puits à environ mi-marée.

Enfin, l'opération principale de l'observateur des marées est la comparaison des lectures et hauteurs avec l'échelle de marée. Les lectures à l'échelle, même si elles peuvent sembler grossières et imprécises permettent pourtant, d'avoir finalement un degré de précision très satisfaisant dès lors que *"les lectures sont faites en dehors de toute idée préconçue"* car basées sur la moyenne d'un grand nombre de lectures faites pendant une longue période de temps.

Tout comme les termes de Koenig en 1955 (cf. 5.4.1.1), est amené à la conclusion que Disney : *"le fonctionnement satisfaisant d'un marégraphe dépend largement de l'observateur qui en a la charge"*.

5.4.2. Les années 1980 : Regain d'intérêt pour l'observation du niveau de la mer en France.

Les mesures du niveau marin, dans les années 1980, profitent d'un formidable regain d'intérêt avec les problématiques sur le changement climatique qui prennent de plus en plus d'importance. C'est à cette époque qu'est créé en 1980, le World Climate Research

Programme (WCRP), sous le patronage de l'International Council for Science (ICSU) et de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM)¹. L'année 1988 voit la naissance du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC) fondé par l'OMM et l'United Nations Environment Programme (UNEP)². Le WCRP sert à déterminer la prévisibilité du climat ainsi que l'effet des activités humaines sur le climat. Les activités du IPCC consistent à procéder, suivant des intervalles réguliers, à une évaluation de l'état des connaissances relatives au changement climatique en évaluant "sans parti pris" et de façon méthodique, les informations d'ordre scientifique, qui sont nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés et cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement³.

Afin de répondre au mieux à ces nouvelles attentes, deux documents sont publiés en France : un répertoire des zones de marée et des zéros hydrographiques sur les côtes métropolitaines parait en 1979 dans les *Annales Hydrographiques* et une instruction sort en 1982 au SHOM pour unifier les observations de la marée et la rédaction des documents relatifs à ces mesures⁴. La publication de ces documents préfigure le renouveau de la marégraphie française.

5.4.2.1. Contexte.

Dans le sillage du WCRP et de l'IPCC, la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) fondé en 1960 prend conscience de la richesse des informations contenues dans les enregistrements marégraphiques des stations côtières : *"elles peuvent fournir des informations précieuses sur la variabilité océanique autre que les marées en expliquant aussi bien les mécanismes des ondes de tempête et de leur prévisibilité et annoncent un ensemble de changement intervenant dans les conditions océaniques"*⁵. Pour le COI, le réseau marégraphique doit être étendu et les échanges des données améliorées afin d'étudier *"l'influence des océans sur les changements climatiques et mettre en place par la suite des systèmes prévisionnels de prévision de ces changements"*.

Afin de dresser un état actuel des observatoires enregistrant le niveau de la mer, le PSMSL entreprit une enquête mondiale sous la forme de 6 questions auprès de 98 pays. Sur 204 organisations et particuliers ayant reçu le questionnaire, 92 y ont participé, validant l'exploitation de 771 marégraphes au total. Pour la France, quatre organismes répondirent au questionnaire : le Centre National pour l'EXploitation des Océans [CNEXO, futur IFREMER], l'Etablissement Principal du SHOM, l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM, futur IRD) et l'Institut Scientifique et technique des Pêches Maritimes (ISTPM). Des quatre organismes, seul le SHOM enrichi l'inventaire de 15 observatoires situés en France pour les sites de : Dunkerque, Calais, Boulogne, Dieppe, Antifer, Le Havre, Cherbourg, Roscoff, Le Conquet, Brest, Port Tudy, Pointe St Gildas, La Pallice, Socoa et Toulon.

¹ URL : http://www.wmo.ch/pages/prog/wcrp/About_History.html (consulté le 5 octobre 2008).

² URL : <http://www.ipcc.ch/about/index.htm> (consulté le 5 octobre 2008).

³ URL : http://wcrp.wmo.int/About_History.html (consulté le 5 octobre 2008).

⁴ Bourgoin, Ingénieur Général de l'Armement, Directeur du SHOM (11/06/1982). Observation de la marée et rédaction des documents relatifs à cette observation. Instruction n°509 SHOM/EM/NP.

⁵ COI n°23, 1983. Stations marégraphiques opérationnelles, réf ISBN 92.3.202104.8

Lors de la 13^{ème} session de l'Assemblée de la COI en 1985 est adopté la résolution XIII-7 portant sur la mise en place d'un système mondial d'observation du niveau de la mer. Le Global Sea Level Observing System (GLOSS) est un programme international visant à l'instauration de mesures de haute qualité du niveau de la mer en unifiant les méthodes d'acquisition, d'analyse et de traitement. C'est dans cette optique que le manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer fut publié par le COI en 1985. Par ailleurs, GLOSS apporte également toute l'aide nécessaire aux états membres souhaitant installer des stations marégraphiques pour mesurer le niveau marin. Malheureusement, le programme n'a aucuns fonds propres.

Alors que depuis l'origine, les observations du niveau de la mer étaient réalisées sur Terre, le Séminaire de Prospective Scientifique Spatiale des Arcs en 1981 révolutionne la donne (Feloux, 2000). En 1985, un tournant capital dans l'étude des mouvements océaniques est impulsé, lorsque les projets français et américains fusionnent pour donner naissance au programme Topex-Poséidon. Le satellite de ce nom, lancé en 1992 fournit alors des détails sur l'état dynamique de l'océan et notamment la topographie de la mer¹.

5.4.2.2. Inventaire des observatoires marégraphiques en France en 1984.

En 1984, dans le sillage de l'investigation mondiale menée par le PSMSL et relayé par le COI (cf. 5.4.2.1), une enquête fut menée, auprès des organismes français possédant des marégraphes, conjointement par le Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables (STCPMVN) et par le SHOM². Ce travail fut entrepris dans le cadre du groupe de travail permanent sur la marégraphie côtière du Comité de Recherche et de Développement de l'IGN, afin de faire le bilan des installations existantes, dans le but de tenter de faire évoluer les techniques d'observation de la marée en France.

Onze organismes répondirent au questionnaire : les Ports Autonomes de Dunkerque (PAD), du Havre (PAH), de Rouen (PAR), de Nantes–Saint-Nazaire (PANSN), de Bordeaux (PAB), de Marseille (PAM), le Service Maritime (SM), les DDE, le SHOM, Electricité de France (EDF) et le Service Maritime et Hydraulique (SMH). Quarante-vingts observatoires permanents furent recensés en métropole et dans les DOM-TOM contre seulement 16 pour l'enquête menée un an auparavant. La figure 5.6 présente la répartition des appareils entretenus par chaque organisme.

¹ URL : <http://www.cnes.fr/web/810-topex-poseidon.php> (consulté le 5 octobre 2008).

² Simon B. (17/04/1985). Stations marégraphiques françaises. Rapport n°160 EPSHOM/E/O/NP.

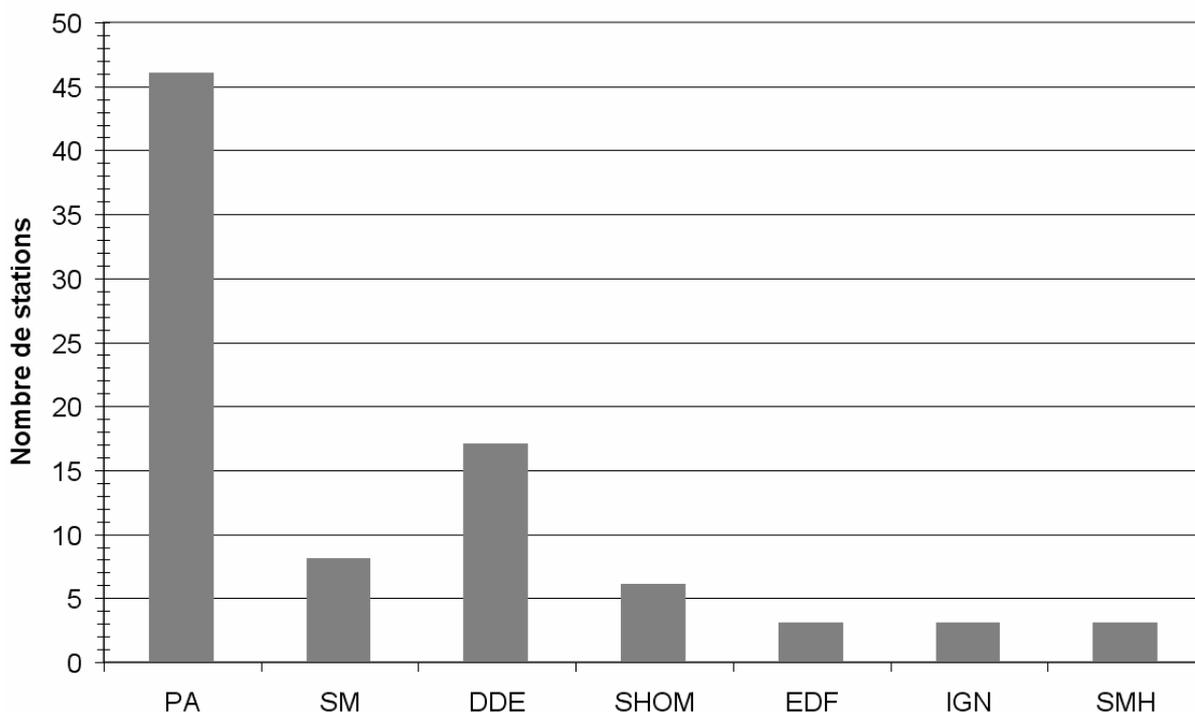


Fig. 5.6 – Répartition des marégraphes en France pour chaque organisme en ayant la gestion.

Les zones portuaires gérées par les PA, rassemblent plus de la moitié des appareils tandis que leur surface géographique le long des côtes de France est minime. Le SHOM n'arrive qu'en quatrième position dans ce classement avec seulement 6 marégraphes alors qu'il faut avoir des observations pour chaque site pour établir des prédictions de marée, l'une des missions régaliennes du SHOM.

En fonction des organismes, les appareils sont généralement installés et entretenus dans un but précis :

- Les Ports Autonomes (PA), de par l'importance économique liée aux échanges commerciaux ont besoin d'observations précises et instantanées en hauteurs sur différentes zones portuaires afin de faire entrer les bateaux de plus hauts tonnages. La concentration des appareils dans ces secteurs s'explique donc tout naturellement ;
- Les DDE, SM et SMH les utilisent pour leurs travaux sur les levés bathymétriques locaux, pour les projets portuaires ainsi que pour diverses études comme la propagation de la marée ;
- EDF pour ses études des surcotes-décotes à l'emplacement des centrales électriques ;
- L'IGN, dans le cadre des nivellements, d'études comparatives sur les niveaux moyens utilise les mesures marégraphiques. La précision en hauteur est importante ici pour leurs études.
- Le SHOM, contrairement à l'IGN attache une grande importance à la précision en temps des mesures pour répondre à sa mission de prédire les marées.

Les besoins des organismes semblent relativement récents comme le prouve la figure 5.7. : Sur les 80 observatoires, seuls deux existaient avant 1949. La plupart des stations apparaissent seulement à partir des années 1970.

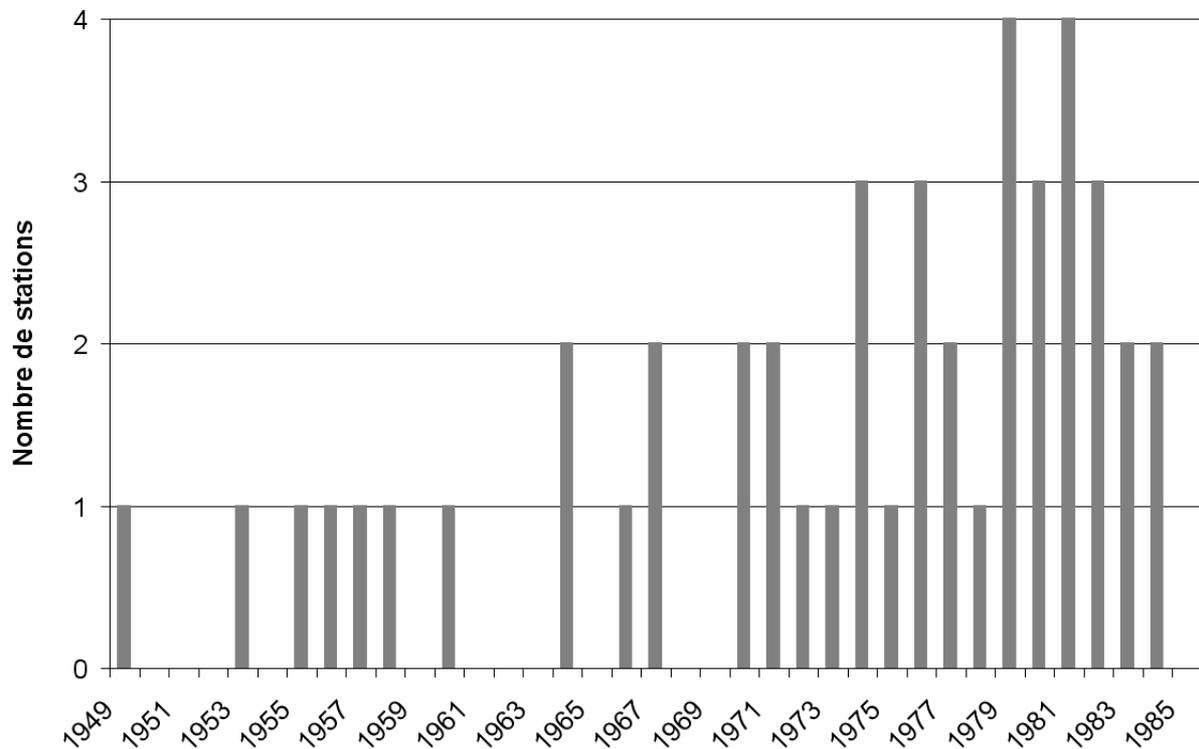


Fig. 5.7 – Année d’installation des 80 marégraphes recensés en France en 1984 (manque l’observatoire de Brest débutant en 1846 et le site de Marseille démarrant en 1885).

Lors de ce recensement, l’ensemble du parc marégraphique français, hormis quelques appareils prototypes utilisés par les PA, utilise la technologie mise en place depuis 150 ans : il s’agit des marégraphes à tambour entraîné par un mouvement d’horlogerie. Ces marégraphes analogiques sont à l’origine de nombreuses années de mesures de bonne qualité réalisées par *"un personnel compétent et dévoué"*.

Simon, dans son rapport, tire les conclusions suivantes de cette enquête :

- Evolution des marégraphes analogiques. Le personnel accepte de moins en moins d’effectuer le travail routinier et fastidieux qu’implique le métier d’observateur des marées (contrôle de l’appareil, dépouillement des courbes de marées...etc). Finalement, les bonnes observations deviennent de plus en plus difficiles à obtenir. (situation identique à Dunedin, Nouvelle-Zélande à la fin des années 1970 (Hannah, 1990). Afin d’économiser des moyens, une nouvelle génération de marégraphes automatiques *"fournissant les hauteurs d’eau précises sur support informatiques"* doivent prendre le relais des appareils *"ancienne génération"*.
- Mutualisation des observations : chaque organisme, pour ses besoins propres, poursuit ses observations. En revanche, en fonction des besoins pour d’autres institutions, la

précision en temps et en hauteur des mesures doit être améliorée. Pour ce faire, l'entretien et les contrôles des appareils doivent suivre un protocole plus rigoureux.

5.4.2.3. Position du SHOM vis-à-vis des programmes marégraphiques internationaux.

Malgré l'enthousiasme mondial pour relancer les observations du niveau marin au travers de programmes comme GLOSS ou Topex-Poséidon (cf. 5.4.2.1), le SHOM adopte une position minimaliste en prenant des engagements minimums¹. Les raisons sont purement économiques : *"Les moyens disponibles du SHOM en personnel sont modestes, et il ne faut pas compter pouvoir accroître dans les années à venir le potentiel humain consacré à la marégraphie"*.

Concernant le programme GLOSS, le SHOM s'engage à communiquer uniquement les d'enregistrements horaires de la station marégraphique de Brest sans être entraîné dans des actions supplémentaires comme la formation de personnel extra-français pour l'installation, la mesure et le traitement des observations marégraphiques.

Le programme Topex-Poséidon implique un double apport du SHOM : Le premier est son soutien, *"dans la mesure de ses moyens, des études qui seront conduites par d'autres sur la détermination du géoïde et d'un modèle de marée océanique"*. Pour les réaliser, des enregistrements et des analyses de marée seront fournis par le SHOM. Le second apport est celui de la compétence du SHOM pour la définition d'un marégraphe pour grands fonds sans pour autant financer ce prototype.

Le SHOM, par manque de moyen, se trouve limité dans les engagements qu'il peut avoir pris dans le cadre de programmes internationaux des années 1980. Pour autant il ne se désengage pas, mais ne peut respecter les recommandations qu'en fonction des moyens mis à sa disposition, comme par exemple, pour une notice sortie en 1988, expliquant les différentes étapes de numérisation de marégrammes avec une table à numériser².

¹ Schrupf, Ingénieur Général de l'Armement, Chef du Bureau "Etablissement Missions", pour l'Ingénieur Général de l'Armement Bourgoin, Directeur du SHOM (17/10/1986). Projets marégraphiques internationaux. Note n°897 SHOM/EM/NP.

² Frachon (20/12/1988. Numérisation de marégrammes sur micro-ordinateur HP 9825 et table à numériser BENSON 6503 (HPIB). N°599 EPSHOM/E/OC/NP.

5.4.3. Naissance du second réseau marégraphique français : RONIM.

Quelques années sont passées depuis l'inventaire exhaustif de 1984 (cf. 5.4.2.2). Dans les conclusions de cette enquête, l'utilisation de marégraphes automatiques semble l'étape indispensable pour s'affranchir des différentes limites liées aux marégraphes analogiques. C'est en 1990 qu'une note décrit les spécifications techniques pour la réalisation et l'installation et des premiers Marégraphes Côtiers Numériques (MCN) ainsi que le système de gestion à distance des appareils¹. Avant de présenter le Réseau d'Observatoires du Niveau des Mers (RONIM) évaluons quels critères ont motivé le SHOM à fonder ce réseau.

5.4.3.1. Eléments déclencheurs.

Malgré un potentiel humain réduit, le SHOM a, entre autres attributions, la responsabilité nationale de la publication des prédictions de marée sur les côtes françaises. Cette fiabilité des prédictions dépend de la qualité, de la durée et de l'âge des mesures². Malheureusement, pour différentes raisons, la fiabilité des observations et donc, de fait, des prédictions est remise en cause :

- la plupart des marégraphes installés dans les ports sont à flotteurs et présentent des inconvénients majeurs liés notamment à leur vieillissement. Ils demandent une surveillance soutenue car les parties mécaniques peuvent se bloquer et une dérive en hauteur et en temps est souvent constatée ;
- le travail de conversion des marégrammes en données numériques représente un travail long et fastidieux, source supplémentaire d'imprécision dans les mesures ;
- en dépit de demandes régulièrement formulées par le SHOM, le Service ne dispose plus d'enregistrements exploitables pour les ports de Dunkerque, Dieppe, Saint-Servan et La Rochelle – La Pallice ;
- depuis une dizaine d'années, les enregistrements des marégraphes de Dunkerque, Calais, Dieppe et Cherbourg comportent fréquemment des lacunes ;
- en certains ports importants, il n'existe pas d'observatoire permanent de marée, c'est le cas notamment sur les côtes de la Manche où la marée présente un fort marnage.

De plus, pour effectuer les levées hydrographiques le long des côtes françaises, le SHOM a déterminé un zéro hydrographique pour chaque port de référence défini par zone de marée. La connaissance de la situation du zéro hydrographique est d'autant plus précise que les mesures sont exactes et suivies sur une longue période. Enfin, lors d'un levé bathymétrique côtier, des mesures de marée doivent être entreprises au port de référence. La Mission Hydrographique

¹ SHOM (11/04/1990). Spécifications techniques pour la réalisation et l'installation de deux marégraphes côtiers numériques et d'un système de gestion à distance des appareils. Fiche n°136 EPSHOM/E/OC/NP.

² Ingénieur des Etudes et Techniques d'Armement Dupuy (25/11/1992). Observations permanentes de la marée en Manche et en Atlantique. Fiche n°1258 EPSHOM/CH/GG/NP.

de l'Atlantique (MHA), en charge des levés bathymétriques n'utilise plus "*depuis plusieurs années*" les observatoires marégraphiques permanents installés aux ports de références en raison de la mauvaise qualité des enregistrements et préfère employer leurs propres appareils. Cette dernière phrase montre l'étendue du délabrement du réseau marégraphique d'alors.

En 1992, un rapport d'étude, rédigé par Dupuy et Batany évalue les performances d'un prototype de MCN à ultra-sons avec un marégraphe analogique à l'observatoire marégraphique de Brest¹. L'évaluation du MCN réalisée en et hors du puits de tranquillisation présente une précision en hauteur meilleure que 1.5cm à 1 écart type pour une dérive de l'horloge inférieure à 3 secondes par mois. En outre, sur deux années, le prototype n'a pas connu la moindre avarie.

Pour toutes ses raisons le SHOM, à partir de 1992, entreprend le remplacement des MCA et installe de nouveaux appareils pour mesurer le niveau marin : les MCN. La fiche de Dupuy en 1992, est pour beaucoup, le document fondateur de RONIM.

¹ Dupuy P.-Y., C. Batany (31/03/1992). Evaluation d'un marégraphe côtier à ultra-sons. Rapport d'étude n°005/92 ; 278/EP SHO/HY/GG/NP.

5.4.3.2. RONIM.

Depuis 1992, le développement de RONIM n'a jamais cessé, passant d'une station la première année à trente observatoires aujourd'hui (tab. 5.6).

Ports	Date d'installation	Organismes partenaires
Le Conquet	11/1992	/
Brest	02/1993	/
Le Havre	08/1993	PA du Havre - Section Dragages - Hydrographie
Cherbourg	03/1994	Marine Nationale (MN) - Direction du Port Cherbourg
Dunkerque	09/1996	PA de Dunkerque
La Rochelle	04/1997	PA de La Rochelle (SM de La Pallice - La Rochelle avant 2007)
Nice	03/1998	DDE Alpes Maritimes
Toulon	03/1998	MN -Travaux Maritimes
Marseille	06/1998	IGN
Calais	10/1998	SM de Boulogne/mer et de Calais
Monaco	04/1999	Direction de l'Environnement, de l'Urbanisme et de la Construction (DEUC) de Monaco
Les Sables d'Olonne	06/1999	Chambre de Commerce et de l'Industrie (CCI) de Vendée - Centre de Marée
Bayonne	06/1999	Conseil Régional (CR) Aquitaine – Service développement et exploitation du port de Bayonne (SM de Bayonne - St Jean-de-Luz avant 2007)
Concarneau	07/1999	Conseil Général (CG) du Finistère (DDE du Finistère - Subdivision de Concarneau avant 2007)
Verdon-Pointe de Grave	04/2000	PA de Bordeaux
Ajaccio- Aspretto	06/2000	Observatoire de côte d'Azur (OCA) - CERGA -GRGS
Arcachon	06/2000	Division littorale de la DDE – Subdivision du bassin d'Arcachon (SM d'Arcachon avant 2007)
Boulogne-sur-Mer	12/2000	SM de Boulogne/mer et de Calais
Le Crouesty	01/2002	Météo France (MF) 56
Saint-Malo	09/2003	DDE d' Ille-et-Vilaine, subdivision de Saint-Malo
Saint-Jean-de-Luz	05/2004	DDE des Pyrénées-Atlantiques
Roscoff	06/2004	CCI de Morlaix
Nouméa	01/2005	Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie et Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
Fort-de-France	10/2005	MF et MN
Pointe-à-Pitre	10/2005	MF et DDE/Phares et balises
Ile Royale	11/2006	DDE Guyane
Saint-Nazaire	01/2007	PA de Nantes Saint-Nazaire
Pointe des Galets	10/2007	DDE de La Réunion et Météo-France
Sète	11/2007	CR Languedoc Roussillon
Port-Vendres	11/2007	DDE du Languedoc Roussillon - CG des Pyrénées Orientales

Tab. 5.6 – Liste des ports faisant partie de RONIM avec leur de la date d'installation et mention de l'organisme partenaire. D'après

URL : http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/maree14.htm. (consulté le 5 octobre 2008).

RONIM est présent le long de toutes les côtes de la métropole mais aussi dans les Départements d’Outre-Mer (DOM) et Collectivités d’Outre-Mer (COM). D’ici 2010, quatre nouveaux ports viendront densifier le réseau existant. Il s’agit du Port-Tudy (Ile de Groix), Dieppe, Diélette/Flamanville et Dzaoudzi (Mayotte).

Comme le tableau 5.6 l’illustre, chaque observatoire est attaché à un organisme partenaire hormis les sites du Conquet et de Brest où le SHOM prend entièrement en charge les deux observatoires. En effet, le fonctionnement de RONIM est singulier¹² : le SHOM équipe les observatoires depuis l’achat, l’installation et la calibration du MCN. En outre, le SHOM fournit à ces partenaires, les données acquises par le MCN, les prédictions de marée. En retour, l’organisme partenaire met à disposition du SHOM le local marégraphique pour l’installation du MCN, et ses services pour contrôler sur demande du SHOM le fonctionnement du MCN. Le contrôle bi-annuel (au moins) par comparaison des hauteurs lues à l’échelle de marée avec celles mesurées par le MCN lors d’une VE à BM, à mi-marée et à PM est aussi assumé par le partenaire. Ces contrôles sont définis et expliqués dans les guides des mesures marégraphiques rédigés par le SHOM³. L’organisme prend également à sa charge les frais relatifs à l’installation d’une ligne électrique et ligne téléphonique pour l’observatoire ainsi que les frais liés à la consommation électrique du MCN et à l’abonnement téléphonique.

Cette étroite collaboration entre le SHOM et des organismes provenant de différents horizons (fig. 5.8) est l’aboutissant direct des conclusions tirées par Simon en 1984⁴ (cf. 5.4.2.2).

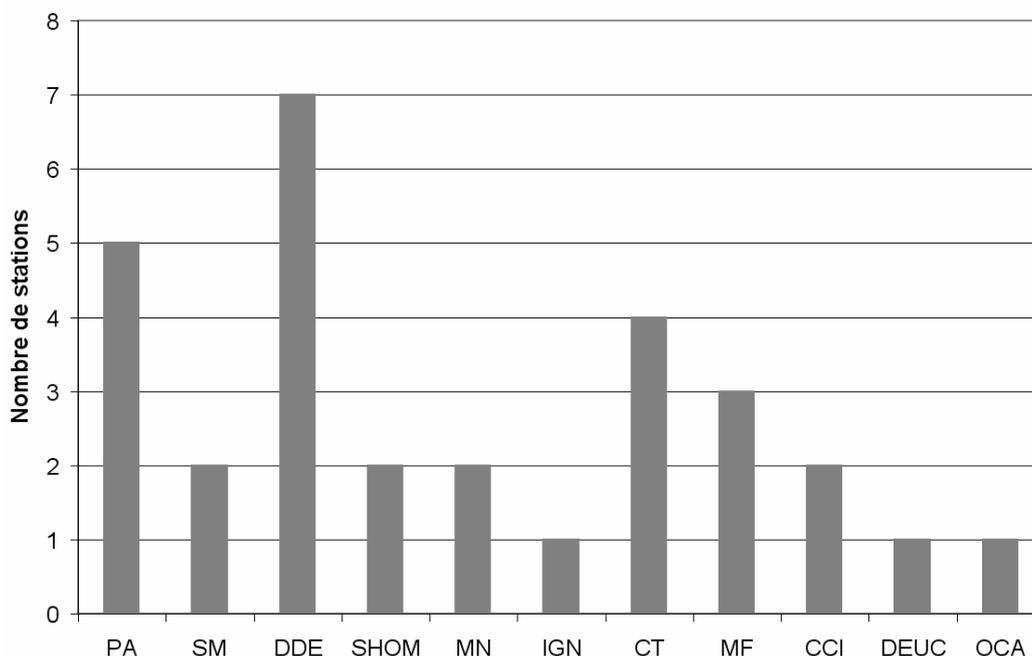


Fig. 5.8. – Répartition des MCN en France pour chaque organisme en ayant la gestion (CT : Collectivités Territoriales).

¹ Ingénieur des Etudes et Techniques d’Armement Dupuy (25/11/1992). Observations permanentes de la marée en Manche et en Atlantique. Fiche n°1258 EPSHOM/CH/GG/NP.

² URL : http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/maree14.htm (consulté le 5 octobre 2008).

³ Creach R. (2007). Mesures marégraphiques. Guide du SHOM, DO/MIP ; v.2.1. URL : <https://agora.shom.fr/docQual/2006/GU/GU2006-041> (consulté le 5 octobre 2008).

URL : http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/getPDF.pdf (consulté le 5 octobre 2008).

⁴ Simon B. (17/04/1985). Stations marégraphiques françaises. Rapport n°160 EPSHOM/E/O/NP.

En comparant les figures 5.6 et 5.8, de nouveaux organismes tels les CT, les CCI et MF apparaissent de manières non négligeables dans la gestion des marégraphes, avec respectivement 4, 3 et 2 stations contre 0 en 1984. Deux événements naturels sont à l'origine cet intérêt nouveau de la part de ces organismes : la double tempête qui a frappé la métropole au mois de décembre 1999 et le tsunami qui a ravagé les côtes bordant l'Océan Indien en 2004.

Pour ce premier événement, le coût financier en France s'élève à environ 100 milliards de Francs [$\approx 15,25$ milliards d'euros]¹. Lors de ces événements, les bords de mer et les ouvrages côtiers ont subi d'importants dégâts et les CT et CCI, d'importants dommages. Dès lors, ces organismes ont cherché à connaître les périodes de retour de tels événements. D'après Simon (2004), la durée d'observation en un lieu pour réaliser une étude statistique des surcotes/décotes ainsi que des niveaux extrêmes (surcotes/décotes) doit être supérieure à dix ans avec des données précises. Rapidement, les CT et CCI comprennent l'intérêt qu'ils tireraient de marégraphes installés dans leur zone de compétence.

Enfin, le second événement a conduit la COI à développer le système d'alerte aux tsunamis pour l'Océan Indien en 2005² puis en l'élargissant rapidement à d'autres bassins : Atlantique Nord-Est et Méditerranée, mer des Caraïbes en s'appuyant sur le modèle du Pacific Tsunami Warning System (PTWS)³ existant déjà pour le bassin Pacifique depuis 1964⁴. Ces systèmes nécessitent l'accès en temps réel aux données. En plus de remplir les conditions dictées par la COI, l'intérêt d'avoir les mesures marégraphiques en temps réel est prépondérant pour la sécurité à l'entrée des chenaux et des ports. Enfin, le programme de PREVIions côtières des MERs (PREVIMER) destiné à donner notamment les prévisions des niveaux de la mer et des surcotes/décotes (écarts par rapport à l'*Annuaire des marées*) appelle naturellement à traiter les observations en temps réel pour en faire état auprès des utilisateurs⁵.

5.5. Bilan de deux cents années d'intimes relations entre la Marine française et la marégraphie.

Aujourd'hui, RONIM bénéficie d'une couverture spatiale jusqu'alors inégalée en France depuis plus de 300 ans. Sur trente sites, les mesures du niveau de la mer sont continues envoyées sous forme numérique directement au SHOM. En effet, la marégraphie, au cours des vingt dernières années, a connu une véritable révolution avec le passage des marégraphes à flotteurs, appareils séculaires, aux marégraphes numériques. Le tableau 5.7 compare

¹ SANSON Gilles, Olivier ROCHEREAU, Bruno RAVAIL (2000). Mission interministérielle sur l'évaluation des dispositifs de secours et d'intervention mise en oeuvre à l'occasion des tempêtes des 26 et 28 décembre 1999. Paris, 130p.

² UNESCO/PRESSE (2005). Avis aux médias N°2005-42.

URL : http://portal.unesco.org/fr/ev.php-URL_ID=27870&URL_DO=DO_PRINTPAGE&URL_SECTION=201.html. (consulté le 5 octobre 2008).

³ URL : <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001508/150882f.pdf>. (consulté le 5 octobre 2008).

⁴ URL : http://portal.unesco.org/fr/ev.php-URL_ID=26861&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html. (consulté le 5 octobre 2008).

⁵ URL : <http://www.previmer.org/>. (consulté le 5 octobre 2008).

différents aspects du premier réseau marégraphique mis en place par Chazallon avec RONIM :

	réseau marégraphique "Chazallon"	RONIM
Date d'installation du premier observatoire	1842	1992
Date d'installation du dernier observatoire	1875	4 sites équipés avant 2010
Nombre maximum d'appareils en fonctionnement	8	30 (actuellement) 34 (en 2010)
Temps utilisé	TSV, TSM, TC, TU	TU
Type de marégraphe	A flotteur	Numérique : Ultra-son & Radar
Format de conservation des mesures	marégrammes registres (extrait des marégrammes) horaires et heures – hauteurs des PM - BM	numériques
Fréquence des contrôles du marégraphe	journalier	2 fois par an
Réglage journalier du marégraphe	OUI (si besoin est)	NON
Nombre des repères de marée (repères fondamentaux)	échelle de marée seule	3 minimums
Partenaires ?	NON	OUI
Observations complémentaires	météorologiques	GPS

Tab. 5.7 – Comparaison entre le réseau marégraphique "Chazallon" et RONIM.

L'utilité des observations marégraphiques est maintenant tout autre par rapport aux années 1850. Aujourd'hui, les observations horaires ne suffisent plus pour étudier les phénomènes à hautes fréquences (surcotes liées aux ondes de tempêtes, tsunamis...etc). De plus, l'obtention des observations en temps réel est devenue pour RONIM un véritable enjeu à remplir pour les prochaines années. Ce passage, le Réseau d'Observation Subantarctique et Antarctique du niveau de la Mer (ROSAME), géré par le CNRS/LEGOS¹ l'a déjà effectué. Ce second réseau français rassemble les observatoires permanents des îles Crozet, Kerguelen, Saint-Paul ainsi que de Dumont-D'Urville en Terre Adélie. Le SHOM est à l'heure actuelle le seul organisme en France à gérer une base d'observations marégraphiques. Décomposé en trois ensembles, la base de données renferme 721 séries d'observations horaires du niveau de la mer, 756 fiches d'observatoires de marée et 5615 jeux de constantes harmoniques². Cette base de données est l'héritage de plus de 160 années d'observations de la part des différents Services Hydrographiques.

Grâce à SONEL, l'ensemble des observations mesurées par les MCN du réseau RONIM et ROSAME sont disponibles à la communauté scientifique via Internet³. Cette facilité

¹ URL : <http://www.legos.obs-mip.fr/fr/observations/rosame/>. (consulté le 5 octobre 2008).

² Communication personnelle de R. Creach, au 04/04/2008. Informations extraites du fichier INVENTAIRE.txt provenant du SHOM.

³ URL : <http://www.sonel.org/> (consulté le 5 octobre 2008).

d'obtention des données, élément indispensable pour toute recherche, simplifie le travail des chercheurs. Aujourd'hui, il est difficile de concilier à la fois la production scientifique avec les activités de base que sont l'observation, la collecte, la numérisation et le contrôle, lesquels représentent un travail de longue haleine. Grâce à ce dur labeur, la détermination des constantes harmoniques n'en est que meilleure, l'étude du niveau moyen plus précis et les recherches statistiques des niveaux extrêmes, meilleures.

Chaque nouveau jour d'enregistrement des mouvements de la mer apporte de nouvelles mesures à l'important jeu de données. Le mouvement des astres, l'eustatisme et les conditions météorologiques contrôlant le niveau de la mer fait de chaque observation une donnée unique, parfaitement non reproductible. Conserver les mesures expérimentales s'impose. Cette préservation systématique est à la base des découvertes de demain. Tout cela amène à s'interroger sur la préservation des données recueillies de nos jours. La recherche de demain se fondera, elle aussi, sur les éléments du passé comme sur ceux d'aujourd'hui sans prévoir quel usage sera fait des données qui de nos jours s'accumulent dans les ordinateurs sans que nous prenions le temps de bien les inventorier, de les associer à leur métadonnées...etc. Les problèmes de notre époque relèvent de leur conservation. La plupart des archives du passé ont été conservées avec soin : données, métadonnées se retrouvent toutes. Des inventaires furent établis permettant d'en retrouver les éléments. Qu'en est-il aujourd'hui ?

Partie II. Outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer à Brest.

Chapitre 6. Présentation de la rade de Brest et inventaire des observations marégraphiques.

"Il seroit à souhaiter qu'on eut fait dans les autres Ports de la France les Observations des Marées avec le même zele qu'on les a faites à Brest et au Port de l'Orient, ce qui contribueroit à éclaircir une matiere si importante à la Physique & si utile à la Navigation.". Cassini II (1720c).

Pourquoi avoir choisi d'étudier les mesures marégraphiques observées à Brest ? C'est avec la réponse à cette interrogation que nous conclurons ce sixième chapitre. Mais avant, cette question servira de fil conducteur aux différents paragraphes de cette section et permettra, au fur et à mesure d'obtenir des éléments de réponse.

Les observations marégraphiques seront exposées et détaillées depuis la localisation des observatoires avec leurs évolutions, l'inventaire du matériel utilisé pour les mesures, la liste du personnel ayant réalisé les observations. L'accent sera mis également sur la présentation des différents jeux de mesures disponibles, c'est-à-dire hauteurs horaires et observations de PM et BM sans oublier de discuter des causes à l'origine des différentes lacunes de données.

Mais tout d'abord, la rade de Brest va être présentée sous les différents angles : géographique, géologique, géomorphologique, bathymétrique, anthropique, hydrologique, hydrodynamique et météorologique. Les facteurs pouvant directement affecter les mesures du niveau de la mer vont faire l'objet d'une étude plus détaillée.

6.1. Portrait de la zone d'étude.

Cet ensemble de paragraphes, dressant le portrait de la rade de Brest s'appuie essentiellement sur les travaux exécutés par Berthois et Auffret (1968, 1969, 1970a et 1970b) complétés par un *Etat des lieux et des milieux de la rade de Brest et de son bassin versant* coordonné par Troadec et Le Goff et publié en 1997.

6.1.1. Cadre géographique.

La rade de Brest (fig. 6.1), zone couvrant au maximum sur 22 km pour 10 km de large, se situe à l'extrémité ouest de la côte atlantique française.



Fig. 6.1 – Carte de la rade de Brest (image satellite, source Google Earth, 2008/CNES/Spot).

Deux bras de mer principaux constituent la rade de Brest. Le premier orienté NE – SW est l'exutoire de l'Elorn tandis que le second, allongé W – E, est composé de nombreuses anses. La rade de Brest communique avec l'Océan Atlantique grâce au goulet de Brest qui lui sert également de limite occidentale. La ville de Brest (cadre rouge sur la figure 6.1) s'étale de part et d'autre d'une petite rivière côtière, la Penfeld, sur la côte nord de la rade de Brest.

6.1.2. Cadre géologique.

D'après Lardeux (1996), le substratum rocheux est constitué de formations paléozoïques (-540 – -250 Ma) au sud de la rade de Brest et de roches métamorphiques plus anciennes au Nord (figure 6.2). Ces roches, les gneiss¹ de Brest, proviennent du métamorphisme de granodiorites² précambriennes (antérieures à -540 Ma).

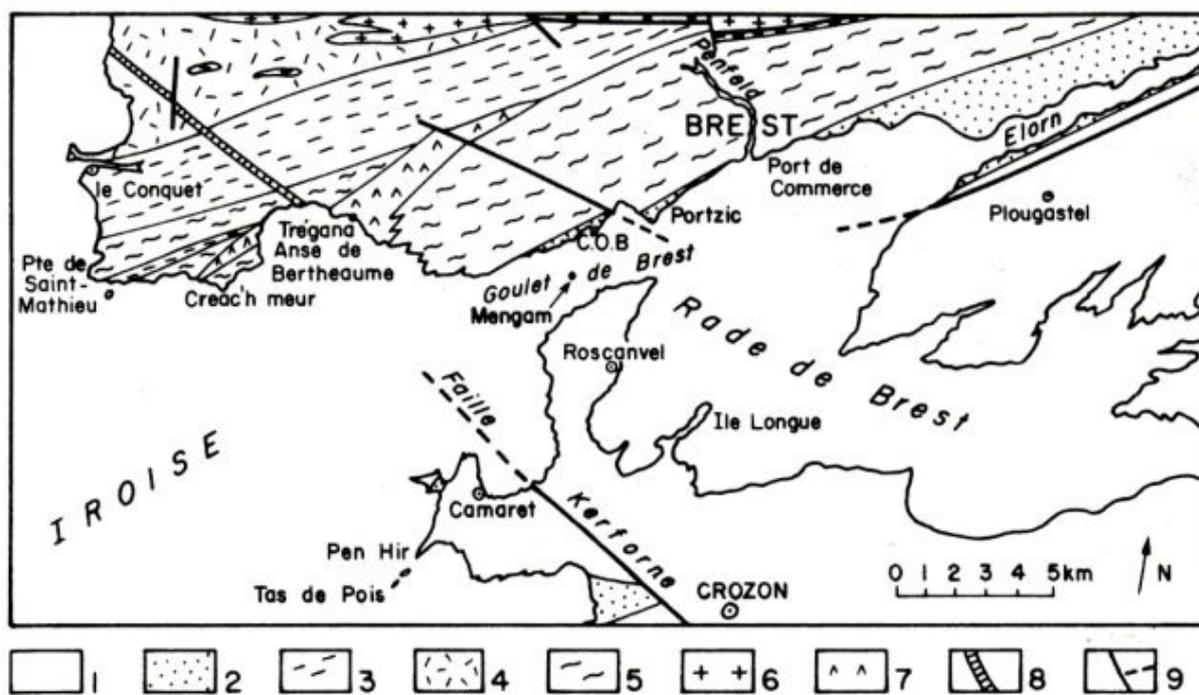


Fig. 6.2 – Carte géologique de la rade de Brest, d'après Lardeux (1996). 1. Paléozoïque ; 2. Quartzophyllades³ de l'Elorn ; 3. Micaschistes du Conquet ; 4. Gneiss de Lesneven (=gneiss de Ploumoguer) ; 5. Gneiss de Brest ; 6. Granite de Saint-Renan-Kersaint ; 7. Trondhjémite⁴ de Trégana ; 8. Dolérite de Breterc'h ; 9. Failles.

¹ Gneiss. Roche du métamorphisme régional composée de lits clairs de quartz et de feldspaths et de couches sombres de minéraux ferromagnésiens (micas, amphiboles).

² Granodiorite. Roche magmatique plutonique grenue proche du granite. Elle est constituée de quartz et de feldspath, mais la granodiorite contient plus de plagioclases que d'orthose par rapport au granite.

³ ancien sédiment métamorphisé.

⁴ roches voisines des granodiorites, mais pratiquement dépourvues de feldspath alcalin.

6.1.3. Cadre géomorphologique.

La rade de Brest est une dépression dégagée par l'érosion fluviale. Ce n'est qu'au début de l'Holocène (-10 000 ans) que la rade de Brest a été progressivement remplie par les eaux marines. Le trait de côte se superpose assez bien avec les grands schémas structuraux hérités des plissements varisques¹ avec toutefois, la ligne de rivage localement influencée par des rejets tectoniques récents. Cette activité se vérifie grâce à l'examen des formations cénozoïque (depuis -65 Ma) de la vallée de l'Elorn qui révèle la présence de failles actives confirmées par les petits séismes régulièrement enregistrés autour de la rade de Brest.

6.1.4. Cadre bathymétrique.

La rade de Brest est un plan d'eau variant entre 150 et 180 km² suivant l'amplitude des marées (Auffret, 1983). Les échanges entre la mer d'Iroise et la rade se réalisent par le goulet de Brest, passage présentant des profondeurs maximales de l'ordre de 50 m et s'étalant sur 6 km de longueur pour une largeur moyenne de 2 km (fig. 6.3)

Le volume du marnage à l'intérieur du bassin atteint, lors des mortes eaux moyennes, 494 millions de m³ d'eau et le double, soit 1037 millions de m³ pendant les vives eaux moyennes (Auffret, 1983).

¹ Varisque : Période d'orogénèse s'étalant entre -416 Ma et -251 Ma.

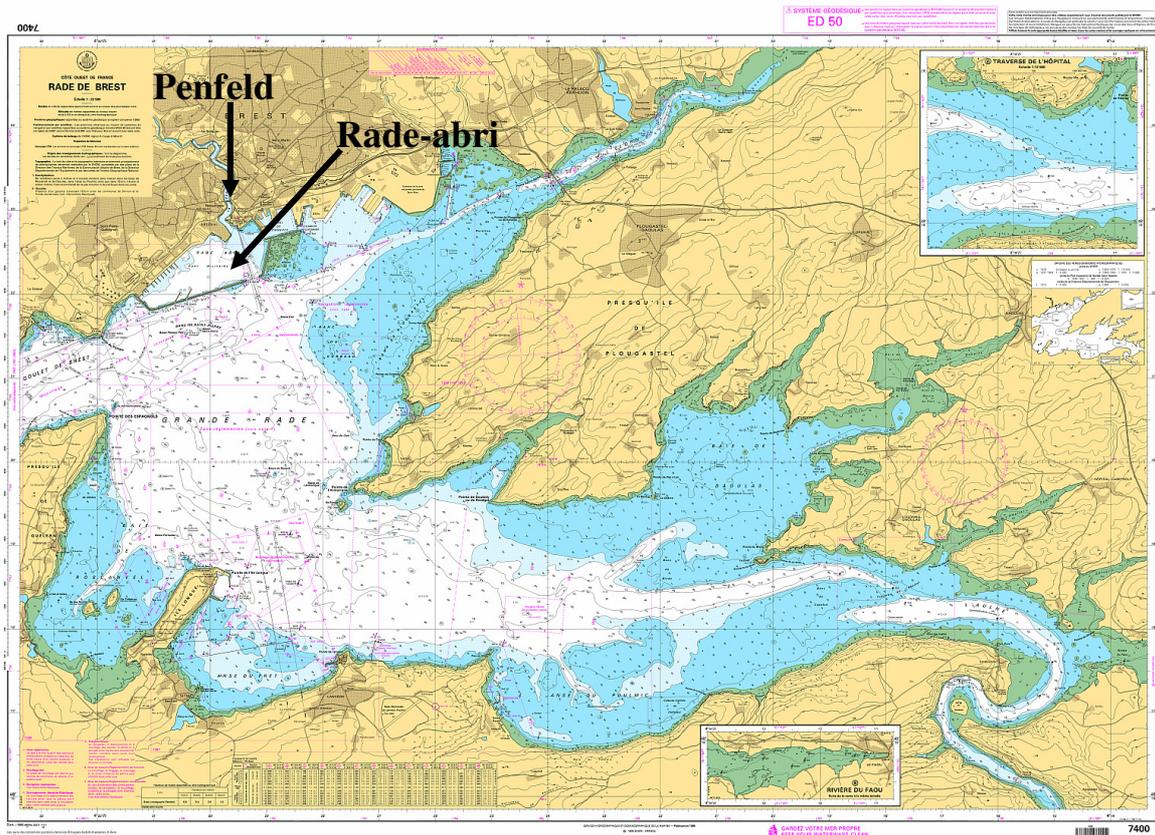


Fig. 6.3 – SHOM. Carte bathymétrique de la rade de Brest (7400), publication 1995 (convention de stage n°U/2004/126). Légende : en vert profondeur inférieure à 0m ; en bleu foncé profondeur comprise entre 0 et 5m ; en bleu clair profondeur comprise entre 5 et 10m ; en blanc profondeur supérieure à 10m.

La figure 6.3 permet de suivre nettement l'ancien réseau fluvial constitué des chenaux sous-marins de l'Aulne et de l'Elorn. Ils présentent des profondeurs respectives d'environ 30 et 15 mètres. Les chenaux se rejoignent au niveau du goulet en formant alors une fosse profonde d'environ 40-50 mètres aux versants abrupts. De la sortie du goulet jusqu'à l'entrée de la rade-abri (cf. 6.1.4), la profondeur varie de -30 à -10 m. La profondeur à l'intérieur de la rade-abri jusqu'à l'entrée de la Penfeld oscille de -5 à -10 m.

6.1.5. Action anthropique.

Pour les besoins de la Marine et des activités portuaires, les rives de la Penfeld ont fait l'objet d'une anthropisation très importante au cours des siècles derniers : de vastes terres-pleins, en avant de l'ancienne falaise creusée par la Penfeld y ont été bâtis. D'après Cloître et Bugat (1991), les travaux démarrent sous le règne de Louis XIII. C'est à cette époque que Richelieu souhaite établir en France une marine protectrice de la flotte commerciale. Brest est choisi comme l'un des ports de guerre principaux. Mais c'est véritablement au 18^{ème} siècle

que l’empreinte de la Marine marque plus que jamais les rives de la Penfeld (losange, fig. 6.4).

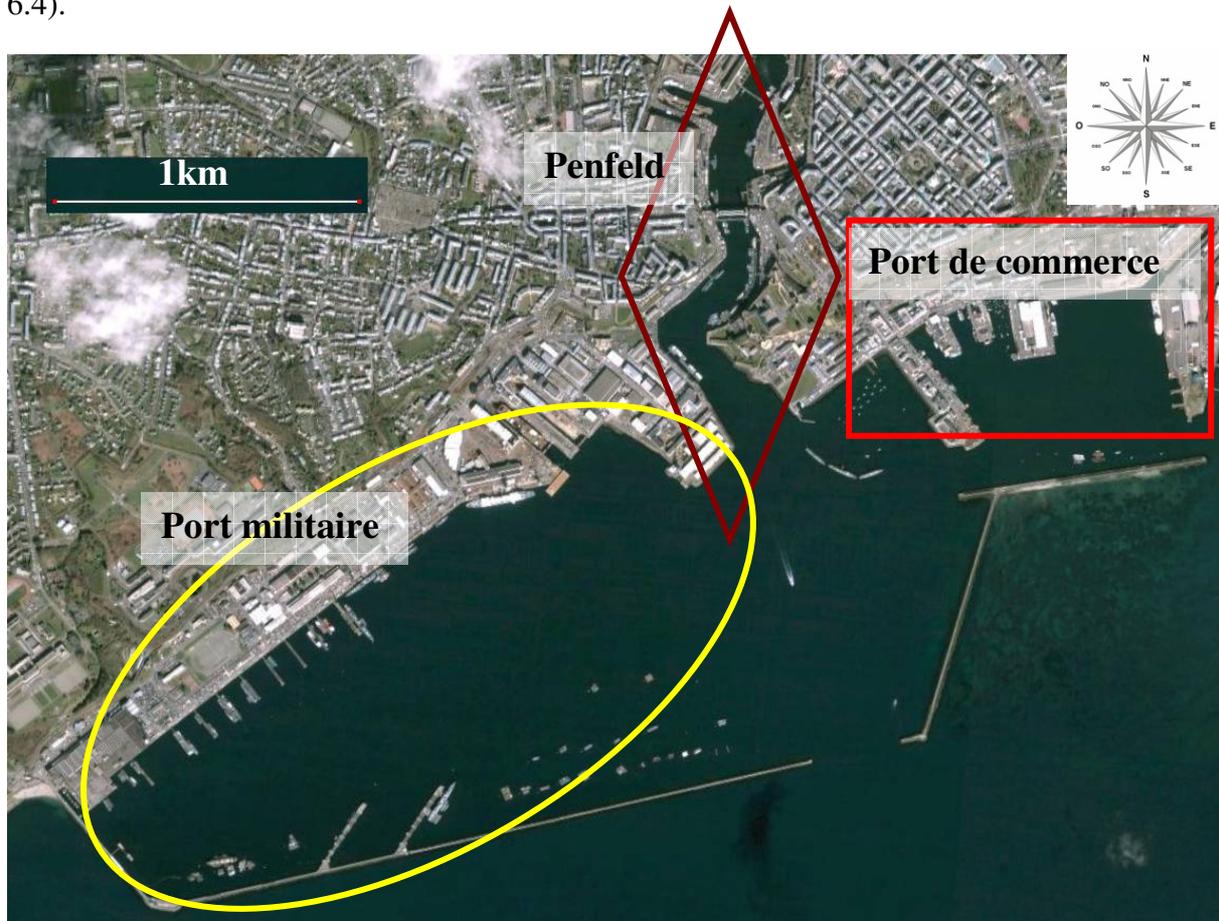


Fig. 6.4. – Constructions anthropiques aux abords de la Penfeld (photographie aérienne, source Google Earth, 18/03/2004).

La deuxième moitié du 19^{ème} siècle voit la modernisation des flottes militaires et marchandes, les rives de la Penfeld deviennent trop réduites pour l’ensemble des activités portuaires. C’est donc durant le Second Empire [1852-1870] que l’établissement du port de commerce est décidé et construit à l’est de la Penfeld, au pied du cours d’Ajoy (rectangle, fig. 6.4). L’anse de Porstrein est comblée entre 1861 et 1889 afin de permettre la création du port de commerce. Déjà en 1866, dans les *Annales des Mines*, il est écrit que : "*Le port Napoléon à Brest [nom du port de commerce donné à l’origine] est une véritable création, comportant l’établissement d’une digue d’abri (fig. 6.5., en violet), de quais à marée, d’un bassin à flot et de voies d’accès qui communiquent d’une part avec la ville de l’autre avec la gare du chemin de fer. [...] Aujourd’hui le port est fermé par les digues ; l’entrée en est bien dessinée ; les bâtiments de commerce ont quitté la Penfeld depuis le 1^{er} octobre dernier.*"

Mais rapidement, la Penfeld devient trop exiguë pour recevoir l’ensemble des bâtiments de la marine de guerre. En 1889, sous la direction de Gustave Zédé¹ [1825-1891], le rivage de Laninon, à l’Ouest de l’embouchure de la Penfeld, fait l’objet d’une totale mutation afin de pouvoir accueillir dans les meilleures conditions, ces nouveaux navires. Les grèves de

¹ Directeur du Génie maritime et des constructions navales à Brest.

Recouvrance et de Saint-Pierre Quilbignon sont comblées pour donner de nouveaux vastes terre-pleins (ovale, fig. 6.4).

Jusqu'alors, les navires arrimés le long de la Penfeld étaient protégés de la houle et des courants de marées (cf. 6.1.7.2 et 6.1.7.3). Or les bâtiments accueillis à l'extérieur de la ria ne sont plus protégés des effets hydrodynamiques néfastes. Pour palier ce souci, des digues sont érigées, parallèles au trait de côte, à quelques centaines de mètres de distance. La figure 6.5 présente les constructions successives des digues et jetées entre 1866 et 1933. Ce suivi provient de différentes sources dépouillées et recoupées entre elles : photographies aériennes¹ de 1919, 1929, 1950 ; carte bathymétrique de la *Rade abri de Brest*² ; cartes routières anciennes ; Archives des travaux Maritimes et du Génie ; journaux d'époque ; documents iconographiques³ ; communications personnelles de Jacques Littoux⁴ ; etc.... Aucune étude similaire antérieure n'a été trouvée.

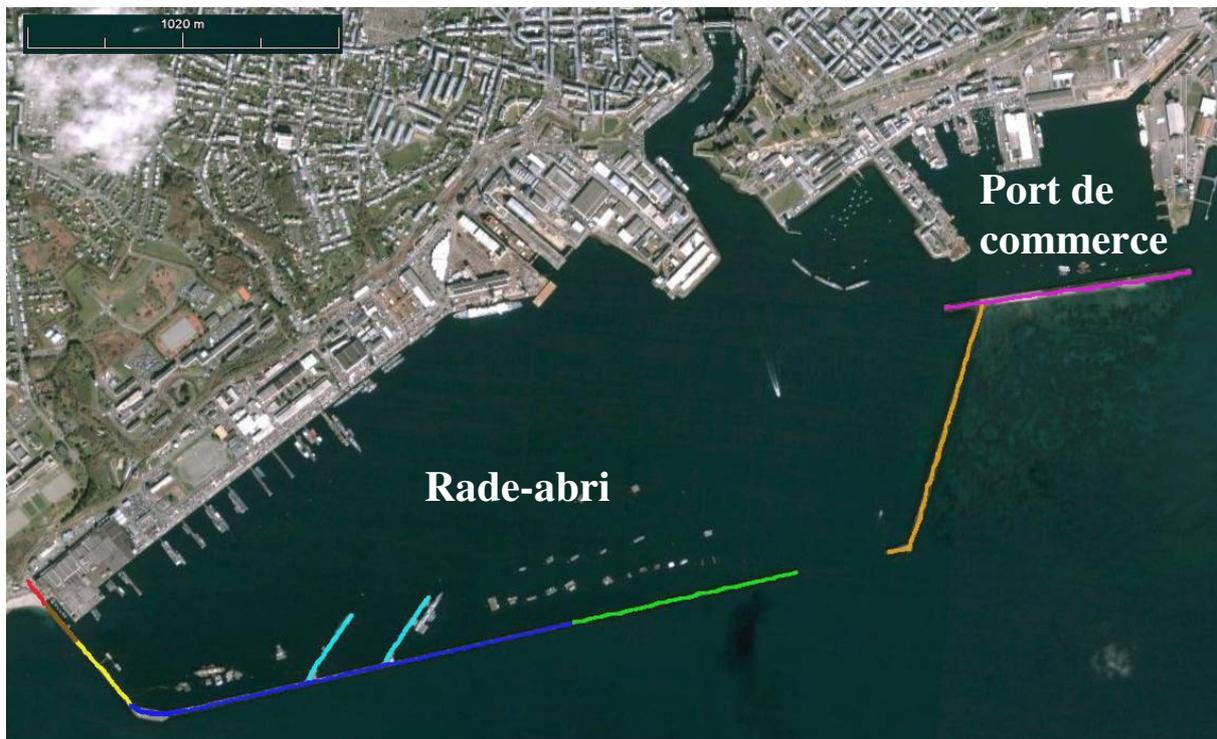


Fig. 6.5 – Chronologie de construction des digues et jetées. En rouge [1839-1848], violet [1864-1889], bleu foncé [1889-1896], marron [1895-1900], vert [1900-1905], orange [avant 1919], jaune [1931-1933], bleu clair [années 1970] (Source Google Earth, 18/03/2004).

La rade-abri, sous-ensemble de la rade de Brest protégeant les bateaux d'une mer parfois difficile, a été réalisée en plusieurs étapes, chacune d'entre elles faisant l'objet d'une construction dont la couleur donnée dans le texte se rapporte aux différentes couleurs sur la figure 6.5 :

¹ URL : <http://www.mairie-brest.fr/archives/photos-aeriennes-anciennes.htm> (consulté le 5 octobre 2008).

² Cot D. (1913). Rade abri de Brest, plan levé en 1911. Service Hydrographique de la Marine, carte n°5481, 1/5000^{ème}.

³ URL : http://archives.mairie-brest.fr/4DCGI/Web_DF/ILUMP31368 (consulté le 5 octobre 2008).

⁴ Chargé de communication à la direction des Travaux Maritimes à Brest.

- Le premier élément de cet ensemble est la partie initiale de la jetée Ouest (en rouge), élément le plus occidental, construit entre 1839 et 1848. Longue de 70 mètres, cette jetée servait à l'origine pour ravitailler en eau douce les navires partant en mer (Dubernad *et al.* 1864).
- Vient ensuite le seul élément ne participant pas directement à la protection de la rade-abri mais à celle du port de commerce. Cette digue (en violet) fait 800 mètres de longueur. Elle se trouve à environ 600 mètres au sud des quais nouvellement construits dans l'anse de Porstrein, comblée entre 1859 et 1864. Cet ouvrage d'art est établi entre 1864 et 1889 (Caspari, 1882 ; Fénoux et Mengin, 1879 ; Dubernad *et al.*, 1864).
- Entre 1889 et 1896 est lancée la construction de la digue Sud (en bleu foncé). Longue de 1500 mètres, elle protège l'intérieur de la rade-abri des vagues et de la houle.
- La jetée Ouest, entre 1895 et 1900 est prolongée de 140 mètres (en marron) afin d'atteindre les 210 mètres de long.
- Puis, c'est au tour de la digue Sud d'être allongée vers l'est de 750m entre 1900 et 1905 (en vert) afin de protéger une plus grande partie de la rade-abri (Renaud, 1900).
- Avant 1919 est construite la digue Est (en orange). S'appuyant sur la digue Sud du port de commerce, cette structure renferme un peu plus la rade-abri.
- La dernière ouverture à l'ouest de la rade-abri, longue de 280 mètres est définitivement fermée entre 1931 et 1933 (en jaune). En effet, restée ouverte pour des raisons évidentes de circulation des navires, cette passe se révélait être le talon d'Achille de la structure lorsque les éléments étaient déchaînés.
- Enfin, beaucoup plus récemment, dans les années 1970, deux épis de porte-avions ont vu le jour (en bleu clair), adossés à la digue Sud primitive (en bleu foncé).

6.1.6. Cadre hydrologique.

Même si l'impact hydrologique ne joue pas un rôle fondamental dans le fonctionnement physique de la rade de Brest, l'un des cours d'eau côtier, la Penfeld, doit être ici étudié dans le détail. En effet, l'ensemble des observations du niveau de la mer à Brest a été réalisé sur le bord de cette ria profonde.

6.1.6.1. Présentation générale.

Comme l'expose Auffret (1983) et comme l'illustre la figure 6.6., le bassin versant de la rade de Brest est drainé par de nombreuses rivières côtières alimentées, pour la majeure partie, des eaux de ruissellement provenant du Finistère central. En effet, l'IGN recense presque 2 000 km de cours d'eau sur l'ensemble du bassin versant de la rade de Brest.

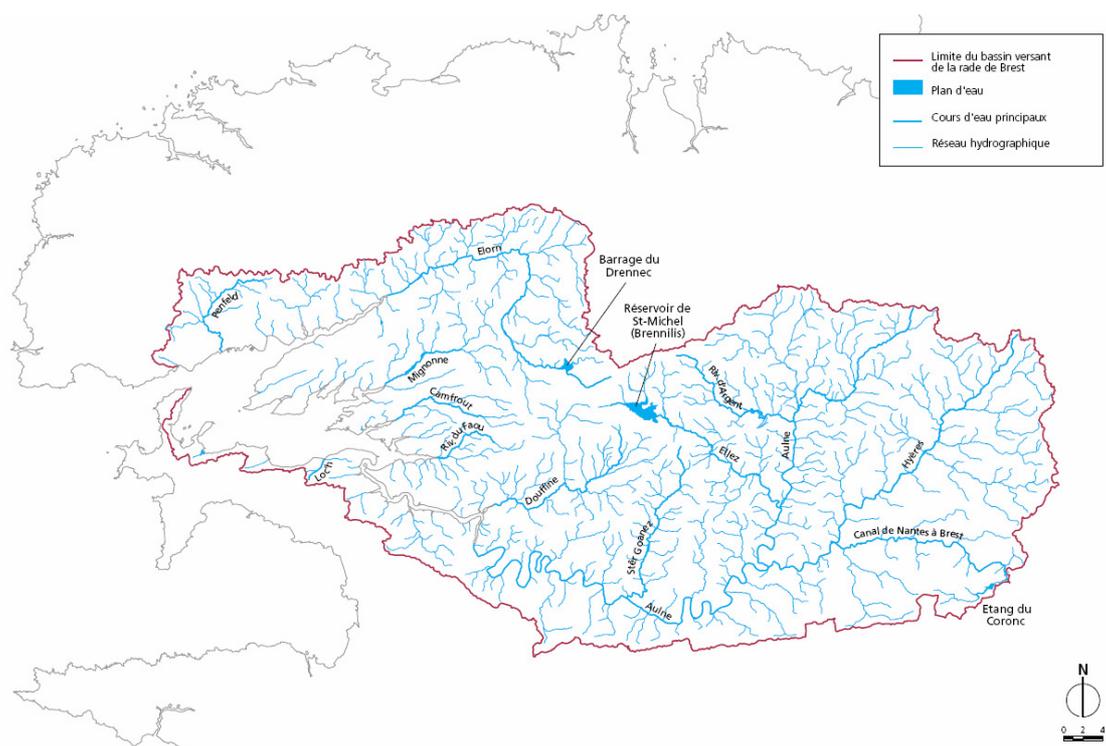


Fig. 6.6. – Hydrographie du bassin versant de la rade de Brest d'après Troadec *et al.* (1997), source IGN.

Un bassin versant est défini par Amoros et Petts (1993) comme *"un espace qui reçoit l'eau des précipitations et alimente les cours d'eau. Limité par une ligne de partage des eaux, le bassin possède un réseau hydrographique qui collecte le ruissellement en provenance des*

versants [...] un cours d'eau est une artère du bassin versant véhiculant de l'eau, des éléments minéraux et de la matière organique vers la mer".

La surface du seul bassin versant de l'Aulne représente les 2/3 de la surface totale cumulée des bassins versants pour un débit moyen annuel de 24 m³/s. Cette dernière valeur normée sur l'ensemble des débits de la rade représente 64,8% des apports totaux (tabl. 6.1). L'Elorn avec une surface du bassin versant égale à 403 km² (soit 14,8% de la surface totale) est le deuxième contributeur en eau douce de la rade de Brest avec un débit moyen annuel normé égal à 15,2% soit 5,65 m³/s. Les autres rivières côtières (Penfeld, Mignonne, Camfrou, Faou, Douffine) draine une surface totale de 504 km² (soit 17,6%) pour un débit total moyen annuel de 7,4 m³/s (19,9%). En tout, c'est une surface totale du bassin versant de 2730 km² qui est drainée pour un débit moyen annuel total de 37,05 m³/s.

Nom du cours d'eau	Longueur (km)	Surface du bassin versant		Débit moyen annuel		Etiage (m ³ /s)		Crue (m ³ /s)	
		(Km ²)	normé (%)	(m ³ /s)	normé (%)	D.C.E. 10	Extrême	D.C.C. 10	Extrême
Penfeld	14	69	2,5	0,60	1,6	0,08	0,03	2,20	4,0
Elorn	44	403	14,8	5,65	15,2	0,86	0,325	22,55	38,8
Mignonne	12	115	4,2	1,90	5,1	0,28	0,10	7,50	13,0
Camfrou	12	69	2,5	1,10	3,0	0,17	0,06	4,50	8,0
Faou	8	55	2,0	0,80	2,1	0,11	0,04	3,00	5,5
Douffine	22	176	6,4	3,00	8,1	0,50	0,25	12,00	30,8
Aulne	114	1842	67,5	24,00	64,8	1,3	0,65	118,00	163,0

Tab. 6.1 – Débit des fleuves tributaires de la Rade de Brest d'après Auffret (1983), Berthois et Auffret (1970b). Le Débit Caractéristique de Crue (D.C.C.) 10 équivaut à la dixième valeur annuelle prise dans la liste des débits moyens journaliers classés par ordre décroissant. Le Débit Caractéristique d'Etiage (D.C.E.) 10 équivaut à la dixième valeur annuelle prise dans la liste des débits moyens journaliers classés par ordre croissant.

Une limite sur le tableau 6.1 est néanmoins indispensable à apporter : dans l'étude de Berthois et Auffret (1970b) ainsi que dans la thèse d'Auffret (1983) il n'est nullement mentionné, ni la durée ni la période, utilisées pour calculer le débit moyen annuel, le Débit Caractéristique de Crue (D.C.C.) et le Débit Caractéristique d'Etiage (D.C.E.) des différents cours d'eau.

6.1.6.2. Détails sur la Penfeld.

Intéressons-nous à la Penfeld, courte rivière côtière (14 km) trouvant son exutoire à l'intérieur de la rade-abri. Située au Nord du bassin versant de la rade de Brest, (fig. 6.6.), elle n'est alimentée qu'avec de très courts affluents car la ligne de partage des eaux est très proche de son lit principal. Elle contribue à hauteur de 1,6% au débit moyen annuel total reçu par la rade de Brest (tab. 6.1.). Un rapport réalisé par Merceron *et al.* (1978) rassemble d'autres informations sur les débits de la Penfeld, provenant du Schéma d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer réalisé en 1974 par la DDE Finistère. Les mesures sont rassemblées dans le tableau 6.2. :

	Superficie du bassin versant (km ²)	D.C.C. 10 de 1974 (m ³ /s)	Débit moyen sur la période 1970-1975 (m ³ /s)	D.C.E. 10 de 1975 (m ³ /s)
Penfeld	69	5,24	1,18	0,28

Tab. 6.2. – Débits de la Penfeld rapportés dans Merceron *et al.* (1978).

De très nombreuses pluies caractérisent l'année 1974 qui logiquement a été choisie pour définir le D.C.C. A l'inverse, l'année 1975 a été choisie pour déterminer le D.C.E. en raison de la sécheresse assez prononcée. Le débit moyen de la Penfeld pour la période 1970-1975 est, d'après Merceron *et al.*, égal à 1,18 m³/s contre 0,6 m³/s pour Auffret (1983) soit 2 fois plus. Les D.C.C.10 donnés par Merceron (5,24 m³/s) et Auffret (2,2 m³/s) varient du simple au double. Néanmoins la différence est réduite si l'on compare le premier débit avec le débit de crue extrême du tableau 6.1. (4 m³/s). En revanche, la différence entre le D.C.E.10 donné par Merceron (0,28 m³/s) et ceux apportés par Auffret, 0,08 m³/s et 0,03 m³/s (respectivement le D.C.E.10 et le débit d'étiage extrême) présentent des différences entre 4 et 10 fois moins importantes.

La Penfeld revêt une importance toute particulière dans l'étude des observations marégraphiques à Brest. En effet, c'est le long de la Penfeld (cf. 6.2.2.2) que les hauteurs sont mesurées. La Penfeld, profonde ria creusée dans le gneiss, débouche dans la rade de Brest devant le château. Jusqu'à 300 mètres en amont de son exutoire, la largeur d'une rive à l'autre de la rivière côtière est estimée entre 120 et 150m. C'est dans cet aire que les observations marégraphiques à Brest sont ou ont été réalisées. Il serait intéressant, pour évaluer précisément les effets de la Penfeld (débit et apport d'eau douce) sur les mesures du niveau de la mer, de développer un modèle hydrodynamique de la zone.

Même si les volumes d'eau douce apportés par la Penfeld sont négligeables par rapport aux quantités d'eau marine, il n'est pas possible de dire aujourd'hui, faute d'observations, si les NMM sont affectées par d'éventuelles différences de densité comme à Liverpool par exemple (Woodworth et Proudman, 2003). Pour y répondre, des mesures en continu de salinité à l'intérieur et à l'extérieur du puits (afin de vérifier s'il n'y a pas une stagnation d'une eau plus dense à l'intérieur du puits) permettront de quantifier directement les effets de densité de la Penfeld sur les hauteurs d'eau mesurées.

Néanmoins, il semble peu probable que la Penfeld, avec ses débits, puisse affecter le NMM calculé à partir des observations horaires mesurées le long de son lit.

6.1.7. Cadre hydrodynamique et météorologique.

6.1.7.1. Marée.

La marée dans la rade de Brest, et plus largement le long de l'Atlantique européen, est de type semi-diurne : deux PM et deux BM se succèdent par jour. Le marnage moyen est d'environ 4,5m. La représentation des ondes de marée à Brest, classées en espèces (diurnes, semi-diurnes, tiers-diurnes, etc....), confirme la domination des ondes semi-diurnes (figure 6.7). Ce spectre a été obtenu par analyse spectrale (cf. 1.3.2.1), calculée sur la période 2001-2007 avec le logiciel MAS (cf. 1.3.2.2). En tout, 182 constantes ont été déterminées. Les amplitudes des composantes sont indiquées en ordonnées tandis que des groupes se répartissent en abscisse suivant leur fréquence, ici exprimé en cycles par jour.

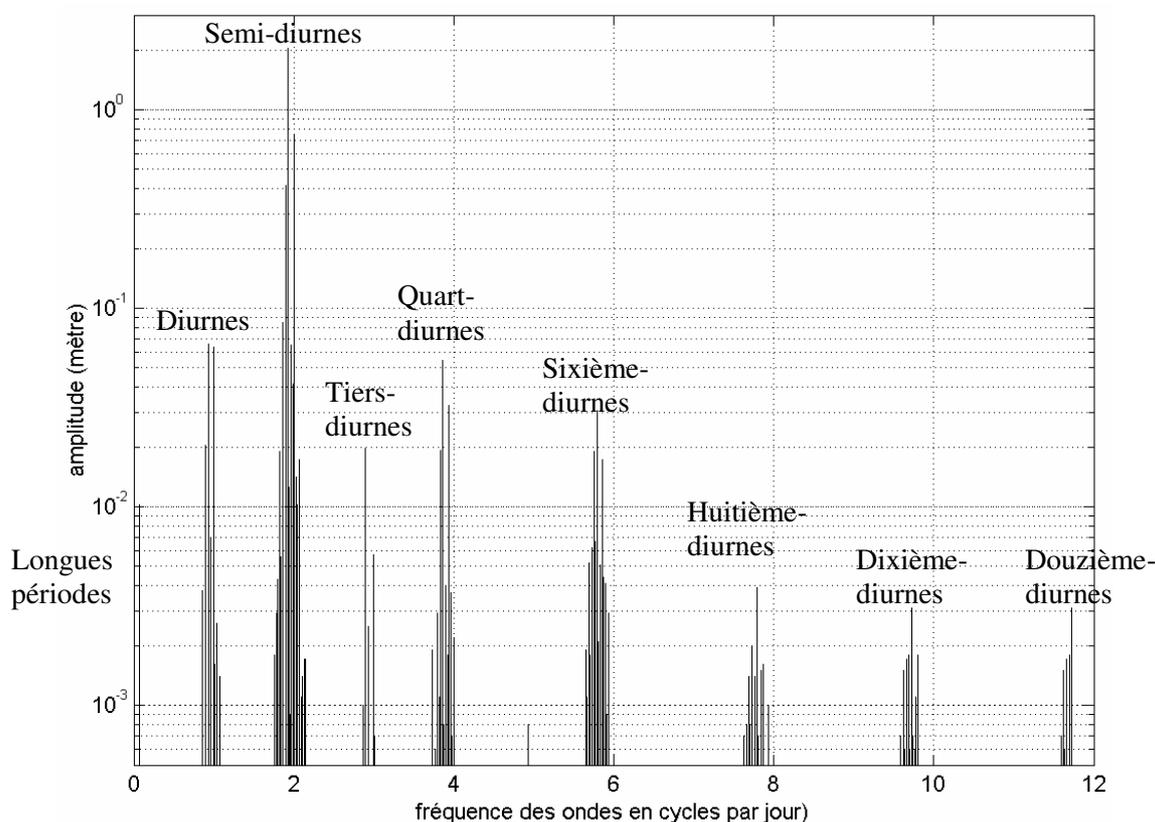


Fig. 6.7 – Spectre de marée à Brest calculé sur la période 2001 – 2007 avec MAS.

Le second groupe d'ondes le plus important en terme d'amplitude est constitué par les ondes diurnes suivies de près par les ondes quart-diurnes. Viennent ensuite les sixième-diurnes, puis tiers-diurnes et enfin, dans une moindre mesure, les huitième, dixième et douzième diurnes.

Le tableau 6.3 présente dans le détail, l'apport des 7 principaux constituants de la marée à Brest :

Onde	Diurnes		Semi-diurnes				Quart-diurnes
	O ₁	K ₁	N ₂	M ₂	S ₂	K ₂	M ₄
Amplitude (m)	0,0659	0,0641	0,4162	2,0472	0,7488	0,2135	0,0544
Amplitude des 7 ondes normée (%)	1,8	1,8	11,5	56,7	20,7	5,9	1,5

Tab. 6.3 – Amplitude d'ondes principales de marée observées à Brest.

Comme indiqué précédemment, l'amplitude des ondes semi-diurnes est largement majoritaire à Brest (89% des amplitudes présentées dans le tableau précédent). Les amplitudes des ondes diurnes et quart-diurnes sont tant qu'à elles nettement inférieures au groupe des semi-diurnes. La conséquence est double : d'une part, les hauteurs des PM et BM observées de 0 heure à midi et de midi à minuit sont peu différentes d'un jour sur l'autre. Deuxièmement, l'amplitude de l'onde M₄ interagit très faiblement dans le phénomène de l'asymétrie tidale décrit par Speer et Aubrey (1985).

6.1.7.2. Courants.

En raison d'un marnage moyen de l'ordre de 4,5m et du passage étroit mettant en relation la rade avec la mer d'Iroise, les courants de marée sont relativement violents. D'après Troadec *et al.* (1997), les courants de marée dépassent les 7,4km/h (4 nœuds) dans le goulet et 3,7km/h (2 nœuds) au centre de la rade.

6.1.7.3. Houles et vagues.

En 1983, Auffret écrivait que, paradoxalement, peu de mesures sur les caractéristiques de la houle en rade Brest existaient. Heureusement, aujourd'hui cette lacune est comblée. Les eaux de la rade sont relativement bien protégées des houles venant de l'océan. La pénétration des grandes houles du large de secteur Ouest transite nécessairement par le goulet de Brest (SOGREAH, 2003). Or, l'augmentation brutale de la bathymétrie dans cette zone (fig. 6.3) accroît la surface mouillée entraînant par voie de conséquence une forte diffraction qui dissipe l'énergie. Cet affaiblissement est plus prononcé au sud de la rade qu'au nord grâce à la pointe de la presqu'île du Crozon s'étirant vers le nord. C'est pourquoi, des digues et jetées ont été construites pour protéger la rade-abri et le port de commerce à Brest (6.1.5).

En revanche, la partie nord de la rade est peu soumise à l'action des vagues formées en rade contrairement aux anses situées au sud. D'après SOGREAH (2003), ces vagues sont caractérisées par de faibles longueurs d'ondes et une direction variable.

Une bouée, propriété de Brest Métropole Océane (BMO), installée au "port du château de Brest" (latitude : 48°22,618'N ; longitude : 4°29,304'W), mesure la houle depuis le mois de décembre 2004. Le Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) gère ce site de mesures en les traitant et les archivant (Hamm et Goasguen, 2004) dans la base du Centre d'Archivage National de Données de Houles In Situ (CANDHIS)¹. Cette bouée se trouve à proximité de l'actuel observatoire marégraphique. En effet, à vol d'oiseau, la distance entre la bouée et l'observatoire est d'environ 820m (fig. 6.8).

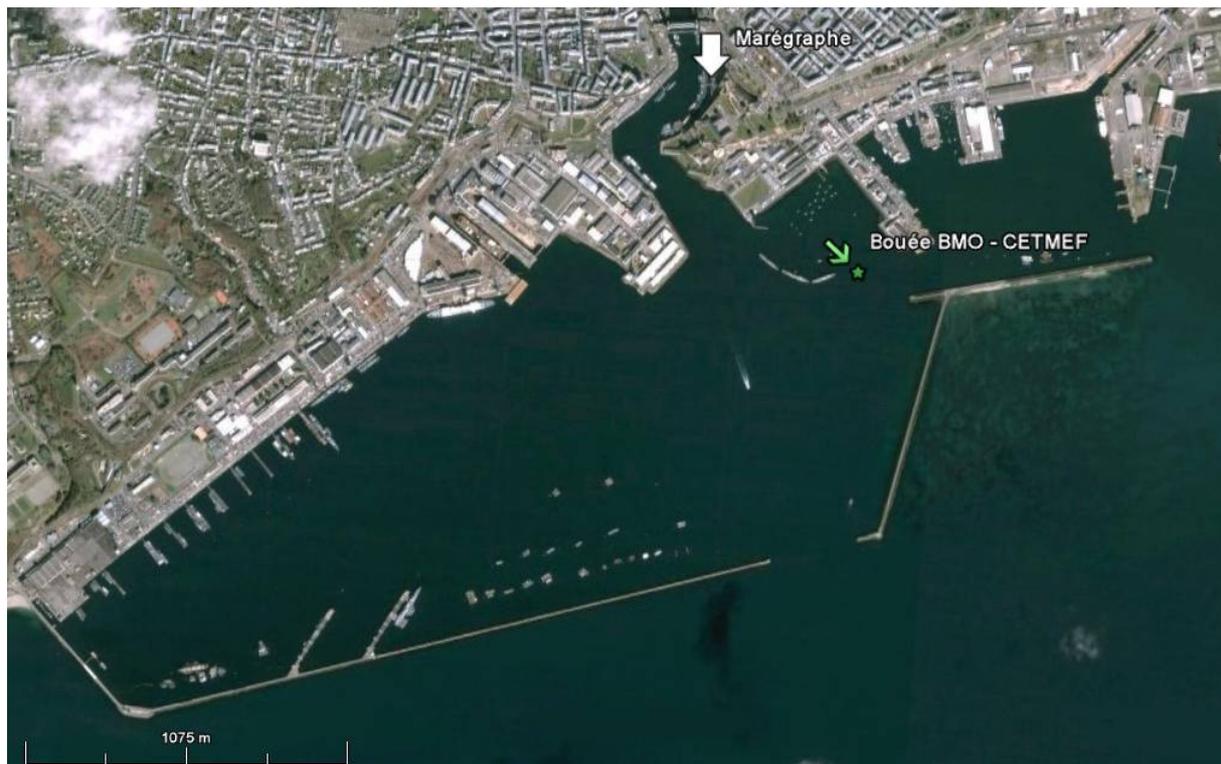


Fig. 6.8 – Localisation de la bouée CMO-CETMEF dans la rade de Brest par rapport au marégraphe (Source Google Earth, 18/03/2004).

Les hauteurs significatives et périodes significatives (respectivement H_s et T_s) sont obtenues par échantillonnage de l'ensemble des vagues mesurées sur une durée de 20 à 30 minutes (communication personnelle de Gérard GOASGUEN, ingénieur des Travaux Publics de l'Etat (T.P.E.), CETMEF). La figure 6.9 présente les H_s et T_s horaires et mensuelles :

¹ URL : <http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/donnees/candhis/> (consulté le 5 octobre 2008).

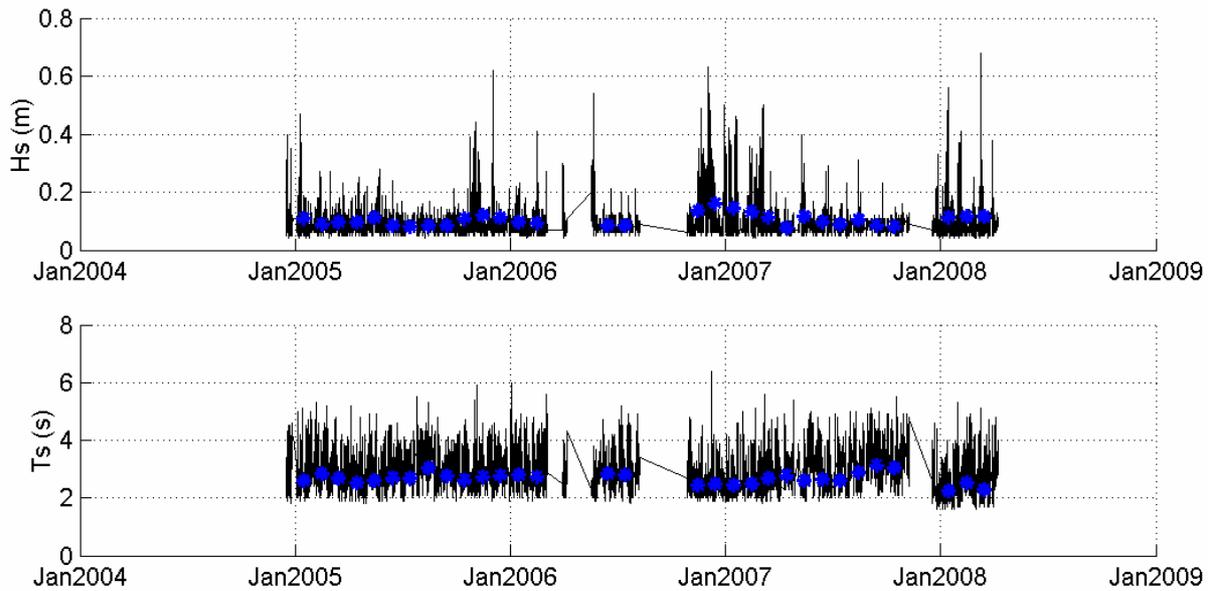


Fig. 6.9 – Hauteurs significatives (Hs) et Période significative (Ts) mesurées avec la bouée installée au port du château de Brest. Mesures horaires (en noir) et moyennes mensuelles (en bleu). Mesures brutes fournies par le BMO et le CETMEF.

Pour les Hs, la dispersion des valeurs n'est pas très importante, entre 0,04 et 0,68m (tab. 6.4). La moyenne des Hs, sur l'ensemble des données disponibles s'élève à $0,11 \pm 0,05$ m. Les Ts varient de 1,60 à 6,40 secondes, la période moyenne étant égale à $2,59 \pm 0,40$ s.

	min	max	moyenne	médiane
Hs (m)	0,04	0,68	$0,11 \pm 0,05$	0,09
Ts (s)	1,60	6,40	$2,59 \pm 0,40$	2,40

Tab. 6.4 – Moyenne des hauteurs significatives et périodes significatives pour l'été et l'hiver.

Les distributions des Hs (fig 6.10.a) et des Ts (fig. 6.10.b) ne suivent pas la loi gaussienne. Les valeurs médianes sont égales à 0,09m pour la Hs et 2,40s pour la Ts.

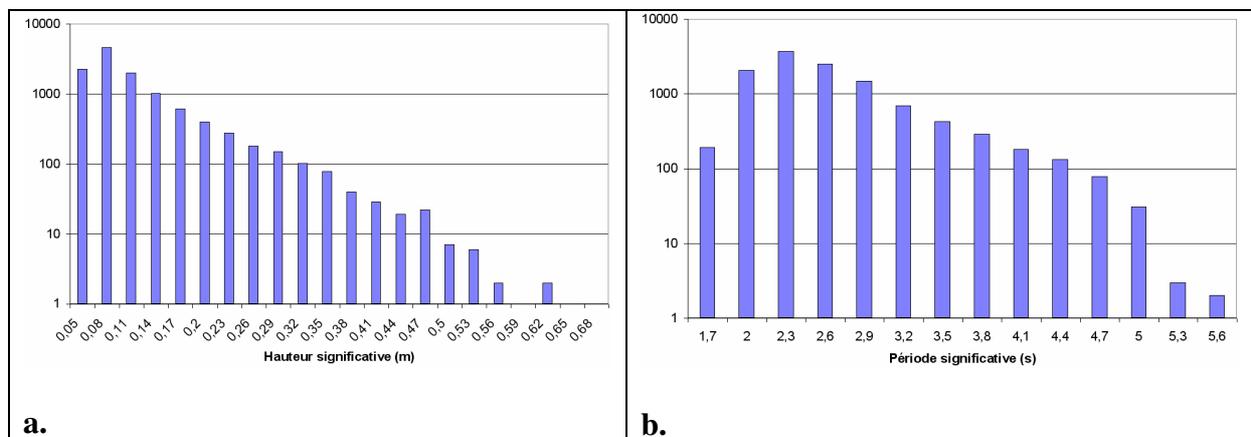


Fig. 6.10 – Distribution des hauteurs significatives (a) et périodes significatives (b) pour l'ensemble des observations. Echelle logarithmique pour l'axe des ordonnées.

Avec seulement 3 années de mesures, l'identification d'éventuelles fluctuations saisonnières de la houle est délicate (fig. 6.9). Le calcul des moyennes de Hs et Ts pour la période estivale (avril-octobre) et hivernale (novembre-mars) n'illustre pas de différences aux écarts types près (tableau 6.5).

	Été (avril – octobre)	Hiver (novembre – mars)
Hs (m)	0,09 ± 0,01	0,11 ± 0,01
Ts (s)	2,97 ± 0,17	2,61 ± 0,16

Tab. 6.5 – Moyenne des hauteurs significatives et périodes significatives pour l'été et l'hiver.

6.2. Synthèse des données.

Les mesures de marégraphie disponibles pour Brest sont à la fois multiples et denses. Obtenues à partir d'appareils différents, elles sont le fruit de multiples programmes d'observations. Les plus anciennes remontent à la fin du 17^{ème} siècle (cf. 2.3). Deux grands types de données existent : les hauteurs horaires et les valeurs (temps et hauteurs) de PM et BM. Les deux ensembles sont détaillés distinctement suivant leurs caractéristiques, puis ensemble.

6.2.1. Hauteurs horaires.

6.2.1.1. Présentation générale.

Les observations horaires sont traditionnellement obtenues grâce aux enregistrements de marégraphes. Comme vu précédemment (cf. 5.3.3.1), le premier MCM fonctionne à Brest depuis 1846, remplacé en février 2003 par un MCN (cf. 5.4.3.2). Pour autant, il ne s'agit pas des plus anciennes observations horaires. En effet, les premières datent de 1816. Elles étaient alors collectées dans un but unique : réaliser des cartes bathymétriques précises (cf. 5.2.1). Le tableau 6.6, fait la synthèse de tous les jeux de mesures disponibles :

Période d'observation	Appareil	Support des valeurs	Mesures inédites
01/05/1816 - 31/10/1816	Echelle de marée	R	X
18/09/1817 - 31/10/1817		R	X
15/05/1818 - 30/05/1818		R	X
04/01/1846 - 30/05/1857	MCM	R	X
23/11/1859 - 20/01/1860		R	X
01/05/1860 - 31/12/1914		R	
01/01/1915 - 31/12/1915		M	X
01/01/1916 - 31/07/1937		R	
01/08/1937 - 01/11/1937		R	X
01/01/1939 - 01/05/1944		R	
22/06/1949 - 05/11/1952		M	X
29/09/1952 - 31/12/1952		R	X
01/01/1953 - /02/1977		M	
/02/1977 - 31/12/1992		M	
Depuis le 05/02/1993	MCN	N	

Tab. 6.6 – Synthèse des observations horaires de marégraphie à Brest (R : Registre ; M : Marégramme ; N : Numérique).

L'apport de nos recherches s'est avéré fructueux comme l'atteste la colonne des mesures inédites du tableau précédent. Ces jeux de mesures viennent compléter et prolonger la série marégraphique de Brest. Les supports sur lesquelles se trouvent les mesures sont triples : registres, marégrammes et support numérique pour les dernières observations.

L'une des missions régaliennes du SHOM est la prédiction des marées (cf. 1.1.3.1 ; 5.4.2.1 ; 5.4.3.1). Ces dernières années, l'exigence de la précision des prédictions a entraîné l'abandon de la méthode de Laplace-Chazallon au profit de la méthode harmonique, universellement utilisée pour le calcul de l'annuaire des marées (cf. 5.3.2.4). Afin de préparer au mieux cette "révolution", une importante campagne de numérisation fut lancée pour les futurs besoins. Une grande partie des registres contenant des hauteurs horaires fut numérisée. D'après J. Grall, actuel bibliothécaire du SHOM ayant participé à cette campagne, la digitalisation était effectuée par deux personnes : la première lisait les hauteurs pendant que la seconde les tapait à l'aide d'un clavier qui perforait des cartes. Cartwright (1972) fait état de cette numérisation sur des cartes perforées par le SHOM et explique qu'après cette première étape, les données étaient éditées et compilées sur bandes magnétiques dans la "Geotape", la bibliothèque de données géophysique à l'Institut de géophysique et physique planétaire à La Jolla, Californie. Lorsque Cartwright écrivit son article, les périodes 1864-1884, 1898-1914 et 1916-1936 étaient disponibles sous format numérique.

Etrangement, le fichier numérique des hauteurs horaires de Brest disponible au SHOM ne débutait qu'en 1860. Or, l'installation du marégraphe est antérieure de 14 ans. Les marégrammes pour la période 1846-1860 ont disparu, mais ce n'est pas le cas des relevés de hauteurs de la mer enregistrés sur des cahiers. En effet, jusqu'en 1944, l'observateur des marées, avait dans ses nombreuses attributions, en plus de vérifier et contrôler la bonne marche de l'appareil, l'extraction des hauteurs tous les quarts d'heure à partir des

marégrammes (cf. 5.3.4.3). Pour la période comprise entre 1952 et 1992, il n'existe que des marégrammes, convertis numériquement grâce à une table à numériser (communication personnelle de F. Lucas). Les archives du SHOM conservent ce précieux travail, sous la forme de registres. Lors de la digitalisation, j'ai suivi les conseils de B. Simon en numérisant uniquement les hauteurs pour chaque heure ronde sans prendre en compte les autres valeurs extraites des courbes.

Au cours de mes recherches dans ce centre d'archives, j'ai réussi à compléter les années 1860, 1937 et 1952 à l'aide d'autres registres suivant le même protocole. Seule l'année 1915 provient de marégrammes (tableau 6.6). Ils ont été numérisés à l'aide de la table à numériser. J. Laurent et F. Lucas, personnels du SHOM ont réalisé ce travail sur ma demande, appuyée par B. Simon en 2007. Les marégrammes originaux, trop grands (90cm sur 290cm) pour la table à numériser, ont été réduits de moitié à partir de clichés pris par le photographe du SHOM.

Année	N° des jours	nombre d'observations inédites	% de nouvelles observations par an	% d'observations total par an
1846	j4 → j365	8688	99.2	99.2
1847	j1 → j365	8280	94.5	94.5
1848	j21 → j366	8784	100	100
1849	j1 → j365	8760	100	100
1850	j1 → j365	8760	100	100
1851	j1 → j365	8760	100	100
1852	j1 → j 20 j39 → 366	8352	95.1	95.1
1853	j1 → j365	8760	100	100
1854	j1 → j365	8760	100	100
1855	j1 → j365	8760	100	100
1856	j1 → j366	8784	100	100
1857	j1 → j150	3600	41.1	41.1
1859	j328 → j365	912	10.4	10.4
1860	j1 → j19	456	5.2	72.1
1915	j1 → j365	8747	99.9	99.9
1937	j214 → j304	2185	24.9	83.3
1952	j273 → j366	2155	24.5	24.5

Tab. 6.7 – Détail sur les nouvelles séries de hauteurs horaires disponibles.

D'après le tableau 6.7, les années 1846 à 1857 sont quasiment complètes du 4 janvier 1846 au 30 mai 1857 (sauf du 1^{er} au 20 janvier 1847 et du 20 janvier au 08 février 1852) comme l'indique la deuxième colonne du tableau n°1. L'année 1915 est également complète mis à part quelques heures durant deux jours : le premier janvier et le 31 décembre. D'après les colonnes n°4 et n°5, pour 1859 et 1952, les hauteurs découvertes sont les seules connues

jusqu'à présent. Pour les autres années (1860, 1937) les données existantes sont complétées par d'autres valeurs.

Les hauteurs du niveau marin pour les années 1949 à 1952, numérisées également par J. Laurent et F. Lucas en 2006, ne sont pas insérées dans le tableau précédent mais détaillées dans le tableau 6.11 Les fiches de contrôle du marégraphe n'ont pas été trouvées (existent-elles ?) et de nombreuses anomalies entachent les valeurs, sans compter les nombreuses lacunes (cf. 6.2.1.4). Finalement, à cause des problèmes récurrents de décalage en temps (corrigeables) mais surtout des sauts en hauteur dans les mesures, les 4 années ne seront pas exploitées par la suite.

L'annexe B rassemble pour chaque année, le pourcentage d'observations horaires disponibles sous format numérique. Ce fichier des hauteurs horaires, enrichi des dernières données nouvellement numérisées, est disponible sur le SONEL¹ (Pouvreau *et al.*, 2006).

¹ URL : <http://www.sonel.org/> (consulté le 5 octobre 2008).

6.2.1.2. Détail sur les marégraphes utilisés.

Les mesures des années 1816 et 1817 sont obtenues en lisant directement les hauteurs sur une échelle de marée. Il n'existe aujourd'hui aucun document permettant de connaître explicitement quels marégraphes sont utilisés à Brest depuis 1846. La connaissance des appareils utilisés doit également être associée aux réductions en temps et en hauteurs appliquées sur les enregistrements. En effet, pour apprécier au mieux la qualité des observations et ainsi déterminer leur précision il est important de connaître ces facteurs de réduction en temps et en hauteur du niveau de la mer. L'inventaire suivant s'appuie sur deux types de sources principales : pour les mesures antérieures à 1960, les moyens indirects sont exploités, comme l'étude des courbes de marée sur les marégrammes et plus particulièrement les facteurs de réduction en temps et en hauteur ; pour les données postérieures, les fiches de contrôle des marées ont été utilisées. L'ensemble des documents référencés sont rassemblés dans deux tableaux : Le premier couvre l'ère mécanique des marégraphes (tab. 6.8.), le second, l'ère numérique (tab. 6.9).

Période	Appareil	Marégrammes réductions en		Références
		hauteurs (cm)	Temps (mm/h)	
04/01/1846 - 01/05/1944	Marégraphe "Chazallon" fabriqué par Wagner Neveu.	1/10	60	[1] [2] [3] [20]
26/08/1949 - 30/04/1967	<i>FUESS 10518</i>	1/20	24	[5] [6] [7] [8]
01/10/1951 - ??/05/1979	OTT 3068 Modèle 10030	1/25	32	[5] [6] [7] [8] [9] [11] [27]
30/04/1967 - Au moins jusqu'au 30/04/1973	OTT R20 à bande perforée	?	?	[8] [9] [27]
Entre le 31/12/1960 et le 01/01/1973 - Au moins jusqu'au 31/12/1975	<i>OTT R16</i>	1/50	16	[10] [11] [21]
14/02/1977 – 01/12/1992 en réparation entre temps 21/12/1992 – 22/05/2003	OTT Kempten 20030	1/25	24	[12] [13] [14] [24] [25]
Au moins ??/??/1990 - ??/??/????	SUBER SLS23 n°322	?	?	[22]
01/03/1990 - 31/12/1992	OT 310 n°413	?	?	[13] [22]

Tab. 6.8. – Inventaire des MCM utilisés à Brest.

Les noms des appareils en gras sont ceux dont les mesures enregistrées sur les marégrammes ont été extraites et numérisées. Les noms en italique correspondent aux marégraphes utilisés lors de pannes de l'appareil principal. Malheureusement il semble que ces derniers étaient beaucoup surveillés et entretenus que les MCM principaux (communication personnelle Michel Le Goff). La meilleure précision revient aux marégrammes enregistrés avec le marégraphe de Chazallon. En effet, les hauteurs sont réduites au dixième (l'amplitude de 1m de la marée correspond à une amplitude de 10cm sur le marégramme) tandis qu'une heure d'observation s'étirait sur 6cm. En revanche, l'OTT R16 utilisé entre 1960 et 1975 comme marégraphe secondaire présente les taux de réduction les plus importants : 2cm sur le marégramme correspond à une amplitude de 1m de la marée pour 16mm correspondant à 1h00 d'enregistrement. La figure 6.11 montre certains appareils en fonctionnement :

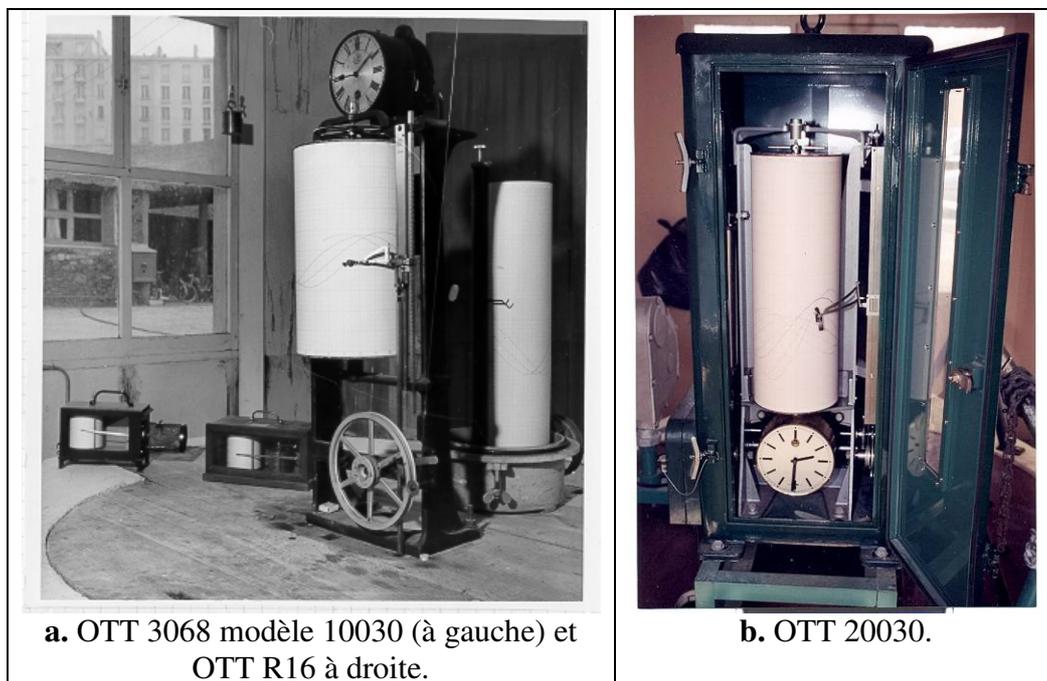


Fig. 6.11 – Principaux MCM utilisés entre 1949 et 1992. Source : SHOM.

De la même manière que pour les MCM, la liste détaillée des MCN installés à Brest depuis 1989 renseigne sur les périodes d'observations, les appareils utilisés, la précision des mesures, et un élément nouveau : le type de centrale d'acquisition (tab. 6.9).

Période	Capteur	Centrale d'acquisition	Précision	Références
??/??/1989 - 30/10/1991	MCN [Prototype Télémètre à ultrason NIVUS de Ben]	SLS 28 [+ centrale archivages SLS 20-MAG de Suber]	?	[23]
05/02/1993 - ?	MCN n°634 [Télémètre à ultrason NIVUS type 01.41]	HT 200	Inf à 5 cm (problèmes liés à la température)	[13]
Au moins depuis le 10/10/1994 - Au moins jusqu'au 05/02/1996	MCN n°779 [Télémètre à Ultrason]	HT 200	Inf à 5 cm (problèmes liés à la température)	[13]
05/02/1993 - Au moins jusqu'au 30/05/1997	MCN n°890 [Télémètre à Ultrason MORS]	HT 200	Inf à 5 cm (problèmes liés à la température)	[15] [16]
Au moins depuis le 29/03/2002 - 17/02/2004	MCN n°1076 [Télémètre à ultrason IEE type NUS30]	HT 200	Inf à 5 cm (problèmes liés à la température)	[17] [18] [26]
17/04/2003 - 17/02/2004	MCN ,°??? [Télémètre radar marque Krohne type BM 70]	Marelda	Inf à 1 cm	[25]
Installé le : 17/04/2003. Appareil de référence depuis le : 17/02/2004 -	MCN ,°??? [Télémètre radar marque Krohne type BM 100]	Marelda	Inf à 1 cm	[17] [18] [19] [25]

Tab. 6.9 – Inventaire des MCN utilisés à Brest.

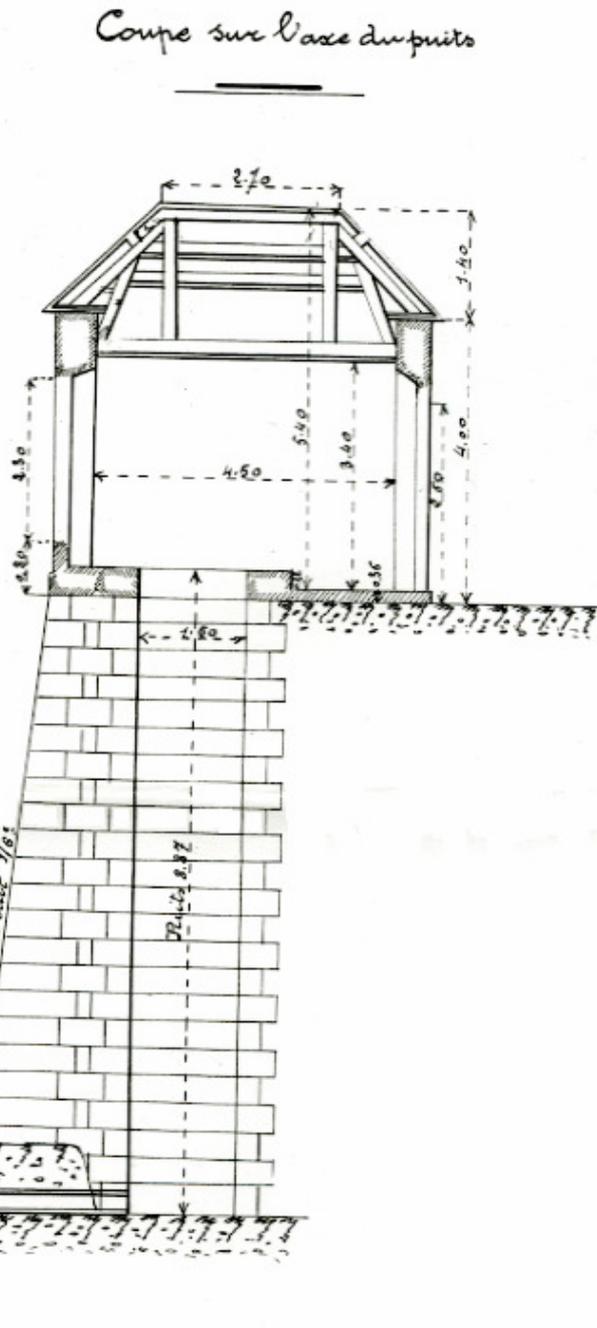
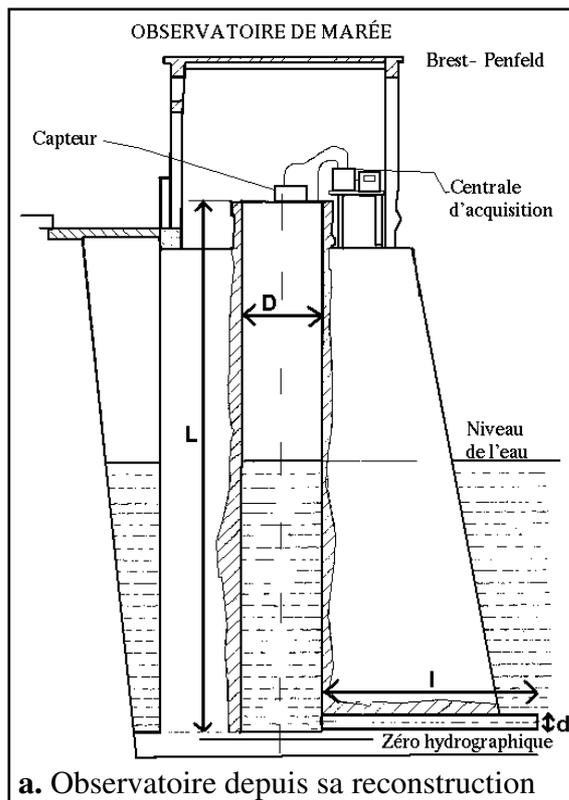
Un fait surprenant est à souligner : il est impossible de savoir, pour la période comprise entre 1993 et 2004 quel(s) MCN a (ont) été utilisé(s) pour compléter la série d'observations horaires de Brest. Il n'y a par contre aucune ambiguïté concernant avec les centrales d'acquisitions utilisées suivant les périodes. Le capteur à ultrason, premier système de mesure moderne, présente un problème non négligeable lié au gradient de température à l'intérieur du puits de tranquillisation. Les erreurs sont d'autant plus importantes que la distance capteur – niveau d'eau est grande (Martin Miguez *et al.*, 2008, Devauchelle, 2002). Ce problème semble résolu avec l'utilisation d'un capteur radar indépendant de la température de l'air traversé (tableau 1.3).

La liste des références ci-après n'est applicable que pour les tableaux 6.8 et 6.9 :

- [1] Rollet de l'Isle (1905). Observation, étude et prédiction des marées. Service Hydrographique de la Marine, n°13-155. 287p + XIX planches.
- [2] Anonyme (1959). Inventaire des archives de la section marées et géophysique 1819 à 1955.
- [3] Anonyme (1900-1944). Marégrammes de Brest. [Marégrammes n°160 à 201, archives EPSHOM].
- [4] Anonyme (1944). Cahiers annuels en fascicule bimensuels de la marée. [Paquet n°49 archives EPSHOM].
- [5] Anonyme (1955). Bulletin d'information. Comité Central d'Océanographie et d'étude des cotes, 7^{ème} année n°2, février 1955.
- [6] Anonyme (1949-1952). Marégrammes de Brest. [Marégrammes, carton n°20, archives EPSHOM].
- [7] Anonyme (1960). Fiche d'observation des marées n°1 du 31/12/1960. [Fiche marée observatoire de Brest, EPSHOM].
- [8] Anonyme (1967). Fiche d'observation des marées n°2 du 30/04/1967. [Fiche marée observatoire de Brest, EPSHOM].
- [9] Anonyme (1971). Mission hydrographique des cotes de France. N°66 M.H.C.F. du 31/03/1971
- [10] Anonyme (1975). Fiche d'observation des marées n°3 du 16/12/1975. [Fiche marée observatoire de Brest, EPSHOM].
- [11] Anonyme (1975). Fiches Contrôles de la marche du marégraphe de Brest. Janvier à septembre 1975.
- [12] Anonyme (1977). Fiche d'observation des marées n°4 du 14/02/1977. [Fiche marée observatoire de Brest, EPSHOM].
- [13] Anonyme (1994). Fiche d'observation des marées. N° EPSHOM : 962. Le 14/03/1994.
- [14] F. Lucas (2003). Feuilles de contrôle de marégraphe Brest Penfeld mai 2003.
- [15] Anonyme (1994). Fiche d'observation des marées. N° EPSHOM : 1249. Le 30/06/1997.
- [16] Anonyme (1997). Gloss Station Information Sheet. Brest, 20/11/1997.
- [17] Le Roy (2003). Mail informatif du 14/04/2003 pour préparer les tests de Van de Castele à Brest le 17/04/2003.
- [18] Le Roy (2004). Constitution de l'observatoire de marée permanent de Brest. Note du 17/02/2004.
- [19] S. Calmant, R. Leroy, L. Testut, G. Wöppelmann (2005). GLOSS. French contribution up to February 2005. URL : http://www.pol.ac.uk/psmsl/reports.national+regional/france_ge9.pdf (consulté le 5 octobre 2008).
- [20] Belleville (1861). Inspection des marégraphes. Marégraphe de Brest 1er mai 1861.
- [21] Anonyme (1975). Contrôle de la marche du marégraphe. Mois de décembre 1975.
- [22] Guevel (1990). Note SHOM sur la Recette d'un marégraphe SUBER OT 310.
- [23] Dupuy Pierre-Yves, Christian Batany (1992). Evaluation d'un marégraphe côtier à ultra-sons. Rapport d'étude n°005/92, EPSHOM.
- [24] Simon Bernard (1985). Stations marégraphiques françaises. Rapport d'étude n°007/85, EPSHOM.
- [25] Le Roy Ronan (2006). Evaluations des performances des télémètres radars pour la mesure des hauteurs d'eau. Rapport d'étude n°001/06, EPSHOM.
- [26] Devauchelle Olivier (2002). Mesure du gradient de température dans le puits du marégraphe de Penfeld (Brest). Rapport d'étude n°005/02, EPSHOM.
- [27] Anonyme (1973). Feuille de contrôle du marégraphe Brest Penfeld avril 1973 [carton 11 Archives SHOM].

6.2.1.3. Les puits de tranquillisation et leur effet sur les mesures.

En plus de connaître la suite des appareils s'étant succédés à Brest, toutes les précisions concernant les diamètres et les longueurs du puits de tranquillisation et de l'orifice de communication entre le puits et la mer sont autant d'informations critiques pour déterminer leurs effets sur le calcul du niveau moyen de la mer comme nous allons le voir par la suite de ce paragraphe (cf. 2.1 et 5.3.4). La figure 6.12 présente les plans des deux observatoires marégraphiques et précise les cotes qui seront utilisées par la suite :



b. Observatoire entre 1846 et 1944

Fig. 6.12. – Schéma de l'Observatoire de Brest. Sources : a : Archives du SHOM, cote D818 ; b : modifié, d'après le SHOM. URL : http://www.shom.fr/fr_act_oceano/img/brest.gif (consulté le 5 octobre 2008).

Les deux observatoires présentent la même physionomie : un abri protégeant le puits de tranquillisation communiquant avec l'extérieur grâce à un conduit. Le tableau 6.10 fournit les mesures spécifiques pour les deux constructions :

Période	Concernant le puits (cm)		Concernant l'orifice de communication (cm)		Références
	diamètre (D)	longueur (L)	diamètre (d)	longueur (l)	
1846 - 1944	150	887	30	100	[1] [2]
1949 - 1952	?	?	?	?	
1952 -	150	880	15	400	[3]

Tab. 6.10 – Inventaire des caractéristiques du puits de tranquillisation et de l'orifice de communication.

[1] Chazallon (1843). Lettre de Chazallon au Ministre de la Marine, l'amiral de Mackau. Lettre datée du 15 décembre 1843.

[2] Anonyme (1897). Plan de l'observatoire du niveau de la mer à Brest.

[3] Simon Bernard (1985). Stations marégraphiques françaises. Rapport d'étude n°007/85, EPSHOM.

Ce tableau montre l'évolution de l'observatoire notamment au niveau de l'orifice de communication. Cette modification est à relier avec la destruction de l'observatoire en 1944 et sa reconstruction quelques années plus tard (cf. 6.2.1.4). Dans son ouvrage, Simon (2007) détaille les réponses propres au puits de tranquillisation :

Avec les deux configurations d'avant et après reconstruction, l'influence des caractéristiques du conduit sur le déphasage de la réponse du puits est acceptable dans le cas d'une onde sinusoïdale semi-diurne d'amplitude maximum égale à 5m. En effet pour les deux observatoires, ce déphasage est proche de 0 seconde, or, d'après Simon (2007), un déphasage inférieur à 30 secondes est considéré comme "négligeable".

La capacité à atténuer les hautes fréquences est différente entre les deux types de configuration (fig. 6.13a et 6.13b). Le niveau moyen peut-être affecté en présence de houle. Par exemple, pour une houle ayant une amplitude de 0,4m pour une période de 12 secondes, la variation du niveau moyen dans le puits par rapport au même niveau moyen à l'extérieur atteint -0,4cm avec le système de filtrage moderne contre +0,6cm avec le puits de tranquillisation pensé par Chazallon.

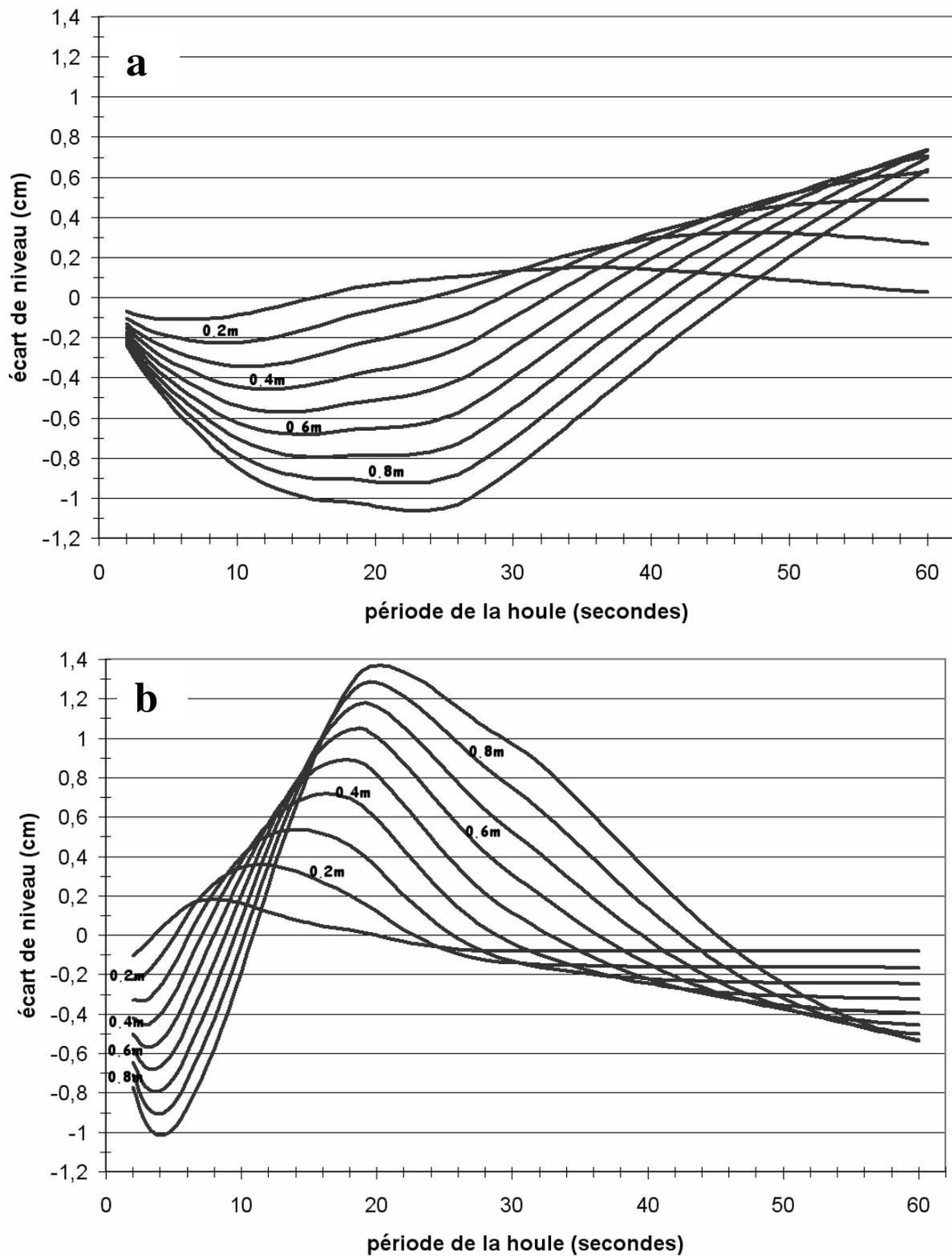


Fig. 6.13. – Effet de la houle sur le niveau moyen à l’intérieur du puits de tranquillisation. a. construit après la seconde guerre mondiale à Brest (d’après la figure C.6B de Simon (2007)) ; b. construit sous l’ère Chazallon et fonctionnant jusqu’en 1944. Chaque courbe représente, pour une amplitude de houle déterminée, la variation du niveau moyen (en cm) dans le puits en fonction de la période du signal externe.

Relions maintenant les effets du filtrage des deux puits sur le niveau moyen avec les caractéristiques moyennes de la houle. Ces valeurs moyennes obtenues avec le houlographe installé à proximité du marégraphe sont égales à 0,11m pour Hs et 2,59s pour Ts (cf. 6.1.7.3). Cela équivaut à un écart du niveau moyen instantané de la mer de -0,075cm pour le premier observatoire et -0,080cm pour le second. En considérant les Hs et Ts moyennes de la houle, la différence de configuration des deux puits de tranquillisation n'affecte pas les niveaux moyens de la mer. Cet écart moyen entre le NMM mesuré à l'extérieur et le NMM observé à l'intérieur du puits est inférieur à 1mm. A la vue des imprécisions de mesures lues sur des échelles de marée et sur la précision des MCN : inférieur à 5cm pour l'ultrason et inférieur au centimètre pour le radar, cette correction minimale ne sera pas appliquée par la suite.

Douglas, en 1992 a comparé les moyennes annuelles pour Brest et Newlyn, distantes de 200km. Les écarts entre les moyennes des deux stations diffèrent de 20mm avant et après la reconstruction de l'observatoire à Brest. Cet écart de 2cm peut-il être expliqué avec la différence de filtrage entre les puits et être à l'origine de cette erreur systématique ? En considérant cette fois les distributions des Hs et des Ts les plus importantes, variant respectivement de 0,05 à 0,15m et de 2,0 à 2,9, l'écart de niveau varie cette fois de -0,05 à -0,23 cm avant guerre et de -0,07 à -0,14 cm après guerre. Le filtrage des puits n'explique pas l'écart de 2cm.

6.2.1.4. Eléments de réponses sur les lacunes d'observation.

L'examen de l'annexe B montre qu'il existe encore des lacunes d'observations dans la série marégraphique de Brest malgré des ajouts (cf. 6.2.1.1). Un certain nombre de lacunes subsistent dans les observations, de 3 jours à 5 ans. Afin de comprendre l'origine de ces lacunes d'observations depuis 1846, une synthèse exhaustive est donnée dans le tableau 6.11 :

n° de la lacune	Premier jour manquant			Dernier jour manquant			Somme des jours manquants	Raison de la lacune
	Année	Mois	Jour	Année	Mois	Jour		
1	1846	01	01	1846	01	03	3	Démarrage du marégraphe
2	1847	01	01	1847	01	20	20	Disparition des marégrammes et registres
3	1852	01	21	1852	02	07	18	Disparition des marégrammes et registres
4	1857	06	02	1859	11	23	905	Observateur involontaire
5	1860	01	21	1860	04	30	100	Disparition des marégrammes et registres
6	1861	12	20	1862	01	17	29	Réparation de l'horloge du marégraphe
7	1863	08	31	1864	02	29	183	Indéterminée
8	1867	08	12	1867	09	01	21	Réparation de l'horloge du marégraphe
9	1868	07	15	1868	07	31	17	Panne de l'horloge du marégraphe
10	1872	03	28	1872	03	31	4	Panne de l'horloge du marégraphe
11	1872	04	15	1872	04	19	5	Panne de l'horloge du marégraphe
12	1874	04	30	1874	05	11	12	Réparation de l'horloge du marégraphe
13	1877	08	31	1877	10	01	32	Marégramme pris par l'ing. hydrographe
14	1878	08	31	1878	10	02	33	Réparation de l'horloge du marégraphe

n° de la lacune	Premier jour manquant			Dernier jour manquant			Somme des jours manquants	Raison de la lacune
	Année	Mois	Jour	Année	Mois	Jour		
15	1891	11	03	1891	11	29	27	Réparation de l'horloge du marégraphe
16	1897	05	31	1897	08	01	63	Disparition des marégrammes et régistres
17	1907	05	31	1907	06	30	31	Réparation de l'horloge du marégraphe
18	1911	03	23	1911	03	28	6	Panne de l'horloge du marégraphe
19	1915	01	01	1915	12	31	365	Disparition des marégrammes et régistres
20	1917	01	01	1917	02	01	32	Inondation du bâtiment du marégraphe liée à la reconstruction du toit de l'observatoire
21	1920	09	16	1920	09	18	3	Panne de l'horloge du marégraphe
22	1922	08	31	1922	10	01	32	Marégramme pris par l'ing. hydrographe
23	1922	12	10	1922	12	15	6	Panne de l'horloge du marégraphe
24	1923	07	18	1923	07	26	9	Avarie du marégraphe
25	1937	11	01	1938	12	31	426	Disparition des marégrammes et régistres
26	1940	06	24	1940	07	01	8	"Arsenal pris par les allemands"
27	1944	04	30	1949	06	22	1880	Destruction de l'observatoire
28	1949	07	30	1949	01	08	3	Indéterminée
29	1949	08	08	1949	08	16	9	Avarie du marégraphe
30	1949	08	22	1949	08	24	3	Mauvais fonctionnement tambour
31	1949	09	19	1949	10	27	39	Avarie du marégraphe et observatoire
32	1949	11	14	1950	01	09	54	Indéterminée
33	1950	01	16	1950	01	30	15	Indéterminée
34	1950	02	06	1950	04	11	65	Indéterminée
35	1950	05	08	1950	05	15	8	Indéterminée
36	1950	05	29	1950	06	05	8	Indéterminée
37	1950	06	26	1950	08	01	27	Indéterminée
38	1950	09	06	1950	10	16	41	Indéterminée
39	1950	10	23	1950	10	30	8	Indéterminée
40	1950	11	06	1950	11	13	8	Indéterminée
41	1950	11	25	1950	11	27	3	Indéterminée
42	1950	12	17	1950	12	25	9	Indéterminée
43	1951	01	01	1951	01	29	29	Indéterminée
44	1951	02	12	1951	03	06	23	Indéterminée
45	1951	07	02	1951	07	03	2	Indéterminée
46	1951	12	20	1951	12	24	5	Indéterminée
47	1951	12	29	1951	12	31	3	Indéterminée
48	1952	04	17	1952	04	25	9	Indéterminée
49	1952	05	12	1952	05	20	9	Indéterminée
50	1952	07	11	1952	07	23	13	Indéterminée
51	1952	08	11	1952	08	19	9	Indéterminée
52	1952	08	23	1952	09	08	17	Indéterminée
53	1952	09	15	1952	09	19	5	Indéterminée

n° de la lacune	Premier jour manquant			Dernier jour manquant			Somme des jours manquants	Raison de la lacune
	Année	Mois	Jour	Année	Mois	Jour		
54	1952	11	05	1952	11	07	3	Indéterminée
55	1980	1	12	1980	1	27	16	Indéterminée
56	1980	2	11	1980	2	13	3	Indéterminée
57	1980	7	18	1980	8	16	30	Indéterminée
58	1981	9	21	1981	9	28	8	Indéterminée
59	1982	1	2	1982	1	6	5	Indéterminée
60	1982	5	8	1982	5	23	16	Indéterminée
61	1982	10	25	1982	10	30	6	Indéterminée
62	1982	12	7	1982	12	19	13	Indéterminée

Tab. 6.11 – Synthèse explicative des lacunes dans les observations du niveau marin à Brest.

La plupart des lacunes sont liées à diverses avaries mécaniques du marégraphe (n°s de lacune 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 21, 23, 24, 29, 30 et 31). Souvent, le mouvement de l'horlogerie en est la cause. D'autres événements sont plus surprenants : disparition des registres horaires et des marégrammes (n°5, 16, 25), l'incompétence de l'observateur (n°4), le marégramme pris par l'ingénieur hydrographe lors d'une visite avant tout dépouillement (n°13, 22), l'inondation de l'observatoire (n°20) et même de nature historique. La prise de l' Arsenal par les Allemands lors de la seconde guerre mondiale (n°26) et sa destruction (n°27) est la cause de la plus importante lacune d'observation. A de nombreuses reprises, les lacunes ne sont pas expliquées (n°5, 16, 28, 32 à 62), surtout depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle.

Le lecteur intéressé peut consulter les informations complémentaires ci-après sur un ou plusieurs épisodes lacunaires, les numéros faisant référence au numéro de la lacune indiqué dans le tableau 6.11 :

01- Rapport sur les marégraphes. 1er mai 1861. Brest :

"Le marégraphe de Brest a été établi en 1845 a commencé à fonctionner le 4 janvier 1846 [...]"

02- Registre des PM-BM des mois de janvier et février 1847 :

Le marégraphe a fonctionné normalement. Le registre horaire des observations a disparu. Il reste le registre des heures et hauteurs des PM-BM pour cette période.

03- Registre des PM-BM des mois de janvier et février 1852 :

Le marégraphe a fonctionné normalement. Le registre horaire des observations a disparu. Il reste le registre des heures et hauteurs des PM-BM pour cette période.

04- Rapport sur les marégraphes. 1er mai 1861. Brest :

Entre 1846 et le 20 juin 1860 le marégraphe a été géré par le nommé Patouillard.

" [...] il fut négligé [le marégraphe] au point que des plaintes s'élevèrent contre l'observateur qui fut destitué et remplacé le 21 juin 1860 par le capitaine d'armes en activité Zeuner. Depuis le marégraphe et toujours parfaitement tenu. [...] Le dépouillement des courbes de 1856 à 1860 a été fort négligé par l'ancien observateur, et demanderait aujourd'hui au moins un an de travail continu, il ne peut donc être fait par l'observateur actuel. J'ai engagé le directeur de l'observatoire à envoyer les travaux passés au point où ils en sont. J'ai cependant demandé à l'observateur de porter sur le journal bimensuel de 1860 le commencement de l'année depuis les courbes de l'ancien observateur."

05- Aucune information.

06- Journal des marées 1860 – 1861 :

20/12 : *"Dans la nuit du 19 au 20 une dent de la roue à secondes s'est rompue. [...] fait des*

démarches pour faire réparer l'avarie."

21/12 : "Continuer les démarches pour la réparation"

24/12 : "Enlevé le traçoir et opéré le démontage de la pendule pour l'envoyer chez l'horloger."

07- Rien d'indiquer dans le journal des marées ni dans le journal bi-mensuel des marées.

08- Journal des marées 1866 – 1867 :

12/08 : "A 11h00, l'horloger vient démonter la pendule qui doit entrer en réparation."

09- Journal des marées 1868 – 1869 :

14/4 : "Vers midi la roue d'échappement des secondes a cassé des dents de rompu. Prévenu le directeur de l'observatoire donna l'ordre d'arrêter l'appareil. L'horloger ne pouvant le réparer étant lui-même malade."

10- Journal des marées 1872 – 1873 :

28/03 : "A midi en remontant la pendule, une dent de la roue s'est cassé."

31/03 : "M. l'horloger vient monter la pendule à 9h10."

11- Journal des marées 1872 – 1873 :

15/04 : "Trouvé le matin le pendule arrêtée. La suspension du balancier cassé. Prévenu le directeur de l'Observatoire et l'horloger."

19/04 : "L'horloger vient monter la pendule. A midi mis en marche."

12- Journal des marées 1874 – 1875 :

01/05 : "A 9h00 l'horloger vient démonter la pendule pour la réparer."

11/05 : "L'horloger vient monter la pendule comme elle n'est pas réglée."

"La pendule est entrée en réparation le 1er mai. Depuis l'hiver, le balancier dont la compensation ne se faisait que difficilement à cause de la rouille donnait des coups parfois violents contre les parois de la cage du pendule : fait des entailles pour lui laisser son libre mouvement et ne pas gêner les oscillations. Attendu la fin de l'hiver égard à la grande humidité du marégraphe pour faire les réparations nécessaires."

13- Journal des marées 1876 – 1877 :

"Remis la feuille à M. l'ingénieur hydrographe Germain avant d'avoir rien relevé. Il l'emporta avec lui à Paris."

14- Journal des marées 1878 – 1879 :

01/09 : "A 8h15 le matin, le marégraphe devant entrer en réparation le 2, on ne place pas de feuille."

02/09 : "Arrêté le pendule du marégraphe. Les ouvriers commencent les réparations."

01/10 : "Les peintres ayant terminés de peindre la charpente du marégraphe monté la pendule à 11h15."

15- Journal des marées 1890 – 1891 :

03/11 : "Enlevé le crayon et la feuille pour la réparation du marégraphe."

29/11 : "Mis la feuille en place et le crayon noir à midi."

16- Journal des marées 1896 – 1897 :

Le marégraphe a fonctionné normalement. Le registre horaire des observations a disparu. Il reste le registre des heures et hauteurs des PM-BM pour cette période.

17- Journal des marées 1906 – 1907 :

01/06 : "Enlevé la feuille et fils de l'appareil en vue d'examiner les réparations de l'appareil."

27/06 : "Curage du puits. Passage des fils, réparations terminées. Mis le crayon en place à 10h15."

18- Journal des marées 1910 – 1911 :

23/03 : "A 10h00 du matin arrêté le tambour par suite d'une avarie dans le mouvement d'horlogerie de l'appareil."

28/03 : "A 10h00 mis le tambour en marche, la réparation du mouvement d'horlogerie étant terminée."

19- Journal des marées 1914 – 1915 :

Le marégraphe a fonctionné normalement. Le registre horaire des observations a disparu. Il reste le registre des heures et hauteurs des PM-BM pour cette période ainsi que l'ensemble des marégrammes.

20- Journal des marées 1916 – 1917 :

21/01 : "Modification de la toiture du local du marégraphe pour permettre l'installation d'une grue pour l'embarquement des munitions pour la Russie".

25/01 : "Dans la nuit du 25 au 26 le local étant recouvert que par une simple bâche et le plafond

formé de planches disjointes, le vent ayant déplacé la bâche, le marégraphe a été complètement inondé, la feuille rendue inutilisable. Le tout est resté sous l'eau jusqu'au 30 moment auquel on a posé un toit en bois mais qui n'est pas étanche. La toiture est commandée à l'industrie."

30/01 : *"J'ai démonté complètement les appareils. Nettoyage à fond."*

31/01 : *"Terminé le nettoyage et remonté les appareils."*

01/02 : *"A midi mis une nouvelle feuille en place. Bon fonctionnement des appareils. La toiture n'est toujours pas étanche."*

07/02 : *"Terminée la toiture du local du marégraphe ; étanchéité complète."*

21- Journal des marées 1920 – 1921 :

"L'uns des tenons de l'ancre de la pendule du marégraphe s'est rompu dans la nuit du 15 au 16 septembre [...]. Le fonctionnement normal a été repris le 18 septembre à 10h00."

22- Journal des marées 1922 – 1923 :

"La feuille contenant les courbes de marées du mois de septembre a été remise sur sa demande à M. l'ingénieur hydrographe Villain. De ce fait, l'état donnant la hauteur de la mer à chaque heure n'a pu être établi."

23- Journal des marées 1922 – 1923 :

"La pendule a dû être arrêtée le 10 décembre à 1h25 du soir, une goupille s'étant cassée dans la roue d'échappement. Après remplacement de plusieurs goupilles usées, la pendule a été remise en marche le 15 décembre à 3h00 du soir."

24- Journal des marées 1922 – 1923 :

"Une avarie est survenue à l'horloge du marégraphe pendant la permission de l'observateur des marées. L'employé intérimaire s'était trompé en embrayant l'appareil. Après réparation, les courbes sont à des heures inexactes par la période du 17 juillet à minuit au 26 à 8h30 du matin."

25- Journal des marées 1938 – 1939 :

Le marégraphe a fonctionné normalement. Le registre horaire des observations pour l'année 1838 a disparu. Il reste le registre des heures et hauteurs des PM-BM pour cette année contrairement à celui de l'année 1937 (le journal des marées 1936 – 1937 n'a pas été trouvé).

26- Journal des marées 1940 (caisse n°26).

24/06 : *"L'arsenal pris par les allemands."*

27- Aucune information.

28- Aucune information sur le fonctionnement du marégraphe indiqué sur les fiches de relevés horaires de la hauteur de la mer à Brest.

29, 30, 31- Indications directement récupérées sur les marégrammes.

32 à 62- Aucune information.

6.2.1.5. Listing du personnel en relation avec le marégraphe.

Les observateurs, comme l'expliquent Beautemps-Beaupré (cf. 5.2.2), Chazallon (cf. 5.3.4.3) et Disney (cf. 5.4.1.2) jouent un rôle fondamental dans l'obtention de bonnes mesures marégraphiques. Connaître leur période d'activité est donc un critère important pour déterminer la qualité des mesures, mieux appréhender le systématisme et expliquer pourquoi sur une période donnée, les observations présentent davantage d'imprécisions qu'à d'autres (tableau 6.12).

	Responsable service des marées	Responsable observatoire	Observateur
1845	Chazallon		
1850			
1855			
1860			
1865	Gaussin	Belleville	Zenner
1870			Baucher
1875			
1880			Pochard
1885	Hatt		
1890			
1895			
1900			
1905		Rollet de l'Isle	
1910			Morisseau
			Hernss
			Trancar
1915		Léons	
1920	Courtier		Bergot
1925			Abolier
			Bergot
1930			
1935		Madu	
	Villain		
1940			Luiry

	Responsable service des marées	Responsable observatoire	Observateur
	Gougenheim		Rertreux
			Creurs
1945			
1950			
1955			
	Roumégoux		
1960			Service OCI/DC
	Chatel		
1965			Service Hydrographique Marine ¹
1970	Demerliac		
1975	Desnoes		Service OCI/DC ²
1980	Simon		
1985			Observatoire : Service OCI Entretien marégraphe : SHOM ³
1990			
1995			OCI ⁴
2000			SHOM ⁵
2005			
	Pineau-Guillou		

Tab. 6.12 – Liste du personnel ayant eu la gestion, l'entretien et le suivi des marégraphe.

¹ Anonyme (1964). Marée à Brest. Cahiers océanographiques. 16^{ème} année, n°8, pp685-687.

² Floch (13/04/1977). Ordre : Surveillance du Marégraphe. Référence : n°7 OCI/DC

³ Roche (21/04/1981). Ordre : Affectation de l'observatoire du marégraphe. Référence : I.M. n°354 SHOM/EM.

⁴ Pasquay (06/12/1993). Instruction : Marégraphe des ports militaires de Brest et de Cherbourg. Référence : n°363 SHOM/EM/NP.

⁵ Souquière (04/10/1995). Instruction : Marégraphe des ports militaires de Brest, de Cherbourg et de Toulon. Référence : n°256/DEF/SHOM/EM

A partir des années 1950, le métier d'observateur des marées permanent qui, depuis l'utilisation des MCM, avait la gestion à plein temps de l'observatoire disparaît au profit de deux catégories professionnelles : personnel du SHOM¹ spécialiste en marégraphie ; personnel provenant du service Ouvrages, Cartes et Instruments [OCI]. Les premiers sont habitués au maniement d'appareils marégraphiques et à leur entretien, tandis que les seconds ont une formation minimale sur l'entretien et le réglage des MCM, mais aussi sur les changements de marégrammes et la manière de contrôler la bonne marche de l'appareil en hauteur et en temps (communications personnelles de M. Legoff et B. Simon). Ces derniers ont eu la charge de l'observatoire au moins depuis 1956 jusqu'en 1964, puis de 1972 à 1981 et plus récemment entre 1994 et 1995. De 1981 à 1993, la surveillance de l'observatoire était partagée entre les deux services : l'entretien de l'abri (puis de l'échelle de marée) étant affecté au Service OCI tandis que l'entretien du marégraphe à proprement parler était assuré par le SHOM². De 1964 à 1971 et depuis le 4 octobre 1995, c'est le SHOM qui a la responsabilité tant de l'exploitation que de la surveillance de l'observatoire.

6.2.2. Mesures des PM et des BM.

6.2.2.1. Détail sur les observations.

Contrairement aux mesures horaires conservées sur un site unique (SHOM), les observations de PM et de BM sont préservées dans plusieurs centres d'archives : Archives Nationales, Bibliothèque de l'Observatoire de Paris, Archives de l'Académie des Sciences, SHD Marine à Rochefort, SHOM. Cette dissémination des données explique en partie pourquoi cette étude n'a pas eu lieu avant. Le tableau 6.13 dresse l'inventaire de tous les jeux de PM et de BM depuis 1679. Pour chaque lot de mesures est précisé la période, le type de données, le lieu de conservation des mesures ou le document en faisant référence, tandis que la dernière colonne renseigne si la série a été trouvée ou non.

¹ Le Service Hydrographique de la Marine [SHM] est l'ancienne appellation du SHOM.

² Roche (21/04/1981). Ordre : Affectation de l'observatoire du marégraphe. Référence : I.M. n°354 SHOM/EM.

Période	Type de données	Cote et lieu d'archivage si disponible sinon référence de l'ouvrage en faisant l'écho.	Disponible ¹
18/09/1679-28/09/1679	Temps en heure et minute, seconde des PM diurnes sans hauteur d'eau.	Picard J., de La Hire P. (1729a).	O
06/06/1692-31/10/1692	PM, t° de l'air, vitesse et sens du vent.	Cassini J. (1713b), p.24.	N
18/09/1692-29/09/1692	Temps en heure et minute, seconde lors des PM et BM diurnes sans hauteur d'eau	Bibliothèque de l'Observatoire de Paris, B.5.9.	O
01/01/1693-31/04/1693	PM matin et soir sans datation, vitesse et sens du vent.	Archives Nationales, MAR3JJ151, n°7	O
10/6/1711-31/12/1712	Temps en heure et minute des PM et BM diurnes (plus nocturnes lors des vives eaux).	Lalande (1781), p.161 à 231. ou Bibliothèque de l'Observatoire de Paris, D2.42	O
01/1713-12/1713 02/1714-03/1714 09/1716			N
01/1714 04/1714-08/1716			O
01/09/1716-30/09/1716		Bibliothèque de l'Observatoire de Paris, D2.42	O
01/03/1756-30/06/1778		PM matin et soir sans temps.	Archives de l'Académie des Sciences. Pochette 1781 01 31	O
01/08/1773-08/06/1775	?	Lalande (1781).	N
01/1778-08/1786 10/1786-01/1790 03/1790-12/1792	PM matin et soir sans temps.	Bibliothèque de l'observatoire de Paris, B5 5.	O
1793	?	Lalande (1789 & 1793).	N
07/1806-12/1806	?	Savary F. <i>et al.</i> (1843).	N
01/1807-12/1835	Temps en heure et minute des PM et BM diurnes (plus nocturnes lors des vives eaux), force et direction du vent.		O
06/1819-10/1832	Temps en heure et minute des PM et BM diurnes (plus nocturnes lors des vives eaux), force et direction du vent	Archives Nationales, MAR3JJ153	N
10/1832-12/1835		Manuscrit. Carton marée n°12, archives SHOM.	N
01/1836-04/1836			O
06/05/1837-30/09/1837	Temps en heure et minute des PM et BM diurnes (plus nocturnes lors des vives eaux).	Etude de concordance des marées entre les ports de Douarnenez et Brest. Archives Cellule HDC SHOM.	O
01/05/1816-31/10/1816	Temps en heure et minute du Soleil des PM et BM diurnes, force et direction du vent, état de la mer.	SHDM Rochefort. 7JJ 140	O
18/09/1817-31/10/1817		SHDM Rochefort. 7JJ 159	O
15/05/1818-30/05/1818		SHDM Rochefort. 7JJ 205	O

¹ N : observations non trouvées, O : mesures disponibles.

Période	Type de données	Cote et lieu d'archivage si disponible sinon référence de l'ouvrage en faisant l'écho.	Disponible ¹
04/01/1846-01/6/1857	Temps en heure et minute des PM et BM, force et direction du vent.	Archives du SHOM, n°50 + boîte n°12.	O
01/01/1847-31/01/1847 01/02/1852-29/02/1852		Archives du SHOM, n°50.	O
01/02/1860-29/02/1860 03/07/1897-31/07/1897 01/01/1915-31/12/1915 31/08/1922-01/10/1922 01/01/1938-31/12/1938		Archives du SHOM.	O

Tab. 6.13 – Synthèse des observations de PM et de BM à Brest.

Ce qui frappe dans le tableau précédent, c'est la durée totale d'observation depuis 1679 jusqu'en 1938. Trois siècles sont ainsi couverts par des mesures du niveau de la mer. Ce qui marque également, c'est la disparité dans les types de données antérieures à 1850. Parfois seules des PM sont observées, à d'autres moments les PM et les BM ne sont mesurées que de jour, quelquefois seules les hauteurs sont notées sans le temps, etc. Enfin durant l'ère des MCM, les données de PM et de BM complètent certaines lacunes horaires (tableau 6.11).

Peu de données de PM et de BM durant l'ère marégraphique sont indiquées sur le tableau 6.11 Comme les observations horaires sont disponibles au format numérique pour cette époque (cf. 6.2.1.1), la numérisation des registres des PM et BM n'a pas été exécutée. Nous avons suivi une procédure de manière à obtenir les heures et hauteurs de chaque PM et de chaque BM (cf. 7.2.2).

L'annexe B fait le point sur les pourcentages des observations de PM, de BM et de PBM disponibles au format numérique.

6.2.2.2. Techniques d'observation.

Les chapitres 2 à 5 présentent pour chaque série de mesures trouvée, lorsque les informations existent, la méthodologie utilisée pour les obtenir. Le tableau 6.14 synthétise l'ensemble des techniques d'observation pour les PM et les BM à Brest :

Période	Type d'appareil	Technique d'observation
18/09/1679-28/09/1679	Repère visuel fixe	"deux temps éloignez devant & après, ausquels elle [le niveau de la mer] se trouvoit à certaine hauteur précise qui duroit si peu que nous n'avons point fait de difficulté de marquer jusques aux secondes" (cf. 2.3.).
06/06/1692-31/10/1692	?	?
18/09/1692-29/09/1692	?	?
01/01/1693-31/04/1693	?	?
10/06/1711-31/12/1712 01/1714 01/04/1714-30/09/1716	Utilisation d'un cadran Solaire pour régler la pendule. Pas d'indication pour les hauteurs.	Aucune explication (cf. 3.2.3.).
03/1756-06/1778	Echelle de marée en bois.	Aucune explication (cf. 3.5.3.6.).
01/08/1773-08/06/1775	Echelle de marée en bois.	Aucune explication (cf. 3.5.3.6.).
01/1778-08/1786 10/1786-01/1790 03/1790-12/1792	Echelle de marée en bois.	Aucune explication (cf. 3.5.4.4.).
1793	?	Aucune explication (cf. 3.5.4.4.).
01/1807-12/1811	Echelle flottante	Lecture des graduations de l'échelle flottante afin d'obtenir la hauteur d'eau (cf. 4.4.3.).
01/01/1810-31/12/1810 01/01/1812-01/06/1822	Echelle de marée en pierre.	"[...] l'observateur, du moins à partir de 1812, [...] inscrit les heures auxquelles le niveau atteint différentes divisions, un peu avant et un peu après l'instant du maximum ou du minimum. L'heure moyenne entre celles qui correspondent à des hauteurs égales, avant et après les positions extrêmes, est prise pour l'heure de la pleine et de basse mer.
06/1819-10/1832 01/10/1832-30/04/1836 06/05/1837-30/09/1837	Echelles de marée en bois.	[...] à partir de juin 1822, on observa au bassin de Brest d'une manière différente ; que, terme moyen, l'observateur jugeait la mer pleine quatre minutes plus tôt, et la mer basse quatre minutes plus tard que dans le mode d'observation précédemment adopté. Les six derniers mois de 1822 présentent une confusion entre les deux modes d'observation." (cf. 4.4.3.).
01/05/1816-31/10/1816 18/09/1817-31/10/1817 15/05/1818-30/05/1818	Echelles de marée	Aucune explication (cf. 5.2.1. et 5.2.2.).
04/01/1846-01/6/1857 01/01/1847-31/01/1847 01/02/1852-29/02/1852 01/02/1860-29/02/1860 03/07/1897-31/07/1897 01/01/1915-31/12/1915 31/08/1922-01/10/1922 01/01/1938-31/12/1938	Marégraphe	Extraction des PM et des BM à partir des marégrammes (cf. 5.3.4.3.).

Tab. 6.14 – Synthèse sur les techniques d'observation de PM et de BM à Brest.

Pour plusieurs jeux de mesures, aucune explication sur la méthode employée n'est fournie. Pour les autres, la méthode dite de La Hire et Picard (cf. 2.3) est utilisée pour déterminer l'heure de la PM ou de la BM. Les hauteurs d'eau sont lues sur des échelles de marée, soit en bois, soit en pierre sans davantage de précision.

6.2.2.3. Personnel ayant participé aux mesures.

Sans distinction entre les jeux de hauteurs horaires et des lots de mesures de PM et de BM, l'influence des observateurs sur l'acquisition des données est importante (cf. 6.2.1.5). Le tableau 6.15. liste ces observateurs :

Début	Fin	Observateur
18/09/1679	28/09/1679	Picard et de La Hire.
06/06/1692	31/10/1692	?
01/01/1693	30/04/1693	Coubard, professeur d'Hydrographie
10/06/1711	30/09/1716	Coubard, professeur d'Hydrographie
01/03/1756	30/06/1778	?, gardiens des bassins
30/01/1778	31/12/1792	?
1793	1793	Raillard, Lieutenant de Vaisseau.
06/1806	1806	?
1807	1813	Hubé, ouvrier de l'atelier à la mâture
1813	1819 ?	Salaun
1819	1843 ?	?

Tab. 6.15 – Liste des observateurs des marées à Brest depuis 1679.

Pour certaines époques, les noms des personnes n'ont pas été retrouvés. A partir du profil des observateurs, une évolution s'impose : jusqu'en 1716, les mesures sont réalisées par des scientifiques ; à partir de 1756 ce sont des personnes sans affinités pour les sciences qui les effectuent. Il est alors possible que leur implication personnelle pour effectuer les mesures soit moins forte impliquant de fait une imprécision plus importante sur les observations.

6.2.3. Présentation des différents observatoires.

Même si depuis quatre siècles, les observations du niveau de la mer sont réalisées à Brest, toutes n'ont pas été effectuées au même endroit :

Période	Lieu d'observation
18/09/1679-28/09/1679	Jardin du Roy (cf. 2.3)
06/06/1692-31/10/1692	Jardin du Roy - Rocher de La Rose (cf. 2.3)
01/01/1693-30/04/1693	Jardin du Roy - Rocher de La Rose (cf. 2.3)
10/06/1711-30/09/1716	? (cf. 3.2.3)
01/03/1756-31/12/1792	Bassin de Brest (cf. 3.5.3.6. ; 3.5.4.4)
1793	Bassin de Brest (cf. 3.5.4.4)
06/1806-31/12/1811	La mâture (cf. 4.4.3)
01/01/1810-31/12/1810	Bassin de Brest (cf. 4.4.3)
01/01/1812-30/04/1836	
06/05/1837-30/09/1837	
04/01/1846-30/04/1944	La mâture (cf. 5.3.3.1)
22/06/1949-	La mâture (cf. 5.3.3.1)

Tab. 6.16 – Liste des lieux d'observation depuis 1679.

Trois sites ont accueilli un observatoire du niveau de la mer : le plus ancien au "Jardin du Roy", les deux autres au bassin de Brest, à la mâture. La carte suivante (figure 6.14) permet de visualiser les différents sites donnés précédemment dans le tableau 6.16 :

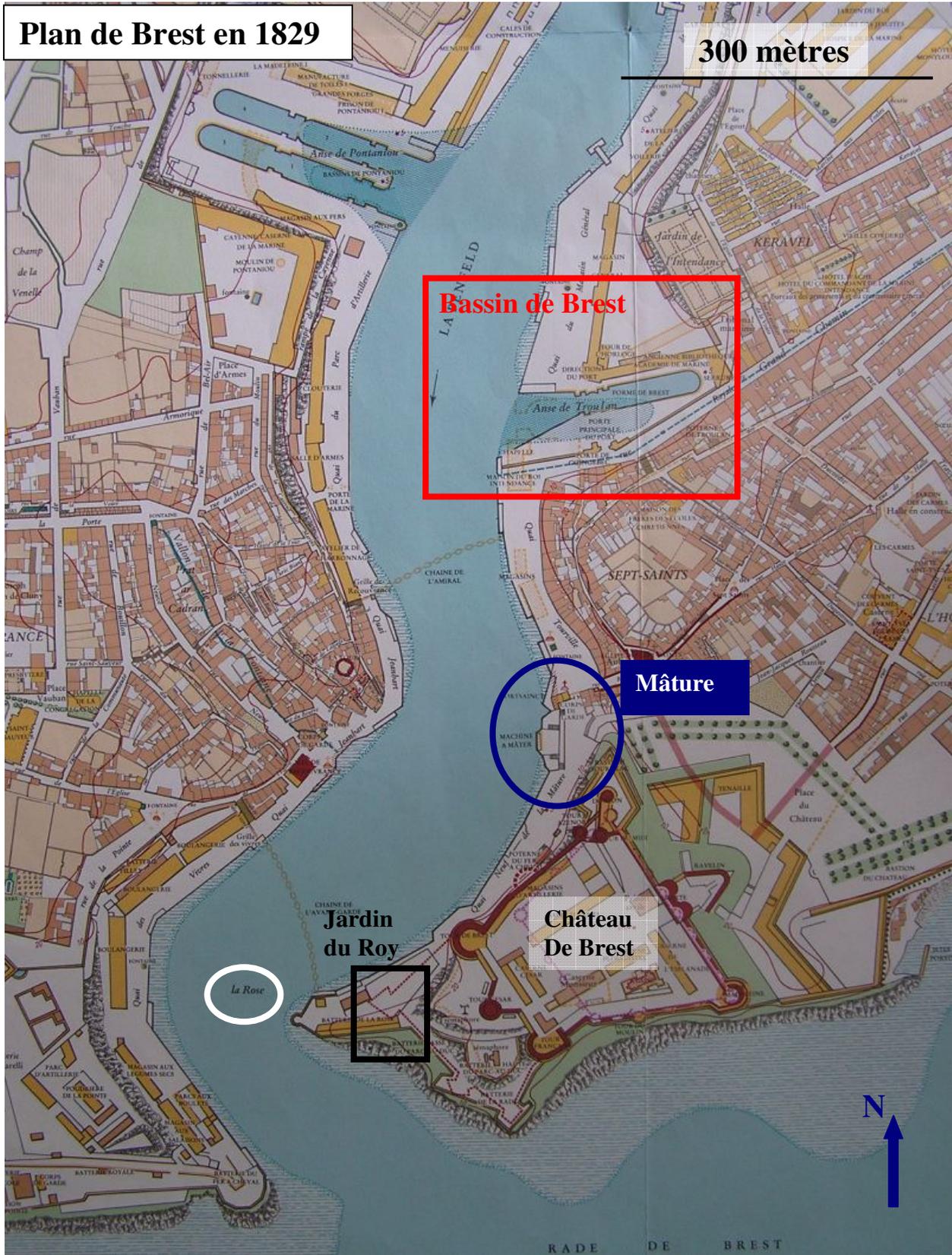


Fig. 6.14 – Localisation des différents observatoires de la marée à Brest depuis 1679. Fond cartographique extrait des travaux de Cloître et Bugat (1991).

Le fond cartographique utilisé (Cloître et Bugat ,1991) présente la ville telle qu'elle était en 1829, c'est-à-dire approximativement à mi-temps entre 1679, date des premières observations et aujourd'hui, en 2008. Le site de la mâtire est à mi-chemin entre le bassin de Brest, ensemble le plus en amont dans la Penfeld, et la zone Jardin du Roy – Rocher de La Rose qui délimite le début de l'estuaire. Une distance de 600m sépare les observatoires du bassin de Brest du Jardin du Roy. L'ensemble des sites de mesures est localisé sur la berge gauche de la Penfeld, c'est-à-dire du coté "vieux" Brest.

Les besoins de la Marine changeant avec les époques, les sites ayant servi d'observatoire ont évolué pour y faire face. Les points qui suivent détaillent ces évolutions.

6.2.3.1. Le Jardin du roy – le rocher de la Rose.

Le Jardin du Roy, actuel jardin du préfet maritime de l'Atlantique, a très peu évolué depuis quatre siècles. Le repère utilisé pour mesurer la PM sur le rocher de La Rose n'est pas connu. Le rocher de La Rose est formé d'un gneiss très dur recoupé de quelques filons de quartz disséminés dans la masse. La Rose était un véritable obstacle à navigation pour entrer ou sortir de la Penfeld. Au fur et à mesure des besoins de la marine et des évolutions technologiques, le rocher de La Rose a été dérasé à plusieurs reprises¹ et ². Devant le peu d'observations réalisées et au vu des nombreux problèmes soulevés par l'évolution morphologique du site, l'accent n'a pas été mis sur cet observatoire contrairement aux deux autres.

¹ Verrier, ingénieur des travaux hydrauliques (1858). Rapport adressé à Dehargne, directeur des travaux hydrauliques sur l'état actuel des travaux d'extraction de la roche La Rose, et sur les résultats obtenus jusqu'à ce jour. SHDM-Vincennes Article 21 section 9 § 6.

² Travers, Verrier, Dauriac, Fleury (1877). Marché de gré à gré pour l'exécution des Travaux sous-marins de dérasement de la Roche LA ROSE et de celles qui existent au Sud de l'entrée du Bassin de radoub n°5. SHDM-Vincennes DD2571.

6.2.3.2. Le bassin de Brest – Bassin Tourville.

La forme n'a pas toujours porté le même nom :

≈ 1789 (Révolution française).	≈ 1870 - 1875		≈ 1900 (réfection des formes de Pontaniou [n°2 et 3].)
Forme de Brest dans l'anse de Troulan, bassin n°1	Forme de Brest.	Forme de Brest, bassin n°1	Bassin de Tourville (bassin de Brest)

Depuis la réfection des formes de Pontaniou au début des années 1900, le bassin de Brest est communément nommé bassin Tourville. En raison de notre l'intérêt limité dans le temps de cette forme, nous n'utilisons que son appellation première à savoir bassin ou forme de Brest.

Le bassin de Brest présente une histoire passionnante. Il se trouve au cœur historique de l'arsenal militaire de Brest, dans une ancienne crique vaseuse dite "*anse de Troulan*" (Levot, 1865). La construction de la forme¹ (d'après les plans de Vauban) démarra en 1683 pour s'achever en 1687. Souffrant de plusieurs défauts, les portes du bassin furent modifiées en 1702 et 1741². Pour cette dernière année, il fut également construit, à l'intérieur, des banquettes en forme d'amphithéâtre épousant la forme des bateaux. En même temps que les navires devenaient plus imposants, les formes devaient évoluer pour pouvoir les accueillir. Le bassin fut approfondi de 5 pieds (≈1,624m) en 1783³. De 1801 à 1815 des travaux furent exécutés pour dégager l'entrée du côté droit du bassin⁴. Au mois de mai 1822⁵, le système de fermeture datant de 1783 est remplacé par une porte flottante. La forme, dont les dimensions sont devenues insuffisantes en raison de l'extension de la flotte cuirassée, est agrandie à partir de 1864⁶. Par deux fois, entre les deux guerres mondiales et durant les années 1950, du béton fut coulé sur le radier⁷ présentant une épaisseur maximale de 30 à 40 cm (communication personnelle de J. Littoux). Le tableau 6.17 résume toutes les évolutions morphologiques du bassin avec quelques précisions sur le responsable.

¹ Forme : "La forme est un atelier ou chantier d'un arsenal de marine, c'est-à-dire une espèce de réduit sur bord de la mer pour la construction ou le carenage d'un vaisseau ; elle est enfermée de murailles pour empêcher que la mer n'y entre jusqu'à ce que les œuvres de vives soient faites, ou que le radoub soit achevé." D'après Jal (1848).

² Choquet (1757). Description des trois formes du port de Brest, baties, dessinées et gravées. Imprimerie Romain Lalassis, Brest. SHDM-Vincennes, ATR180.

³ Groignard (novembre 1781). Projet pour mettre le bassin de Brest le moins profond et le plus resserré en état de recevoir tous les jours les vaisseaux de 74 et 80 canons et a toutes les marées les vaisseaux de 110 canons. Archives Nationales, MAR/D2/25.

⁴ Trotté de la Roche (27/07/1820). Rapport. SHD-Vincennes, DD2740.

⁵ Molland Gaurin (14/06/1822). Note sur les observations faites par m mrs les directeurs par Intérim des constructions navales et des travaux maritimes relatives au moen d'assurer la stabilité de la nouvelle porte flottante du Bassin de Brest. SHDM-Vincennes, DD2740.

⁶ Marché de gré à gré et à forfait pour la Reconstruction et la Mise en Service régulier du Bassin de Brest. Dépêche ministérielle du 18 janvier 1864. SHDM-Vincennes, DD2 2571.

⁷ Radier : Sol du bassin fait de dalles en pierre ou de béton.

Période	Responsable du projet	Travaux réalisés	Effet des travaux sur l'observatoire des marées
1683-1687	Vauban	Construction de la forme de radoub.	Pas d'observation.
1702	Ingénieur Robelin	Modification de la porte d'écluse.	Pas d'effet sur les mesures ni sur l'échelle de marée.
1741	Ingénieur Ollivier	Réalisation des banquettes et portes refaites.	
1783	Ingénieur Groignard	Installation d'un bateau-porte et fond du bassin creusé de 5 pieds ($\approx 1,624\text{m}$) par rapport à l'ancienne forme.	Avec l'approfondissement et la réfection complète du bassin, l'échelle a peut-être bougé (non détectable sur la fig. 8.11 et suivantes)
1822	Ingénieur Pestel	Installation d'une porte flottante	Pas d'effet sur les mesures ni sur l'échelle de marée.
1864-1865	Ingénieur Reynès	Allongement du bassin vers la Penfeld, fond de la forme refaite	Pas d'observation.
1920-1940	?	Couche de béton posé sur la base du radier	
≈ 1950	?	Idem que précédemment. Les 2 couches n'excèdent pas 30 à 40 cm d'épaisseur).	

Tab. 6.17 – Liste des principales modifications réalisées sur la forme de Brest.

Comment le zéro des échelles était-il choisi par rapport au bassin de Brest ? La réponse se trouve dans les cahiers de mesures entre 1756 et 1778¹ (cf. 3.5.3.6) : *"Toutes ces hauteurs de marées sont prises au dessus du terre-plein, du fond des bassins ou des formes. C'est-à-dire, [...] la mer à monté [...] au dessus du pavé à l'endroit ou reposeroit le dessous du talon d'un grand vaisseau assis dans ce bassin."* Ces phrases, rédigées entre 1756 et 1781, sur le fait que le zéro de l'échelle se trouve à la base du radier du bassin, c'est-à-dire, au fond de la rigole semble indiquer que cette convention était la norme aux environs des années 1750, au moins pour Brest. Choquet (1757), concepteur entre 1751 et 1757 des 3 formes de Pontaniou faisant face au bassin de Brest, expose sous la forme d'une gravure l'une de ces créations :

¹ Anonyme. Observations sur la plus grande hauteur de marée de chaque jour dans le Port de Brest. Archives de l'Académie des Sciences, pochette de Séance du 31/01/1781.

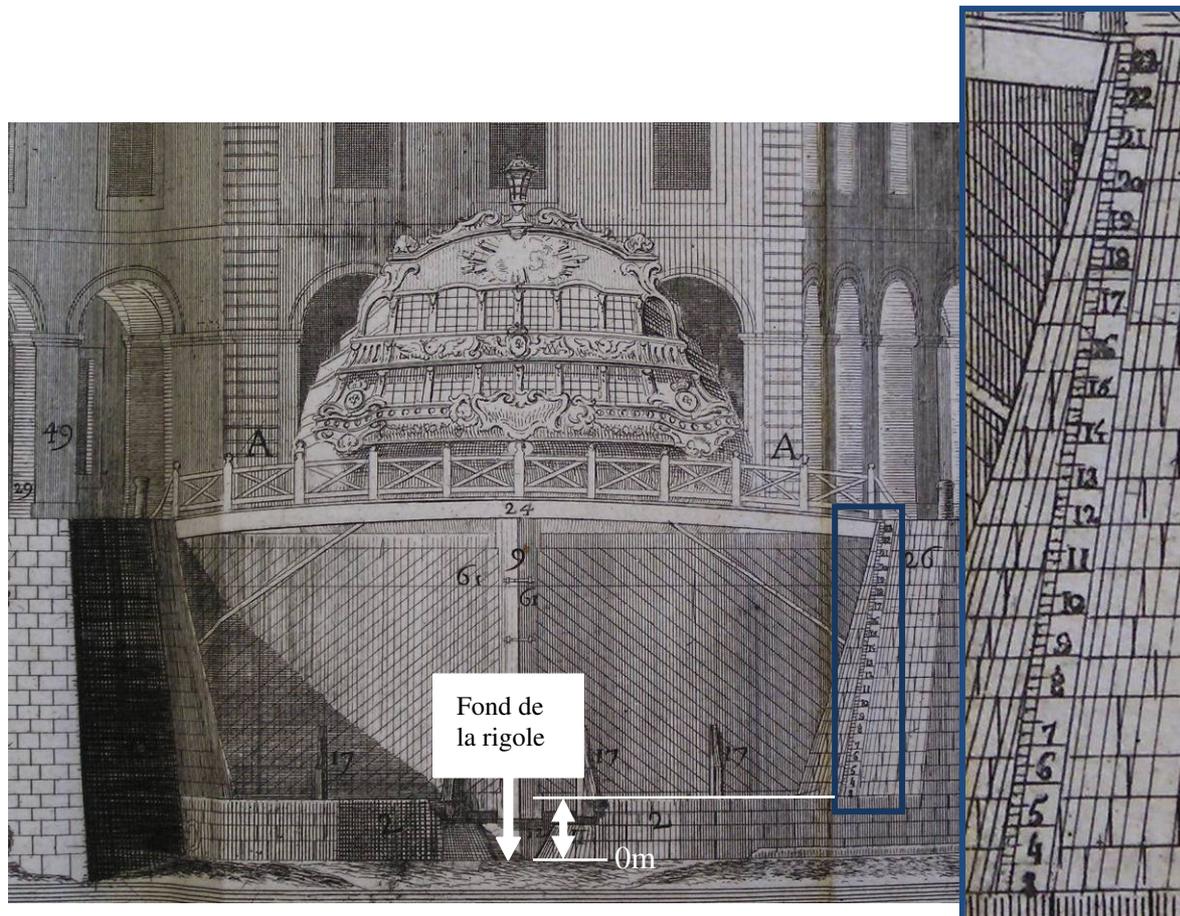


Fig. 6.15 – Détail de l'élévation de l'entrée d'une des formes de Pontaniou. D'après Choquet (1757).

Sur cette gravure, le long d'un des bajoyers¹ du bassin se trouve une échelle des marées graduée en pieds et pouces (cf. 4.4.3). La légende n°26 accompagnant la gravure explique pour cette échelle de marée que l' "*Elévation d'une Branche où est un règle graduée pour marquer combien l'eau monte au dessus du fond de la Rigole*". La figure est très fidèle à la réalité : à la base du bajoyer est indiqué la graduation 3 pieds ; en prolongeant l'échelle de 3 pieds à partir d'une gravure originale, on arrive sur la base, au fond de la rigole.

Le document iconographique le plus ancien trouvé pour le bassin de Brest avec une échelle de marée accolée au bajoyer date de 1863 (fig.6.16). L'échelle noirâtre est constituée d'une alternance de carrés blancs de 5cm de côté contrastant avec la couleur de l'échelle. Les graduations sont donc de 5cm avec les hauteurs indiquées tous les 20cm. Le passage de l'échelle graduée en pieds et pouces vers le système métrique est donc à situer entre 1836 (cf. 4.4.2) et la prise de cette photographie.

¹ Bajoyer : Paroi des bassins.

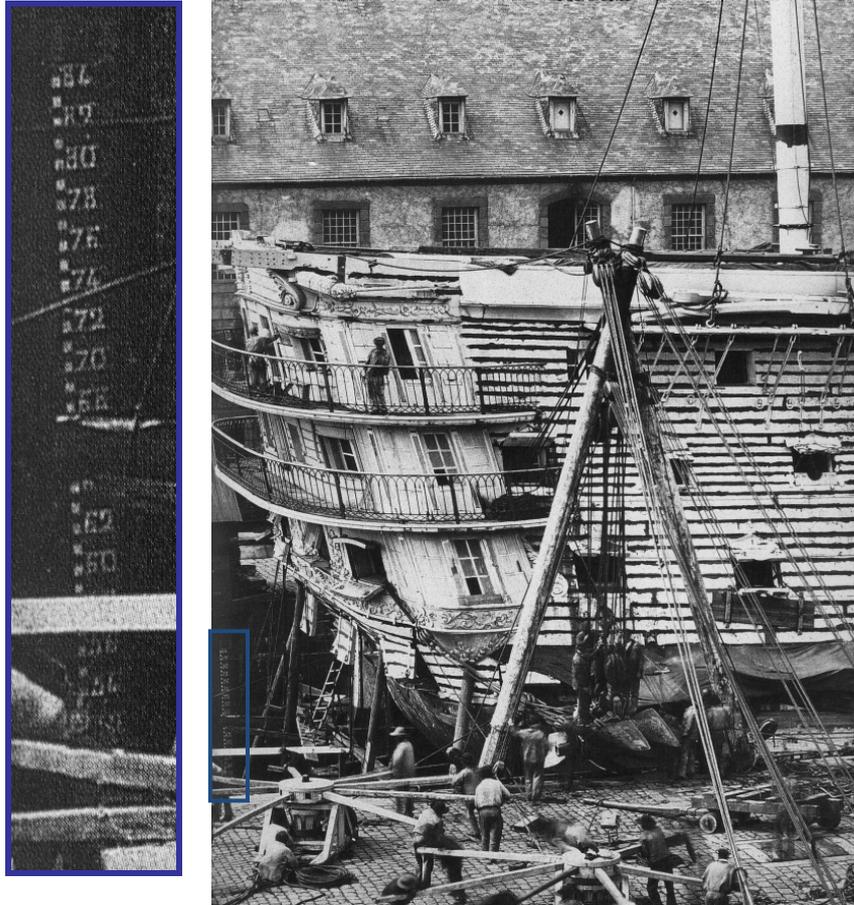


Fig. 6.16 – Bateau le *Louis XIV* dans la forme de Brest. Cliché pris en 1863 d'après Boulaire (2004). Source du cliché : Direction des Constructions Navales.

Ce format d'échelle reste en place au bassin de Brest jusqu'aux années 1910, au moins. En effet, une carte postale en confirme la présence (fig. 6.17), la date étant déterminée grâce à la nouvelle grue électrique installée d'après Cros *et al.* en 1910.

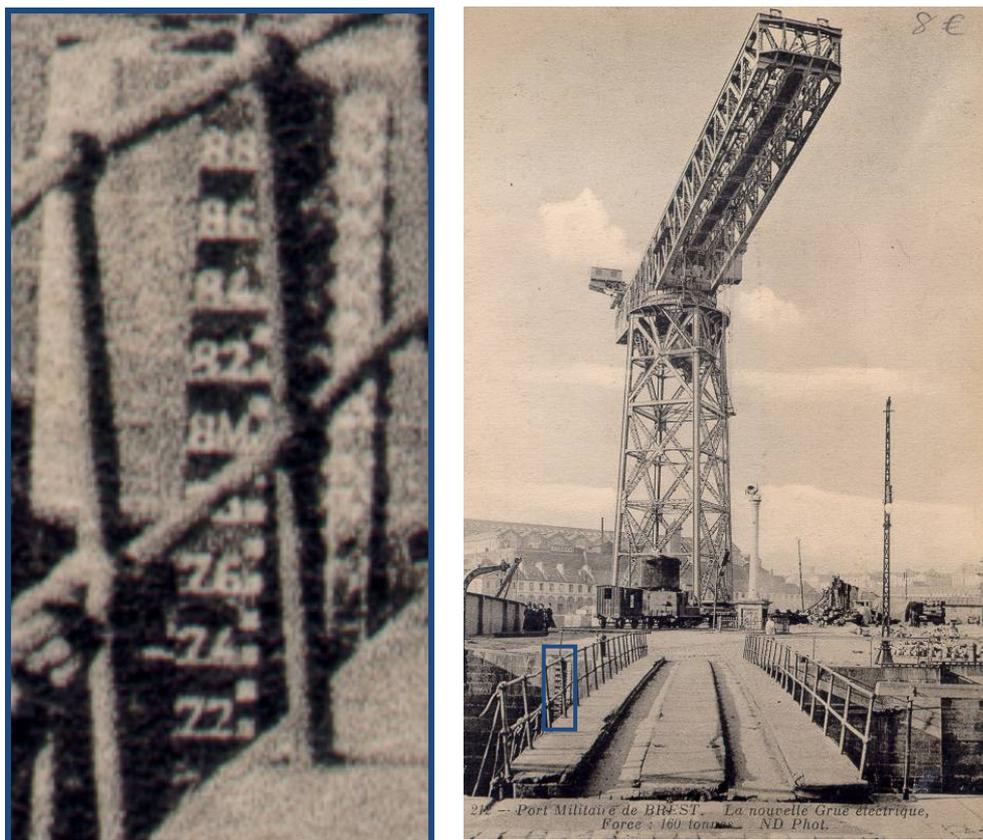


Fig. 6.17 – Nouvelle grue électrique, passerelle du Bassin de Brest, et échelle de marée (≈1910).

Sur la droite de l'échelle semble apparaître une seconde plus ancienne. Malheureusement il est impossible de confirmer cet élément à partir du cliché. En me rendant sur site en août 2005, il m'a été impossible de retrouver la moindre trace, probablement à cause des dommages subis par l'arsenal en général et le bassin en particulier lors de la seconde guerre mondiale (fig. 6.18).

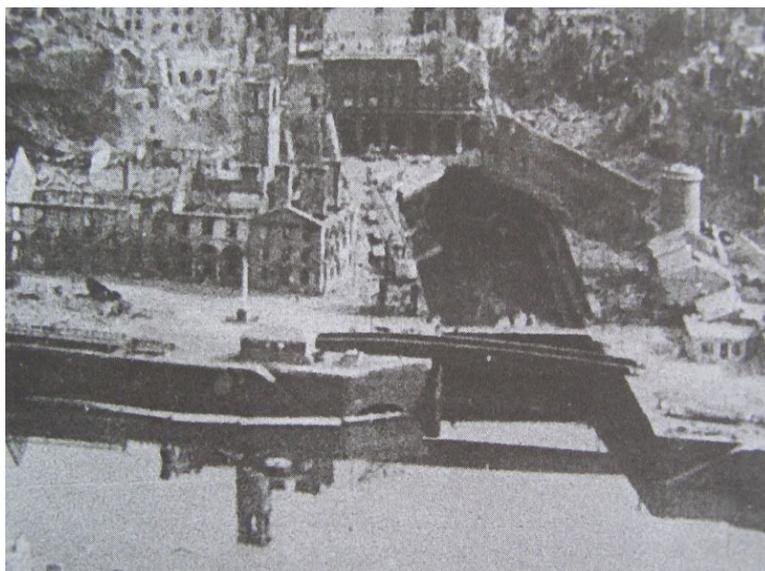


Fig. 6.18 – Photographie du bassin de Brest après sa libération en septembre 1944. Source *Le Télégramme*.

6.2.3.3. La mâture.

Le site de la mâture doit son nom à la machine à mâter¹ qui se trouvait au pied du château. D'après Magado (1865), l'appareil fut construit en 1681 et transformé en 1768. Elle s'élevait alors sur plusieurs épaisseurs de pierres de taille. D'après Levot (1865), C'est "*Petit*² [...] qui l'a exhaussée de 6,50m en surplomb de l'eau [...]". L'appareil employé pour la mâture repose sur un énorme massif de pierres de taille, élevé de 7m au-dessus du niveau de l'eau prie dans les plus basses marées". L'ensemble, à l'intérieur de l'ellipse rouge (fig. 6.19), est visible sur le tableau peint en 1854 par Léon Antoine Morel-Fatio³ [1810-1871].

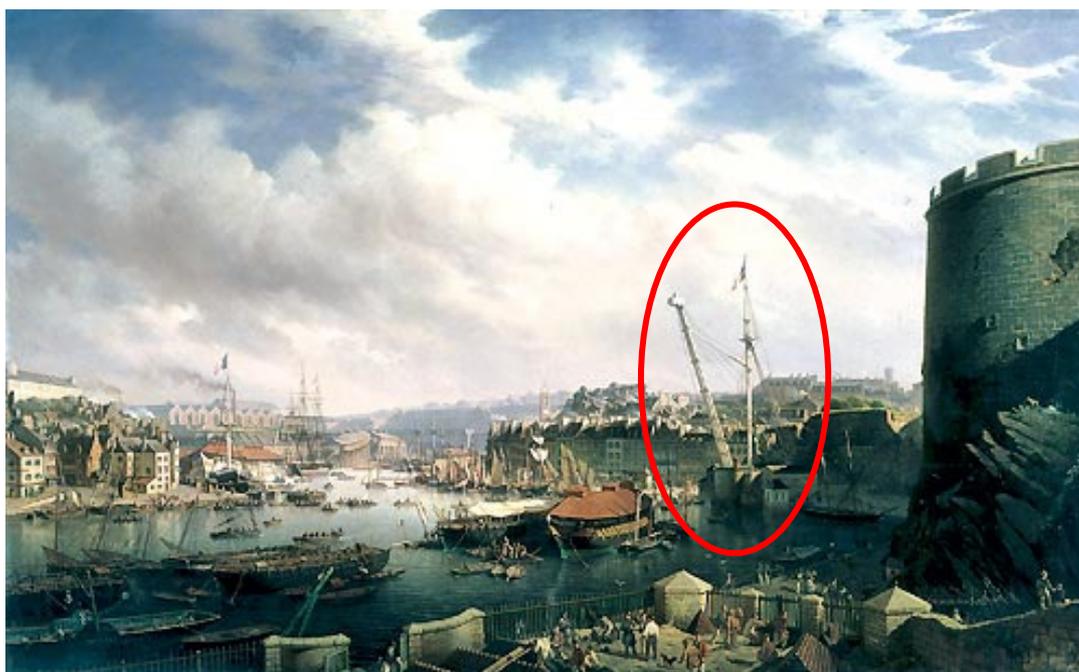


Fig. 6.19. – Le port de Brest en 1854, par Morel-Fatio⁴. Paris, Musée National de la Marine.

La machine à mâter fut démontée en 1877, la nouvelle génération de navires n'utilisant plus la force du vent pour se déplacer⁵. C'est sous cette configuration de la machine à mâter que les observations du niveau de la mer entre 1806 et 1811 ont eu lieu "*dans une petite cabane adossée à la Mâture*" (Bouvard *et al.*, 1843). Aucun document iconographique de cette période ne permet d'identifier clairement cet abri. Ce qui n'est pas le cas de celui voulu par Chazallon, car Magado (1865) écrit : "*Tout à côté de la mâture a été établi un maréographe, appareil ingénieux à l'aide duquel le flux et le reflux tracent, par l'intermédiaire d'un flotteur, une courbe représentative de l'amplitude de la marée sur un papier sans fin se déroulant par un mouvement d'horlogerie*". L'observatoire se trouve au-dessous de la machine à mâter (fig. 6.19). L'agrandissement d'un détail de la peinture

¹ Machine à Mâter. Cette machine sert à mettre en place et à enlever les bas-mâts des vaisseaux.. D'après Magado (1865).

² Petit : Ingénieur et capitaine de vaisseau.

³ Léon Morel-Fatio est un peintre, dessinateur, illustrateur, graveur, aquarelliste, qui est nommé peintre de la marine.

⁴ Léon Morel-Fatio est un peintre, dessinateur, illustrateur, graveur, aquarelliste, qui est nommé peintre de la marine.

⁵ URL : http://www.topic-topos.com/d-finistere_c-brest_obj-290302f8_90_9 (consulté le 5 octobre 2008).

(fig. 6.20) permet de mieux le distinguer. Cet agrandissement permet également de mieux appréhender la base volumineuse de la machine à mâter.



La peinture de Morel-Fatio est-elle fidèle à la réalité ? Divers clichés de cartes postales anciennes datant du début du 20^{ème} siècle permettent d’y répondre (fig. 6.21) :

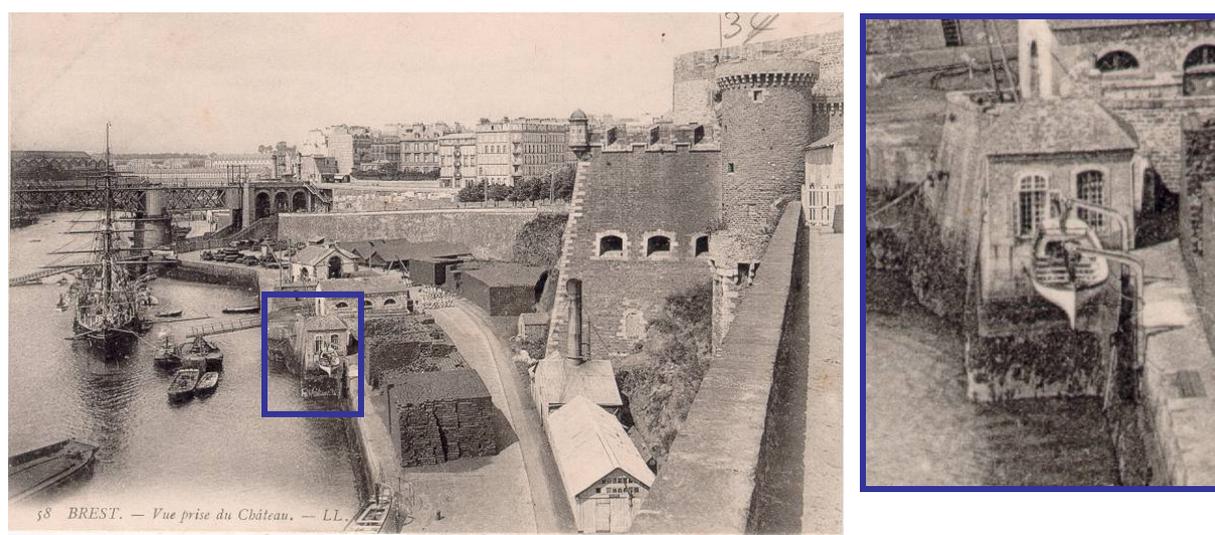


Fig. 6.21 – Carte postale du port militaire de Brest et détail sur l’observatoire, au début du 20^{ème} siècle.

L’observatoire ne semble pas avoir évolué entre 1854 et le début du 20^{ème} siècle. La machine à mâter n’existe plus, mais une partie de sa base semble être conservée. Plusieurs cartes postales anciennes de cette période ont été trouvées, avec des vues prises sous des angles différents. Malgré tous ces clichés, il a été impossible de localiser l’échelle de marée, élément indispensable pour contrôler les hauteurs mesurées par le marégraphe (cf. 5.3.4.1).

¹ Léon Morel-Fatio est un peintre, dessinateur, illustrateur, graveur, aquarelliste, qui est nommé peintre de la Marine.

Une carte postale oblitérée le 21 avril 1936¹ (fig. 6.22) montre le local avec son toit modifié en janvier 1917 (cf. 6.2.1.4).

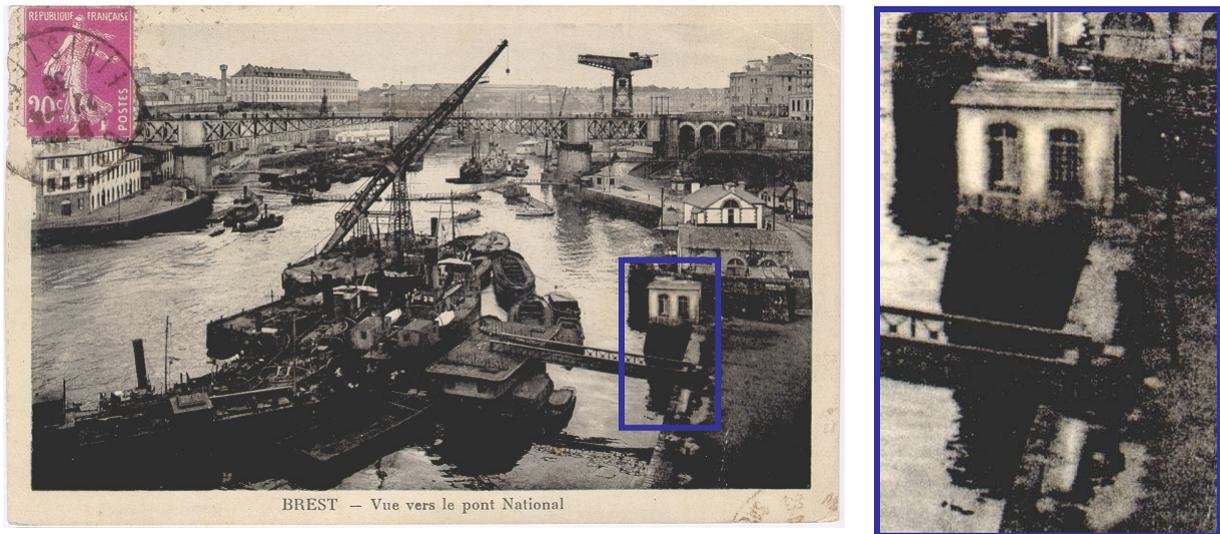


Fig. 6.22. – Carte postale du port militaire de Brest et détail sur l’observatoire, durant les années 1920-1930.

Les figures 6.21 et 6.22 confirment que seul le toit a été modifié, les fondations et les murs n’ayant pas été touchés. Les bombardements de 1944 causent la destruction de l’observatoire. Un nouvel abri pour le marégraphe est construit le long du même quai comme l’illustre la figure 6.23. Le pont de Recouvrance, construit entre 1950 et 1954² indique que ce cliché a été pris après l’édification de cet ouvrage d’art.

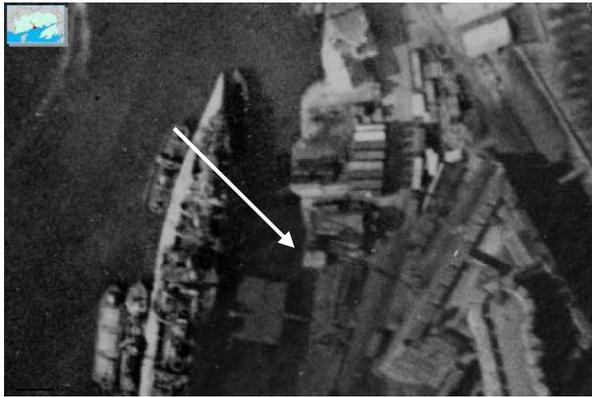


Fig. 6.23 – Carte postale du port militaire de Brest prise après 1954.

La figure 6.23 représente l’observatoire tel qu’il est aujourd’hui. L’échelle de marée (visible sur le zoom) se trouve sur la face sud du bâtiment. Des photographies aériennes de la Penfeld datant de différentes périodes permettent de vérifier que l’observatoire occupe exactement le même emplacement aujourd’hui que celui qui lui était affecté entre 1846 à 1944. (fig. 6.24).

¹ La date du cliché est toujours inférieure à cette date d’oblitération.

² URL : <http://fr.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0002932> (consulté le 5 octobre 2008).



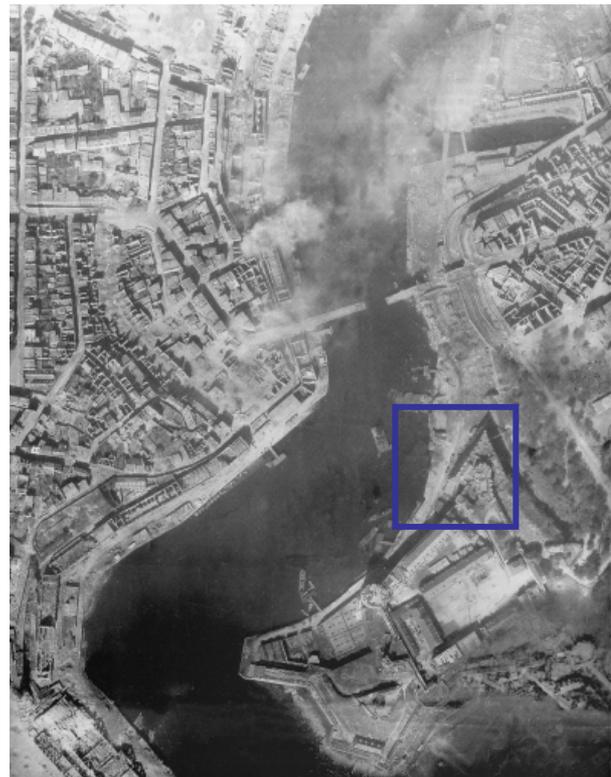
a. En 1929.



b. En 1950.



c. Le 18/03/2004 Google Earth



d. Septembre 1944.

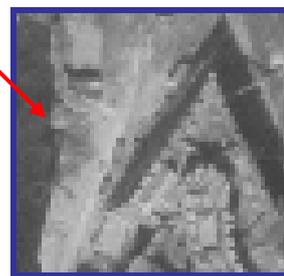


Fig. 6.24 – Photographies aériennes prises à différentes époques au dessus de l’abri du marégraphe. Les flèches montrent l’observatoire. Sources. **A, B** : Archives Municipales et Communautaires de Brest. Copyrights IFREMER, SHOM et Photothèque Nationale ; **C** : Google Earth ; **D** : Secrétariat diapos ; Etat aux Anciens Combattants (SEAC), n° 06_29_04777_NUC_A.

Même si le cliché de la photographie aérienne n’est pas de grande qualité, il permet de constater qu’au moins la partie exondée aux plus hautes mers a été complètement détruite lors des bombardements de 1944. La comparaison des distances entre l’observatoire et la muraille¹ (côté Penfeld) du bastion de Sourdéac pour les différentes époques permet de conclure que la localisation de l’abri n’a pas été modifiée lors de sa reconstruction (fig 6.24. a, b. c.). La destruction du local est confirmé par des indications écrites à même sur le marégramme du 12 au 19 septembre 1949 : " [...] flotteur probablement coincé au sommet du puits [...]"

¹ Pour cela, on considère que la longueur de cette muraille n’a pas varié nous permettant qu’elle devienne notre référence.

enregistrement des grandes marées impossibles [...] le niveau de l'eau a dépassé le sommet du puits. Il y a lieu d'exhausser la partie supérieure du puits de 0^m,55 de briques et ciment". Jusqu'en 1944, ce problème n'avait jamais été rencontré : alors comment aurait-t-il pu en être autrement si au moins cette partie n'avait pas été démolie ?

Une photo des abords de la Penfeld prise en juin 1951 (Boulaire et Le Bihan, 2004, pp.156-157) prouve que l'observatoire fut reconstruit avant ce que croyait le SHOM (communication personnelle Bernard Simon).

6.2.3.4. Bilan sur la localisation des observatoires depuis 1711.

Si l'on écarte les premières observations réalisées au jardin du Roy, deux sites se partagent la localisation des observations du niveau de la mer à Brest depuis 1711 : le bassin Tourville et la Mâtire (fig. 6.25). Le premier site est l'observatoire du 18^{ème} et du début du 19^{ème} siècles tandis que le second prend le relais à partir de 1846 pour ne plus jamais quitter son emplacement. Entre 1807 et 1811 l'emplacement est déjà choisi pour réaliser les mesures commandités par le Bureau des Longitudes (cf. 7.3.1.3).

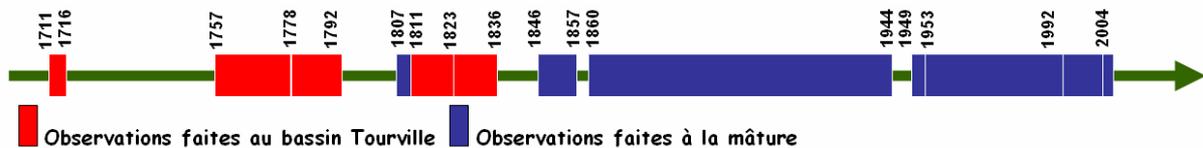


Fig. 6.25 – Frise chronologique des observatoires du niveau de la mer à Brest depuis 1711.

6.3. Pourquoi Brest ?

Cette question peut paraître surprenante à ce niveau de l'étude, mais elle est essentielle. La série marégraphique de Brest possède de nombreux atouts indispensables à l'étude des composantes du niveau marin : niveau moyen de la mer (Douglas, 2001), ondes de marée (Cartwright, 1972), effets météorologiques (Bouligand et Pirazzoli, 1998). Ils montrent que pour réaliser ce genre d'étude, les séries temporelles doivent être au moins supérieures à 70 ans pour tirer des tendances à long terme sur les composantes du niveau marin.

Mais de telles séries marégraphiques sont rares comme le montre Douglas (2001), section 1.2 et fig.1.3. Brest appartient à cette catégorie avec un recouvrement temporel pluri séculaire.

Aujourd'hui, nous disposons d'observations du niveau de la mer à Brest s'étalant sur 300 années qui permettent, dans le contexte des variations générales du niveau de la mer liées au changement climatique de répondre aux questions suivantes :

- Le niveau moyen des mers augmente-il linéairement depuis des siècles ? Pour l'IPCC (2007), cette interrogation est délicate car les études sur l'accélération sont rares, en raison du faible nombre de séries ayant un recouvrement temporel suffisant (cf. 8.1.1.3).

- De combien ? L'IPCC (2007) estime à $1,8 \pm 0,5$ mm/an (entre 1961-2003), la hausse globale du niveau de la mer avec de fortes disparités d'une région à l'autre (cf. 8.1.1.2). Qu'en est-il sur la côte Atlantique française ?

Le nombre des événements extrêmes évoluent-ils ? Bouligand et Pirazzoli (1998) montrent qu'à Brest (1860-1995), la fréquence des surcotes extrêmes a augmenté durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle tandis que les décotes extrêmes ont suivi une évolution inverse.

6.3.1. Intérêt des scientifiques pour cette série marégraphique.

Le travail d'un chercheur est aujourd'hui jugé par le nombre de ses publications dans des revues scientifiques. Cette analyse peut-elle être utilisée pour juger de l'intérêt d'une série de mesures ? Pour leurs travaux originaux, les scientifiques ont besoin de données pour les confronter à leurs théories, à leurs réflexions.

L'inventaire de tous les articles scientifiques à comité de lecture, les comptes-rendus de congrès scientifiques avec et sans comité de lecture et des ouvrages collectifs faisant référence aux observations du niveau de la mer à Brest permet de constater que les mesures sont utilisées au moins à 120 reprises. L'histogramme suivant (fig. 6.26.) permet de voir la distribution des articles utilisant ces mesures au cours du temps. Depuis la période 1680-1700, les données ont toujours été employées pour appuyer la recherche scientifique hormis pour la période de 1740-1760. L'importante utilisation de la série marégraphique constatée depuis les années 1980 doit être mise en relation avec le regain d'intérêt des études s'appuyant sur les observations marégraphiques à partir de cette époque (cf. 5.4.2).

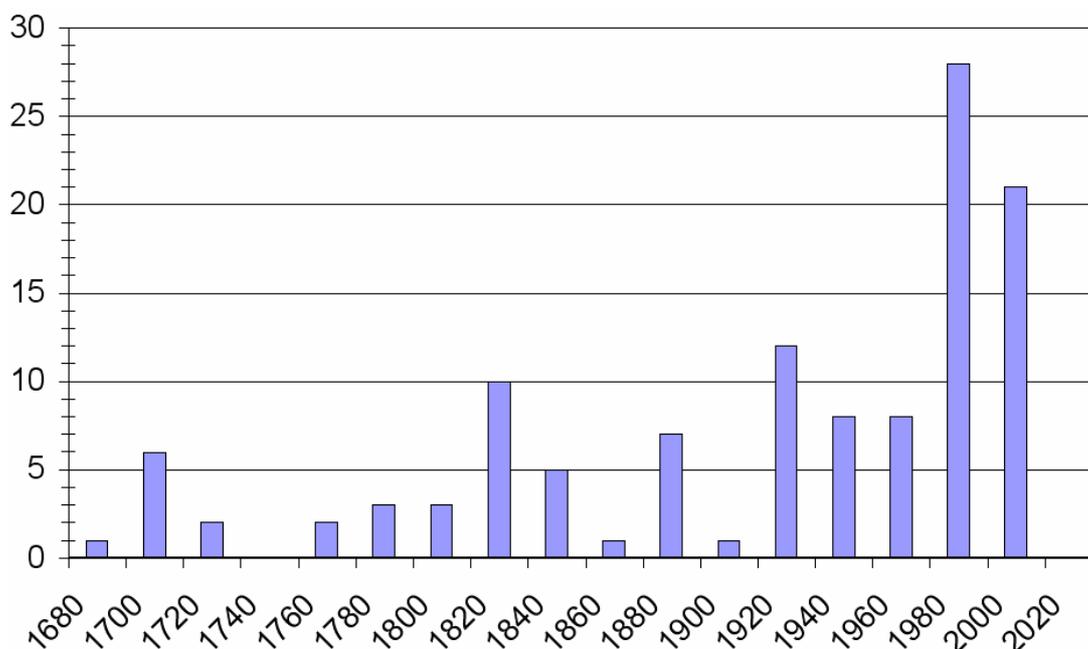


Fig. 6.26. – Répartition temporelle des articles utilisant les mesures du niveau de la mer observées à Brest.

De plus, les moyennes mensuelles et annuelles observées à Brest sont accessibles librement et gratuitement sur la banque mondiale des données du niveau de la mer, le PSMSL¹. Sous la référence 190/091 (pays/station) la série de Brest est celle qui offre les moyennes les plus anciennes contenues sur le PSMSL (COI, 1985). L'acquisition des données par les chercheurs est simplifiée grâce à cette base de données.

Si, pour au moins 120 communications scientifiques, les chercheurs s'appuient sur les hauteurs du niveau de la mer observées à Brest, c'est probablement le fait que cette série revêt un intérêt particulier en plus d'être facilement disponible.

Les valeurs ajoutées à cette série marégraphique : — le doublement temporelle des mesures et le contrôle des données — vont permettre de réaliser une étude plus précise avec l'une des plus longue série du niveau de la mer au monde.

6.3.2. Recouvrement temporel de la série.

Comme nous l'avons vu précédemment (cf. 6.2.1.1 et cf. 6.2.2.1), la série marégraphique de Brest est l'une des plus longues et plus denses au monde (fig. 1.3 et fig. 6.27).

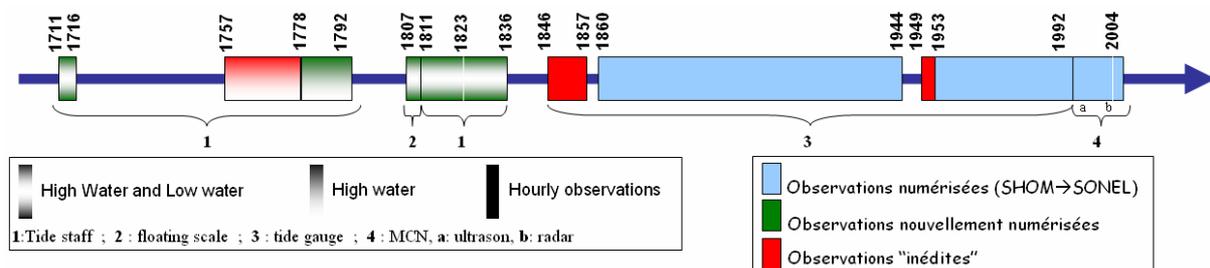


Fig. 6.27 – Frise chronologique de la nature et du type des observations du niveau de la mer effectuées à Brest depuis 1711.

Cela explique l'intérêt de la série suscité auprès des scientifiques (cf. 6.3.1). En effet, pour déceler une évolution climatique, une série de données suffisamment longue est nécessaire (cf. 1.2). L'ajout des observations nouvellement réalisées rend d'autant plus attractives l'utilisation et l'étude de cette série marégraphique (fig. 6.28.a et fig. 6.28. b).

¹ URL : http://www.pol.ac.uk/psmsl/psmsl_individual_stations.html (consulté le 5 octobre 2008).

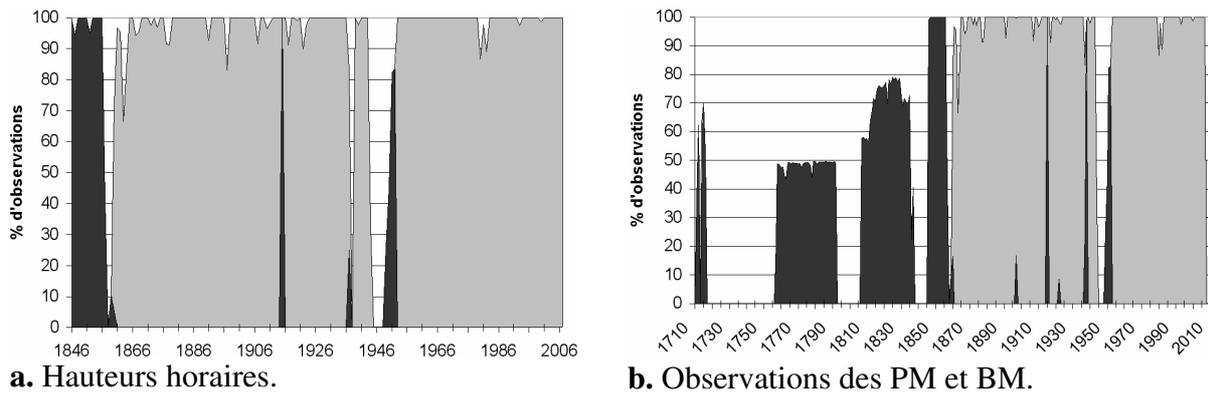


Fig. 6.28 – Pourcentages des observations disponibles sous format numérique en 2004 (gris clair) et nouvellement numérisées depuis (en noir).

L'apport des nouvelles observations permet de doubler la longueur de la série marégraphique (fig. 6.28.b) et de combler plusieurs lacunes qui existaient auparavant.

6.3.3. Métadonnées accompagnant les observations.

Il convient de fournir une définition au terme "métadonnée" : il s'agit d'une donnée servant à définir ou décrire une autre donnée. Ici, en plus des mesures retrouvées, de très nombreuses métadonnées ont été découvertes. Elles revêtent ici différentes formes comme l'historique de l'instrumentation que de l'historique de l'implantation, mais pas seulement : méthodes employées pour obtenir les données, système de temps et hauteurs utilisés, référence zéro des appareils employés, contrôle des mesures, liste des observateurs, détails sur les conditions météorologiques ainsi que sur la vie de l'observatoire.

Les métadonnées sont essentielles pour celui qui cherche à étudier les longues séries. Elles permettent d'expliquer un certain nombre d'incohérences dans les mesures comme des ruptures visibles ou mal détectées. Elles sont indispensables également dans l'homogénéisation des différents jeux de données entre eux et pour permettre d'appréhender au mieux les incertitudes de mesures.

6.3.4. Caractéristiques du site.

Laplace n'hésite pas, dès le début de son *"Mémoire sur le flux et reflux de la mer"* imprimé en 1789, à décrire le port de Brest *"comme l'un des plus favorables aux observations des marées [...] Ce port doit probablement cet avantage à sa position avancée dans la mer, et surtout à ce que sa rade ayant une entrée fort étroite, relativement à son étendue, les oscillations irrégulières des eaux de la mer sont par là très affaiblies"*. Ces caractéristiques géographique, géologique, géomorphologique, bathymétrique, anthropique,

hydrologique, hydrodynamique et météorologique détaillées dans les sections 6.1 à 6.1.7.3 expliquent pourquoi Brest est unique pour observer le niveau de la mer. La houle, peu présente à l'intérieur de la zone d'observation, limite les incertitudes de mesures sur les observations, notamment pour les lectures à l'échelle de marée.

Dans le contexte des variations globales du niveau de la mer liées au changement climatique, la série marégraphique de Brest revêt aujourd'hui, plus encore qu'hier, d'une importance majeure à la compréhension des variations climatiques récentes sur le niveau marin de la côte Atlantique française.

Chapitre 7. Construction d'une série temporelle homogène et contrôles de la qualité des données.

"The historical data rescue program [...] has allowed the enhancement of French climatological heritage [...] Climate change study using raw long-term data is hazardous due to many breaks caused by displacement of meteorological stations, replacement of sensors, modifications of the local environment, etc. Long term data homogenization appeared as an imperative step prior to calculating long-term trends". Moisselin J.-M. et O. Mestre. Research, Digitisation and Homogenization of Long-Term Data Series (2002).

Construire une série temporelle homogène, à partir de jeux de mesures hétérogènes obtenus dans un secteur géographique limité, nécessite de connaître la relation entre les différents référentiels utilisés pour mesurer les hauteurs d'eau et le temps. Alors que le temps utilisé pour un lot de données peut-être identifié et corrigé grâce à l'étude des écarts en temps entre les observations et les prédictions, les connexions des hauteurs entre les différents zéros nécessitent de s'appuyer sur les métadonnées disponibles.

Ces mêmes métadonnées sont indispensables pour expliquer des anomalies détectées lors des contrôles des valeurs (cf. 6.3.3). Comme peu de chercheurs se sont intéressés aux mesures anciennes du niveau de la mer, peu de traitements et de méthodes d'analyse existent. Cela explique la pauvreté bibliographique dans ce domaine de recherche en France. Des traitements ont été conçus pour s'assurer de la fiabilité des données provenant des observations car étudier, par exemple, des variations du niveau moyen annuel de la mer de l'ordre du millimètre oblige à avoir des mesures de la meilleure qualité possible et à en connaître les barres d'erreurs. L'analyse statistique des résidus en temps et en hauteur, différences entre les observations et les prédictions de marée, confirme notamment cette fiabilité mais pas seulement.

Woodworth (2006) fait un bilan des études menées sur le changement du niveau de la mer sous la forme de questions. Il explique que les longues séries marégraphiques denses, corrigées des mouvements verticaux permettent d'estimer la tendance du niveau de la mer. En revanche, il critique le fait que les séries d'observation sont étudiées sans qu'il ne soit pris en compte leur qualité.

Ce chapitre revient d'abord sur la construction de la série temporelle homogène à Brest depuis 1711 avec l'article paru en 2006 dans le journal *Ocean Dynamics* puis nous le compléterons en apportant les compléments d'informations obtenus depuis. Enfin, nous

approfondirons la question des contrôles et de la qualité des jeux de mesures grâce à différents outils statistiques simples.

7.1. Article paru en 2006 dans *Ocean Dynamics*.

L'article : *Brest sea level record : a time series construction back to the early eighteenth century*, paru en 2006 dans la revue *Ocean Dynamics* détaille, après une courte introduction sur les observations du niveau de la mer en France, la construction de la série du niveau de la mer à Brest sur près de 300 ans. Cette construction repose sur notre connaissance des jeux de mesures ainsi que sur l'unification des références verticales et sur la cohérence avec le système de temps choisi, c'est-à-dire le TU. Le contrôle qualité des données a permis de détecter plusieurs erreurs notamment la correction en temps d'une partie des mesures de 1711 à 1716. Enfin, l'utilisation du MSL ou du MTL pour l'étude des tendances montre que les résultats obtenus sont identiques nous permettant de calculer la tendance de l'évolution du niveau de la mer depuis 1807.

Guy Wöppelmann · Nicolas Pouvreau · Bernard Simon

Brest sea level record: a time series construction back to the early eighteenth century

Received: 17 July 2005 / Accepted: 31 August 2005 / Published online: 21 March 2006
© Springer-Verlag 2006

Abstract The completeness and the accuracy of the Brest sea level time series dating from 1807 make it suitable for long-term sea level trend studies. New data sets were recently discovered in the form of handwritten tabulations, including several decades of the eighteenth century. Sea level observations have been made in Brest since 1679. This paper presents the historical data sets which have been assembled so far. These data sets span approximately 300 years and together constitute the longest, near-continuous set of sea level information in France. However, an important question arises: Can we relate the past and the present-day records? We partially provide an answer to this question by analysing the documents of several historical libraries with the tidal data using a ‘data archaeology’ approach advocated by Woodworth (*Geophys Res Lett* 26: 1589–1592, 1999b). A second question arises concerning the accuracy of such records. Careful editing was undertaken by examining the residuals between tidal predictions and observations. It proved useful to remove the worst effects of timing errors, in particular the sundial correction to be applied prior to August 1, 1714. A refined correction based on sundial literature [Savoie, *La gnomique*, Editions Les Belles Lettres, Paris, 2001] is proposed, which eliminates the systematic offsets seen in the discrepancies in timing of the sea level measurements. The tidal analysis has also shown that shallow-water tidal harmonics at Brest causes a systematic difference of 0.023 m between mean sea level (MSL) and mean tide level (MTL). Thus, MTL

should not be mixed with the time series of MSL because of this systematic offset. The study of the trends in MTL and MSL however indicates that MTL can be used as a proxy for MSL. Three linear trend periods are distinguished in the Brest MTL time series over the period 1807–2004. Our results support the recent findings of Holgate and Woodworth (*Geophys Res Lett*) of an enhanced coastal sea level rise during the last decade compared to the global estimations of about 1.8 mm/year over longer periods (Douglas, *J Geophys Res* 96:6981–6992, 1991). The onset of the relatively large global sea level trends observed in the twentieth century is an important question in the science of climate change. Our findings point out to an ‘inflexion point’ at around 1890, which is remarkably close to that in 1880 found in the Liverpool record by Woodworth (*Geophys Res Lett* 26:1589–1592, 1999b).

Keywords Sea level changes · Tide gauge records · Climate change · Brest

Introduction: short history of sea level observation in France

We owe to the astronomers Jean Picard (1620–1682) and Philippe de la Hire (1640–1718) the first tidal measurements performed at Brest in 1679 (Picard and de la Hire 1680). The exercise lasted for 10 days. It was repeated several years later over a longer period, from June 6 to October 31, 1692 (Cassini 1713). Continuous observations of the sea level proved to be worthwhile for investigations on astronomical parameters of the Sun and the Moon. Henceforth, in 1701, the Académie Royale des Sciences started systematic observations of the tides at the major ports of France with the support of the Navy; their Professeurs d’hydrographie were asked to carry out the observations according to concise rules established by Goüye and de La Hire (1701). Although it started late (1711), the Brest series proved to be valuable to Pierre Simon de Laplace (1749–1827). He assessed his hydrodynamic tidal theory in 1790 by analysing the 1711–1716 data (Laplace

Responsible editor: Phillip Woodworth

G. Wöppelmann (✉) · N. Pouvreau
Centre Littoral de Géophysique
(CLDG)-University of La Rochelle, Avenue Michel Crépeau,
17042 La Rochelle, France
e-mail: gwoppelm@univ-lr.fr
Fax: +33-546458249

B. Simon
Etablissement Principal du Service Hydrographique et
Océanographique de la Marine (EPSHOM)-13,
rue du Chatellier, B.P. 30316, 29603 Brest, France

1790), partially recovered by Joseph Jérôme de Lalande (1732–1807) and published in 1781. Appreciating the need for longer time series to separate the tidal constituents, Laplace instigated the setting up of a new sea level station at Brest, where observations have been performed in various forms with respect to the same datum from 1806 until the present day. The data from the year 1806 were considered of poor quality and were subsequently not preserved (Anon 1843).

For several decades, monthly and annual mean sea level values from Brest have been made available to scientists through the Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) databank, making it useful for long-term sea level change studies (Woodworth and Player 2003). When high water (HW) levels recorded daily at Brest between 1778 and 1792 were discovered in 2000, we decided to carry out a systematic survey of the numerous historical French archives that may contain sea level observations. This investigation continues but has already proved valuable: A large amount of records have been discovered so far for the eighteenth and nineteenth centuries. In particular, the 1778–1792 Brest data set could be extended backwards to 1756. Long sea level records turn out to be more numerous than the two well-known Brest and Marseille records. This is not very surprising when looking back at history, since France and the United Kingdom were pioneers in sea level observation and recording (Cartwright 1999).

'Archaeological' data are valuable today in the context of climate changes due to global warming. Difficulties like data localisation often arise. The different fragments of information have travelled around the archives during the centuries with a logic that escapes our understanding today. For instance, we found observations of Fort Boyard, Bay of Biscay (1873–1909) in Brest, and the meta-data that explain

how they were performed in Rochefort-sur-Mer. This example is not unique. Such activities, data recovery and subsequent data analysis would legitimate "archaeo-mareography" as a new discipline. Important questions must be resolved for these records before any climate study can be undertaken on them. These questions are concerned with the consistency of the past data with those measured by modern gauges: Can they be related to a common datum? What is their quality? Can quantities like mean tide level (MTL) or mean high waters (MHW) be used as proxies for mean sea level (MSL)? The next sections address these important questions for the Brest case study.

Constructing a comprehensive time series

Sea level data sets

Table 1 summarises the various data sets that are presently available for Brest. A data set defines a comprehensive set of observations that are related to the same location and gauge.

The observing sites are within short distance from each other, about 300 m between La Mâtire and Bassin de Brest. This latter basin was sometimes referred as Bassin de Troulan or Bassin Tourville in the literature (Levot 1865). It was built by Vauban (1633–1707) between 1683 and 1687. The former sites of Jardins du Roy and Pointe de la Rose designate the same emplacement at the entrance of the harbour, less than 400 m from La Mâtire and 700 m from Bassin de Brest. Figure 1 displays a map with the different observing sites.

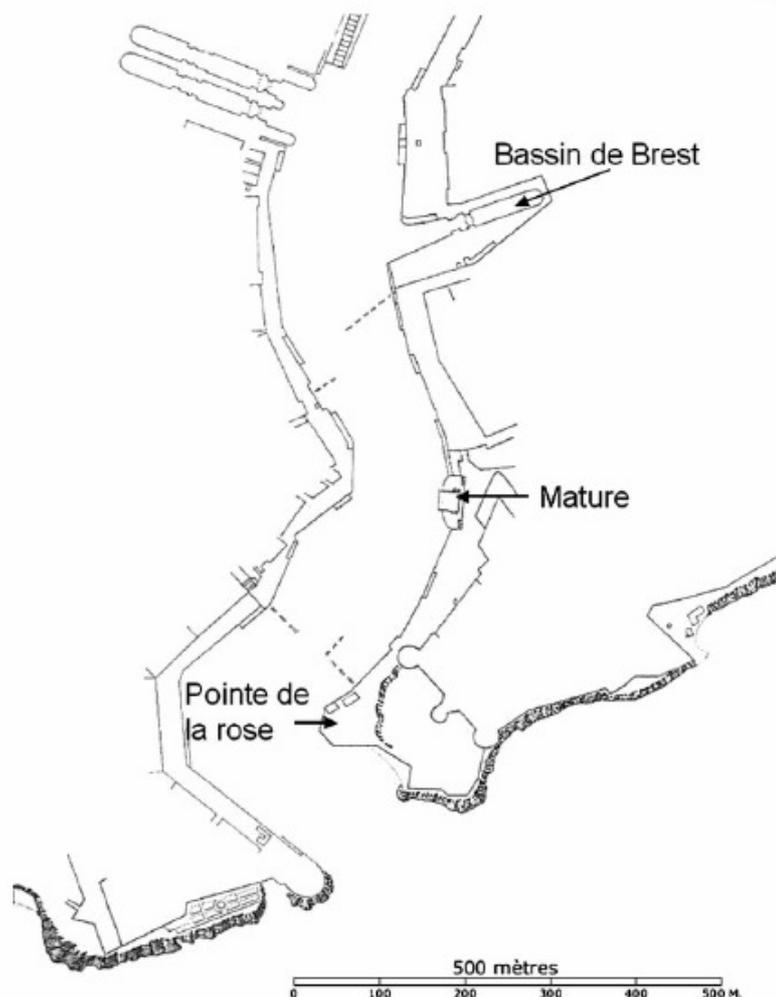
Sea level observations prior to 1842 were made at tide staffs. The observations usually consisted of high and low

Table 1 Overview of sea level data sets at Brest

Set	Period	Location	Gauge	Type	Historical archive
1	1679/09 (8 days)	Jardins du Roy			Acad. des Sciences
2	1692/06–1692/10	Pointe de la Rose	Marker 'Rocher de la Rose'	HLW	Obs. de Paris
3	1711/06–1716/09		Tide staff '1'	HLW	Obs. De Paris
4	1757/08–1778/06 1778/01–1792/12	Bassin de Brest	Tide staff '2'	HW	Acad. des Sciences Obs. de Paris
5	1807/01–1811/12	La Mâtire	Tide staff 'A'	HLW	EPSHOM
6	1810/01–1810/12 1812/01–1836/04 1837/05–1837/09 1850/01–1850/12 1817/01–1817/12 1819/06–1832/10	Bassin de Brest	Tide staff '3'	HLW	EPSHOM Service Hist. Rochefort Archives Nationales
7	1846/01–1857/06 1860/05–1944/06 1856/01–1856/12	La Mâtire	Tide gauge 'A'	Hourly HLW	EPSHOM
8	1953/01–ongoing		Tide gauges	Hourly	EPSHOM

A data set is defined as a comprehensive set of observations with respect to same location and gauge. Two types of observations can be distinguished: (i) high and low waters (HLW), sometimes only high waters (HW), and (ii) hourly data. Note: the observations of the year 1713 were never found (Lalande 1781)

Fig. 1 Map of Brest harbour showing the locations of the different observing sites



water (HLW) levels measured in 'pieds', 'pouces' and sometimes 'lignes'. The relationship to the metric system is given by 1 pied=12 pouces=144 lignes=0.32484 m (hereafter, all feet and inch values refer to these French units). In 1842, Rémy Chazallon (1802–1872) devised an automatic recording sea level gauge for which he was rewarded with a silver medal by the 'Société d'Encouragement' (Chazallon 1859). A first gauge was installed at Toulon in 1842 and at Brest in December 1845. Two main types of observations can therefore be distinguished in Table 1: (i) observations of HLW, sometimes only HW were recorded, and (ii) hourly data. Of particular interest are the newly discovered observations of HW that cover the period 1757–1792, as well as the HLW data of 1810, 1812–1837, 1850 and 1856, last but not the least is the 12 years of tide gauge hourly data covering the 1846–1857 period, tabulated in books from the tide gauge readings. The 1757–1792 record is unique in the fact that no exact time is provided, just the indication of HW. Accurate tidal predictions however may help overcome the lack of time information.

Datum reconstruction

Ever since the first automatic tide gauge was installed in Brest, sea level observations have been performed at the same location, La Mâtüre (see Table 1). Courtier (1933) points out that the first tide gauge and its associated tide staff were installed by Chazallon in such a way that their zeros were coincident with the zero of the tide staff at Bassin de Brest. This information is confirmed in SHOM (1861). Courtier (1934) further reports that every guarantee on the datum connection was provided. He considers the datum control carried out by Ing. Trotté de la Roche in 1839 at Bassin de Brest and concludes that all observations carried out since 1810 (data sets 6, 7 and 8 in Table 1) are referred to a common datum, the so-called 'Zéro hydrographique' (ZH). This datum is a local datum determined with respect to a set of benchmarks. It was established in 1816 by Charles de Beautemps-Beaupré (1766–1854), who adopted the zero of the tide staff from Bassin de Brest as chart datum (Bajot 1824). SHOM (1933) indicates that

the datum of the data set 5 in Table 1 is 4.405 m above the chart datum. The discovery of 1 year of raw HLWs simultaneously performed in 1810 at both sites, Bassin de Brest and La Mâtüre, allowed us to confirm this value to be 4.415 ± 0.001 m.

These facts enabled us to construct with confidence a composite sea level record from the combined Mâtüre and Bassin de Brest data, starting in 1807 and still ongoing; these values are all expressed with reference to the same datum, the ZH. The ZH was changed at Brest in the mid-1990s for local navigation purposes (Simon and Lahaye-Collomb 1997). A constant of 0.5 m was applied to convert the sea level values prior to January 1996 into the new ZH. Figure 2 shows the relationships between the tide staff zero, the tide gauge benchmark (TGBM), and outlines the constants applied to the data from the different records to refer the data to the ZH.

The connection of the eighteenth century records to the composite Brest time series starting in 1807 is very challenging. An extensive investigation of the historical archives has been started on this issue. We present here the main facts that have been assembled so far. The 1756–1778 and 1778–1792 records of set 4 in Table 1, although found at different archives, are definitely referred to the same tide staff zero as Lalande stated in 1781. This was confirmed by the careful examination of the six overlapping months in both records, from January to June, 1778. Historical documentation shows that tide staffs were usually installed in such a way that their zero coincided with the level of the dock sill. This is clearly stated in Thevenard (1778). Lalande (1781) provides an even more detailed description of the tide staff installation at Bassin de Brest. The practical navigational rule of installing the tide staff zero coincident with the level of the dock sill was still in use in the early nineteenth century (Anon 1843). However, the tide staff zero from the 1807 onwards records is clearly not the same as that from the eighteenth century. An explanation can be found in Clairbois and Blondeau (1785): The Bassin de Brest was deepened by 5 ft in 1783. The authors state that

the deepening was the only conversion undertaken to the basin. The 1756–1792 time series presents no evidence of discontinuity at around 1783, showing that the tide staff did not undergo any change either. However, the installation of a new tide staff somewhere between 1792 and 1806 followed the above mentioned practical rule and should subsequently be 5 ft below the previous one. Levot (1865) reviews the history of Bassin de Brest. He confirms the digging of Bassin de Brest by 5 ft and reports that no other significant conversion was carried out at Bassin de Brest up to 1864. Considering the existence of Bassin de Brest since 1687, the ‘Académie de Marine’ building a few metres from there and the practical rules of observation in use, we plotted the 1711–1716 and 1756–1792 HW records together with the 1846 onwards data (the ‘Tide staff data’ section explains how HWs are derived from the hourly values). Figure 3a gives a first idea of the consistency of the HW level time series when applying a 5 ft correction to the eighteenth century records. The annual MTL are displayed alongside the annual MHW for comparison purposes (Fig. 3b). The ‘MSL vs MTL’ section details how the MTL values were obtained.

The moon nodal cycle of 18.61 years clearly appears in the MHW time series (Fig. 3a). Its amplitude is estimated to be 0.065 m with a formal error of 0.004 m. A piecewise linear trend was removed over the period 1711–2004, with breakpoints at 1800 and 1890 before fitting the amplitude and phase of the nodal cycle to the annual MHW values in the least-squares sense. The root mean square (RMS) of the residuals is 0.034 m. The ‘bump’ around 1915 in the MTL time series, also visible in a MSL plot, has not found any explanation yet. By comparing both curves in Fig. 3, one can observe that this bump might also have been more apparent in the MHW time series if it had not been coincident with a low phase of the nodal cycle.

The question which naturally arises then is: What is the accuracy of the 5 ft adjustment value? Levelling and civil engineering techniques were able to provide results at the millimetre level precision, but did they care to get such a

Fig. 2 Relationship between tide staff zeros, tide gauge benchmark and datums at Brest

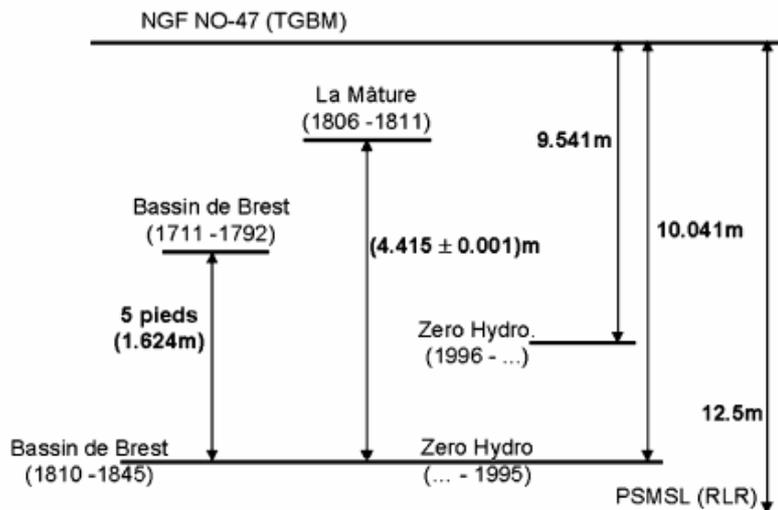
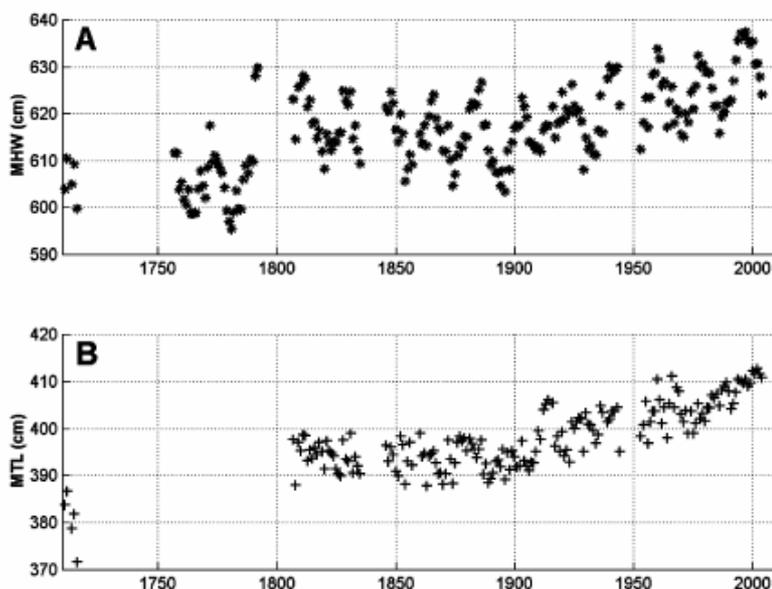


Fig. 3 Annual mean high water levels (a) and annual mean tide levels (b) for Brest, assuming the relationships given in Fig. 2



precision in the estimation of this value? Millimetre to centimetre level precision were common standards at the time in hydraulic engineering. Still it is remarkable that the correction is exactly 5 ft. Is the reported value the exact number derived from the measurements or a rounded number? In the latter case, the uncertainty of the 5 ft value could be as large as 0.08–0.16 m (quarter to half of a foot). The issue deserves further investigation to reduce the present level of uncertainty. Several historical archives have not been investigated yet, in particular the civil engineering archives at ‘château de Vincennes’ in Paris and at ‘Ponts et Chaussées’ in Mame-la-Vallée. Most of the Bassin de Brest has remained unchanged since its construction according to Monsieur Littoux, historian of the Naval constructions in Brest (DTM), specialising in basins and docks (personal communication). The techniques used to dig the basin did not move any of the stones of the basin walls. Hence, if a plan were to be found with precise quotations of the dimensions or levels of the main structures of Bassin de Brest, we might recognise them and perform a levelling to present-day TGBMs.

Addressing the question of data quality

The main approach used to control the quality of Brest observations is based on the inspection of the residuals that are obtained from the harmonic analysis of the hourly heights of sea level. We used the MAS software for this purpose, a set of programs developed by B. Simon at SHOM which implements a general method for analysing hourly sea level heights. It basically provides tidal predicted values, residuals (predicted minus observed) as well as values for harmonic constituents. The standard list consists of 143 constituents, but it can be extended. Con-

sidering the large data span available at Brest, a set of 247 tidal constituents was estimated on the basis of best quality measurements over the 1846–2005 tide gauge period. These are the constituents that were used hereafter to compute the tidal predictions and derive the residuals (with an assumption of no significant change in the ocean tide at Brest in the intervening period). Several quality control iterations were required. Residuals were manually inspected leading to the examination of the records and subsequent corrections where appropriate. Correcting large data sets in such detail is an arduous and time-consuming task, but it proved to be worthwhile. For example, we may mention the several years of data published by PSMSL, which were identified as those corrected for the inverse barometer (1937, 1939–1943). The registers at SHOM had several columns with tabulated values; a misunderstanding led to the barometer-corrected values instead of the true observations being supplied and published.

Sundial correction: 1711–1714

When dealing with long records covering several centuries, attention has to be given to time system definitions: ‘apparent solar time’, ‘mean solar time’... and their application, legal and practical. To reduce the time of sea level observations into the standard time system [universal time (UT)], the following corrections were applied to the Brest 1711–1716 record:

- correction from apparent solar time to mean solar time at Brest by applying the ‘equation of time’ given in Savoie (2001);
- correction from mean solar time to UT by adding 17.98 min, a value corresponding to the difference in longitude between Brest and Greenwich

An additional correction is required to the observations prior to August 1, 1714. On August 1, 1714, M. Coubard discovered and corrected an error in the alignment of the sundial. Cassini (1720) reports that the correction to apply is -17 min. However, an analysis of the residuals between predicted and observed times of HLWs for 1711–1716 suggests that the correction should not be a mere constant (Fig. 4a).

The literature on sundials confirms this result (see, for instance, Savoie 2001). It is a function of the Sun's position and the misalignment angle (d) of the sundial's style towards the North celestial pole, which can be computed from (Savoie 2001)

$$T = H - F = d \cdot (\cos \phi \cdot \tan \delta \cdot \cos H - \sin \phi)$$

where the various quantities are explained in Fig. 5.

Assuming M. Coubard checked the sundial at noon July 31, 1714, as it was usually performed in the Navy (Beautemps-Beaupré 1829), we obtain a misalignment angle (d) of 7.69° corresponding to the -17 min error in time at noon. Figure 4b shows that the subsequent time correction reduces the time residuals oscillation in Fig. 4a, but a bias can be seen, as well as a remaining slight oscillation. After several tests, we found that if the misalignment angle (d) was 5.87° , corresponding to a time error of -13 min instead of -17 min, the bias disappears (Fig. 4c). It is interesting to note in Fig. 6 that this latter correction has an average value of -17 min, which corresponds to the value mentioned by Cassini (1720), although he did not specify that it was meant as an average correction.

Figure 4c shows a dispersion of about 6.5 min (standard deviation) in the residuals between predicted and observed

times of HLWs. This dispersion is consistent with what might be expected for a tidally dominated location, where the presence of surges can alter the levels of HLWs but not affect their times to any great extent.

Tide gauge data

The errors associated with the tide gauges are complicated to assess. One way of doing this is by looking at the non-tidal component of the observed sea level values, that is the residual between predicted and observed heights of sea level. Figure 7 shows annual RMS of hourly differences between predicted and observed water levels after removal of daily mean differences, which amounts to filtering out the fluctuations with a period longer than a day. The original purpose of this procedure was to evaluate the consistency between observations and predictions, but it also proved to be very helpful for detecting observation defects. The figure shows a constant value of about 0.05 m until the year 1945, when the tide gauge was destroyed during Brest bombing at the end of World War II. After reconstruction in the 1950s, the quality of the observations deteriorated, this can be seen in the RMS increase. Better figures were obtained after 1990 when a modern digital tide gauge was installed.

The comparison with the adjacent sea level record of Newlyn, UK, provides an external means to evaluate the quality of the Brest tide gauge data. Newlyn is located about 200 km from Brest. Its MSL values were obtained from the 'Revised Local Reference' data set of the PSMSL. The signal structure is very similar in both records: the zero-lag correlation coefficient of the detrended monthly MSL time

Fig. 4 Residuals between observed and predicted times of the 1711–1716 high and low water levels record when various corrections are considered. **a** A constant correction of -17 min. **b** A correction function of the Sun's position with a misalignment angle corresponding to -17 min on August 8, 1714. **c** Same correction as **b** with an adjusted angle to minimise the residuals

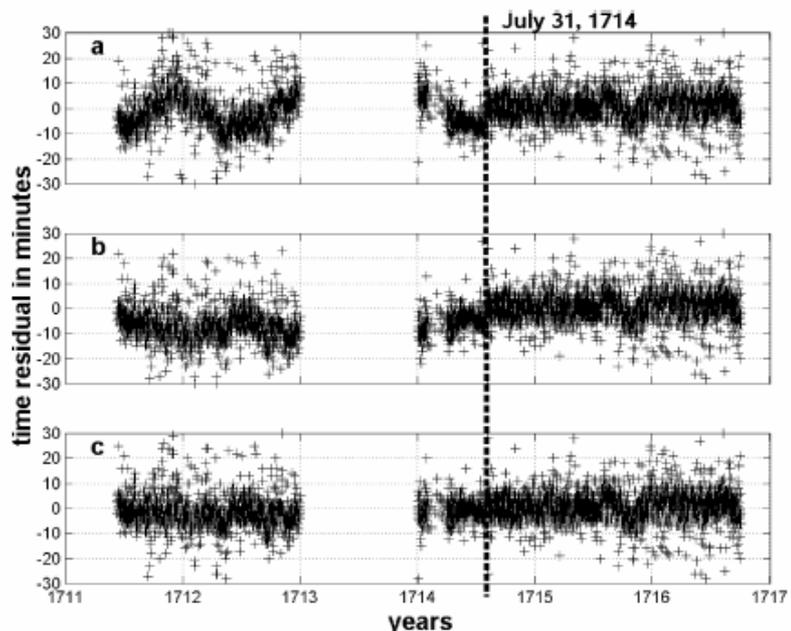
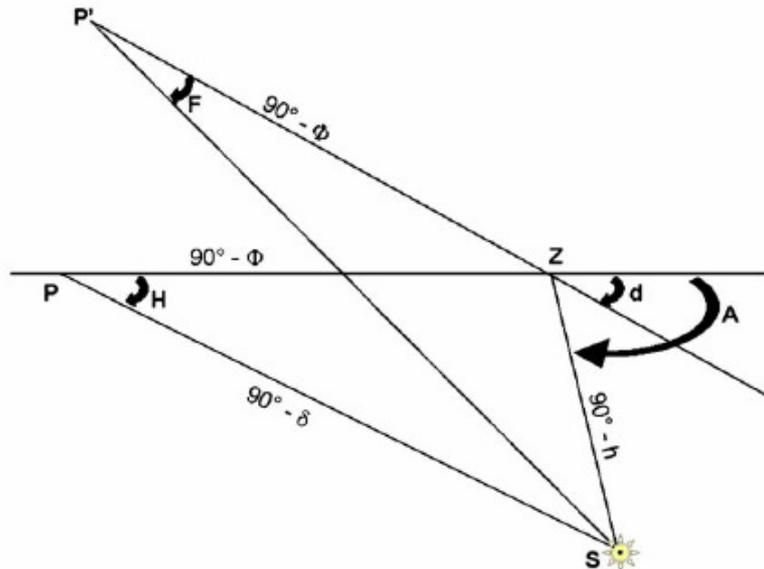


Fig. 5 Geometry of the problem of a misaligned sundial's style, from Savoie (2001). Z zenith, S Sun, P true pole, P' sundial's pole (style), ϕ latitude of the site, δ Sun's declination, A Sun's azimuth, h Sun's height, F erroneous time angle, H true time angle, d gnomonic orientation error



series over the common period of 1916–2003 is 0.90, significant at the 99% confidence level, reflecting a coherent sea level variability mainly due to seasonal steric and meteorological effects. The RMS of the detrended annual MSL differences is 0.02 m. This value is within the range of 0.01 to 0.03 m as reported by Woodworth (2003) for ‘high-quality’ records. The trends are 1.75 ± 0.11 mm/year for Newlyn and 1.31 ± 0.13 mm/year for Brest over the common period 1916–2003. The values are consistent with the literature (see, for instance, Douglas 1991; Araujo et al. 2002). The differential trend of 0.43 mm/year may come

from different vertical movements of the land where the tide gauges are settled. According to Peltier (2001), the difference cannot be attributed to postglacial rebound. The magnitude of this effect is almost identical at both sites: 0.25 vs 0.26 mm/year.

Tide staff data

Figure 8 shows similar statistics as Fig. 7 for the HLW levels. To get a relative idea of the data quality with respect to the

Fig. 6 Summary of the various time corrections that have been tested

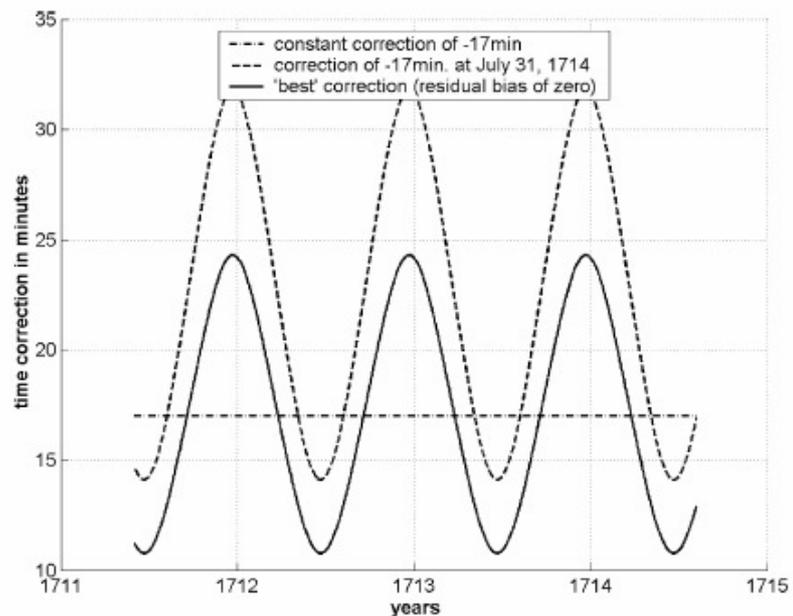
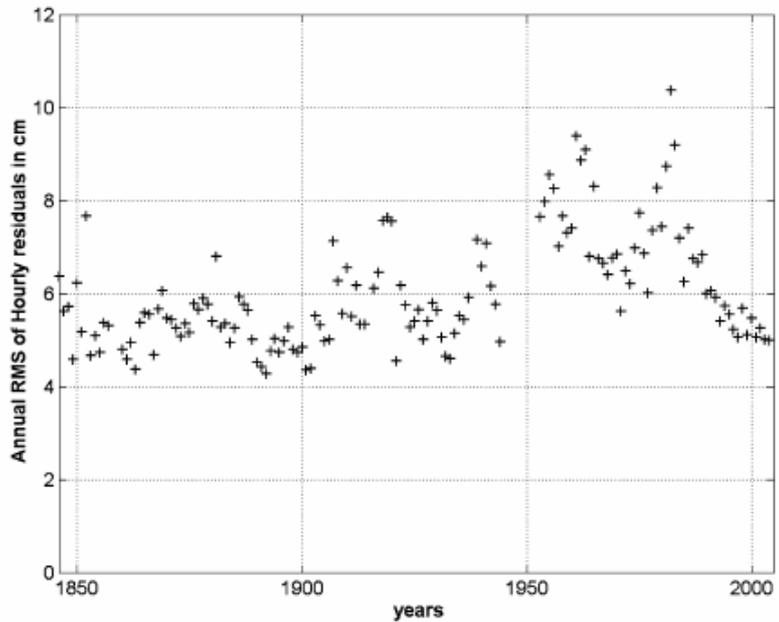


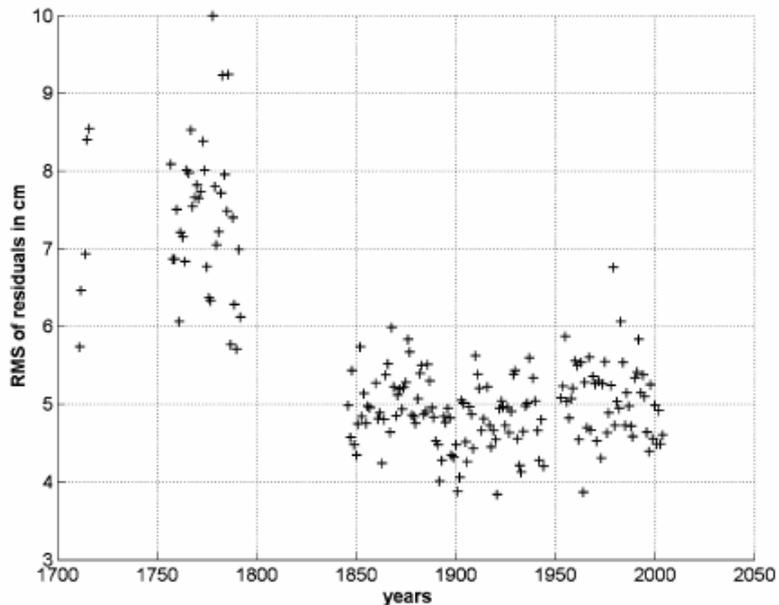
Fig. 7 Annual RMS values of residuals between predicted and observed hourly values of sea level after removal of daily mean differences



tide gauge era, HLW levels were computed from the hourly heights using a cubic spline interpolation procedure. The cubic spline functions are fitted to four consecutive hourly heights around the extreme values. The discovery of both HLW observations and hourly tide gauge tabulated values for the year 1856 allowed us to test the ability of the cubic spline procedure to accurately interpolate the HLW levels. The results show that HWs are underestimated systematically by about 4 mm, while low waters are overestimated by 3 mm. This sums up to a systematic underestimation of the mean

tidal range of 7 mm, which is a value slightly larger than the 4 mm found by Woodworth et al. (1991) for Liverpool. Figure 8 confirms an annual RMS of about 0.05 m for the tide gauge observations, while the tide staff observations show a larger RMS of about 0.06–0.08 m, sometimes more. Such larger RMS values are consistent with the difficulty of precisely reading the tide staff in a moving water level. The tide gauge stilling well reduces this problem. Tide staffs were usually graduated in inches prior to the introduction of the metric system in the 1790s. This was the

Fig. 8 Annual RMS values of residuals between predicted and observed high and low water values of sea level after removal of daily mean differences



case for the tide staffs at Brest even up to 1835 (Anon 1843). The distribution of inch values for the foot-inch measurements in the 1757–1792 record (Fig. 9) gives an idea of the rounding of the heights and the subsequent uncertainties related to these measurements (Woodworth 1999a). If HLWs were recorded to the nearest inch, every value from 0 to 11 would a priori be represented approximately an equal number of times in the distribution, about 2000 times in average (Fig. 9). Two values however exceed by far the average, 0 and 6. Figure 9 shows that these exceeding values are mostly compensated by two deficit values either side of them: 11 and 1 either side of 0, and 5 and 7 either side of 6. An uncertainty of the order of 1–2 in. in measurements from the sole rounding effect can therefore be inferred. The two intermediate values, 0 and 6, might have been preferred in the presence of high sea states, in which case the associated uncertainty must have been larger. But as Pugh (1987) and Woodworth (1999a) point out, the statistical errors would reduce to millimetre accuracy in monthly or annual averages, although each individual observation was measured with an uncertainty of several centimetres, as long as few data records are missing in the series, and there are no systematic errors in the readings.

MSL vs MTL

Influence of non-linear tidal waves

MTL is defined as the average of the HLW levels in a specified period (see, for instance, Pugh 1987). MTL is not the same as MSL, because the tidal curve is not necessarily symmetrical with respect to the mean level. The difference depends on the form of the curve, which is influenced by shallow-water tidal harmonics. The systematic difference

may be computed from following equation derived from the theory of tidal harmonic analysis (see, for instance, Pugh 1987 or Simon 2005):

$$\begin{aligned} MSL - MTL &= A_{M_4} \cos(2 \cdot g_{M_2} - g_{M_4}) + A_{M_8} \cos(4 \cdot g_{M_2} - g_{M_8}) \\ &+ \dots \end{aligned}$$

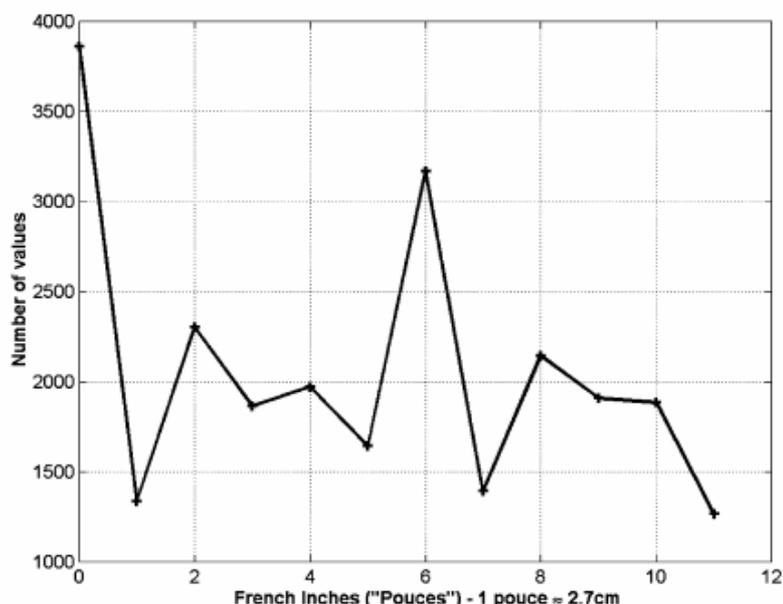
where, A_{M_4} and A_{M_8} are the amplitudes of the tidal constituents M_4 and M_8 , respectively, and g_{M_2} , g_{M_4} and g_{M_8} are the phase lags at Greenwich of M_2 , M_4 and M_8 tidal constituents.

According to the tidal analysis performed over the 1846–2005 tide gauge series, in which 247 harmonic constituents were estimated, we found a systematic difference of 0.023 m at Brest. Bouquet de la Grye (1890) reports a difference of 0.029 m, but he did not explain how he got the said value. In conclusion, MTL and MSL values should not be used together in a single time series at Brest without taking into account this systematic effect.

Significance of MSL and MTL trends

A simple test has been carried out to investigate whether MTL can be used as a proxy for MSL. Annual values of MSL and MTL were computed from the 1846–2005 tide gauge series of hourly values. HLW levels were previously computed from the interpolation procedure described in “Tidal staff data” section. It was decided that an annual mean requires data from at least 300 days of valid data in the year to be computed, a criterion which seems acceptable to avoid significant biases in the trends from the seasonal cycle over more than a century time period (Araujo et al. 2002). The trends in MSL and MTL were

Fig. 9 Distribution of inch values of the feet in the 1757–1792 record at Brest



estimated to be 1.11 ± 0.07 and 1.11 ± 0.06 mm/year, respectively, over the 1846–2005 time period. They obviously cannot be considered statistically different from one another. The errors are the formal errors of the linear regression. MTL may therefore be used as a proxy for MSL, wherever HLW levels are available to compute this quantity.

Discussion on sea level trends

The eighteenth century data sets unfortunately cannot yet be considered in the discussion on the long-term sea level trends at Brest. We have partially succeeded in connecting these early data sets to the common datum of the modern time series starting in 1807 by analysing the documentation of several historical libraries. But the findings have to be qualified with reservations concerning the datum connection. The eighteenth century data initially seem a bit low in Fig. 3. The uncertainties could potentially be as large as 0.08–0.16 m (quarter to half of a foot). This issue needs further investigation (see “Datum reconstruction” section). We therefore concentrate hereafter on MTL. Their values for the period 1807–2004 are available and may be used as proxy for MSL (see “Significance of MSL and MTL trends” section).

Figure 3b definitely shows a sea level increase, which obviously cannot be characterised by a simple linear trend. The sea level acceleration is estimated at 0.0071 ± 0.0008 mm/year² over the period 1807–2004 using a simple quadratic least-squares adjustment. The value is slightly higher with respect to the previous estimations carried out by Woodworth (1990) or Douglas (1992), but they still are consistent within a statistical 95% confidence level. We considered also the additional 20-year period 1985 onwards. Sea level appears to rise even faster over this period. Three linear trend periods can indeed be distinguished in the Brest MTL time series over the period 1807–2004:

- (a) 1807–1890, over which the sea level rate is estimated at -0.09 ± 0.15 mm/year
- (b) 1890–1980, at $+1.3 \pm 0.15$ mm/year
- (c) 1980–2004, at 3.0 ± 0.5 mm/year

The errors are formal errors from the least squares linear regression. The RMS of the residuals are 0.03, 0.04 and 0.015 m. The location of the ‘inflection points’ may appear somewhat arbitrary. We chose the ones for which the linear trends best joined together. The sea level trend of 3 mm/year over the last two decades appears significantly in excess of the longer period of 1890–1980. We implicitly assume here that the vertical land movement contribution is approximately linear over the last two centuries. Thus, this effect cancels out when comparing relative sea level trends from a single location over different periods. The assumption is consistent with geological evidence: The bedrock upon which the tide gauge is directly settled is a ‘granit of Saint-Renan’, a very resistant one according to Prof. Diot,

geologist (personal communication). A sea level trend of 2.7 ± 0.9 mm/year is obtained over the reduced period of 1993–2004. This figure, however, is not statically different from 3.0 ± 0.5 mm/year over the longer period of 1980–2004. Both estimations fit closely with radar altimetry results over the last decade (Cabanes et al. 2001; Leuliette et al. 2004). Our results support the findings of Holgate and Woodworth (2004) of an enhanced coastal sea level rise during the last decade compared to the global estimations of about 1.8 mm/year over longer periods (Douglas 1991, 2001). The question as to when the relatively large global sea level trends observed in the twentieth century started is not accurately answered yet (Warrick et al. 1996). The second half of the nineteenth century is cautiously suggested. Our findings point out to an inflexion point at around 1890 at Brest, which is remarkably close to that in 1880 found in the Liverpool record by Woodworth (1999b).

Conclusions

New sea level records from the port of Brest from the eighteenth century, spanning several decades (1756–1792), have been discovered recently. Within the scope of this study, numerous smaller records that were thought lost have been found for the port of Brest, including the original records of HLWs covering 1807–1837 or the tide gauge data of 1846–1857. Most have been converted into modern digital form and stored in computer databases.

The quality of the former data has been investigated by editing and analysing the residuals between the tidal predictions and the observations. Although time-consuming, the approach has proved worthwhile in identifying measurement errors and subsequently correcting them where appropriate, even for data that were previously thought valid. For instance, several years of data published at PSMSL were identified as those corrected for the barometer effect in the tabulated data registers at SHOM, years 1937, 1939 to 1943.

The sundial correction of data prior to August 8, 1714 has been reviewed using the same data quality approach. A refined correction based on sundial literature (Savoie 2001) is proposed, which eliminates the systematic effects seen in the time residuals of the sea level heights. The tidal analysis has also shown that shallow-water tidal harmonics at Brest cause a systematic difference of 0.023 m between MSL and MTL. The study of the trends in MTL and MSL however indicates that MTL can be used as proxy for MSL.

Once the remaining historical libraries are searched, the digitisation of the data completed and their quality assessed, we hope to further investigate trends in sea level components at Brest over a 300-year period. The data sets will of course be made available within the free data policy of the French sea level data centre through its public access (<http://www.sonel.org>).

Woodworth (1999b) forecasted that other exercises of data archaeology would repay the efforts involved in both

tidal data and historical documentation analyses. To conclude, may we forecast that the research activities of Christian Le Provost in sea level modelling and observation will be acknowledged by future generations of data archaeology researchers as we today acknowledge personalities like Picard, LaHire, Coubard, Cassini and Laplace for the work they did a few centuries ago?

Acknowledgements We are particularly grateful to Monsieur Littoux (Direction des Travaux Maritimes, Brest) for the visit of the Bassin de Brest and his precious explanations on historical, technical and practical aspects of the basin since its construction, in 1782, to present. This work was partially funded by Conseil Général de Charente-Maritime (Ph.D. fellowship) and by the French groups GRGS and GDR-G2 (mobility support to investigate a large number of historical libraries).

References

- Anon (1843) Observations des marées faites à La Mâtire et au bassin dans le port de Brest 1807–1835. Bureau des Longitudes, Paris
- Araujo I, Pugh D, Collins M (2002) Trends in components of sea level around the English Channel. Eurocoast, Portugal, pp 107–114
- Bajot L-M (1824) Pilote français. Première partie. Environs de Brest. Ann Mar Colon 1:221–222 (2^{ème} partie)
- Beautemps-Beaupré C (1829) Exposé des travaux relatifs à la reconnaissance hydrographique des côtes occidentales de France. Imprimerie Royale, Paris
- Bouquet de la Grye (1890) Note sur le choix d'un zéro fondamental pour le nivellement. Ann Hydrogr 12:32–38 (2^{ème} série)
- Cabanes C, Cazenave A, Le Provost C (2001) Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations. Science 294:840–842
- Cartwright DE (1999) Tides—a scientific history. Cambridge University Press, Cambridge
- Cassini J (1713) Réflexions sur de nouvelles observations du flux et du reflux de la mer, faites au port de Brest. Mém Acad R Sci 26:14–30
- Cassini J (1720) Réflexions sur les observations des marées continuées à Brest depuis le premier Avril 1714 jusqu'au 30 Septembre 1716. Hist Acad R Sci 33:154–166
- Chazallon R (1859) Lettre du 6 Décembre 1859 au Ministre de la Marine. Archives EPSHOM, Brest
- Clairbois V (du), Blondeau EN (1785) Encyclopédie méthodique. Ed, vol II. Panckouche, Marine
- Courtier A (1933) Note au sujet d'un léger exhaussement du niveau moyen de la mer à Brest survenu au cours des 20 dernières années. Archives EPSHOM, Brest
- Courtier A (1934) Données numériques concernant les marées des côtes de France. SHOM, Rapport Nr.14-1016
- Douglas BC (1991) Global sea level rise. J Geophys Res 96 (C4):6981–6992
- Douglas BC (1992) Global sea level acceleration. J Geophys Res 97 (C8):12699–12706
- Douglas BC (2001) Sea level change in the era of the recording tide gauge, Chap 3. In: Douglas B, Kearney M, Leatherman S (eds) Sea level rise: history and consequences, Int Geophys Ser, vol 75. Academic, San Diego, pp 37–64
- Goûye P, de La Hire P (1701) Mémoire de la manière d'observer dans les ports le flux et le reflux de la mer. Hist Acad R Sci 11–13
- Holgate SJ, Woodworth PL (2004) Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s. Geophys Res Lett 31:L07305. DOI 10.1029/2004GL019626
- Lalande JJ (1781) Traité du flux et du reflux de la mer. In: Desaint JC (ed) Astronomie 4, Bourdeaux, Paris
- Laplace PS (1790) Mémoire sur le flux et le reflux de la mer. Mém Acad Sci, Paris, pp 45–181
- Leuliette EW, Nerem RS, Mitchum G (2004) Calibration of TOPEX/Poseidon and Jason altimeter data to construct a continuous record of mean sea level change. Mar Geod 27: 79–94. DOI 10.1080/01490410490465193
- Levot P (1865) Histoire de la ville et du port de Brest. In: Monfort G (ed) Le port depuis 1681, vol II
- Peltier WR (2001) Glacial isostatic adjustment corrections. In: Douglas B, Kearney M, Leatherman S (eds) Sea level rise: history and consequences. Elsevier, New York, pp 177–178
- Picard J, de la Hire P (1680) Observations faites à Brest et à Nantes. In: Mémoires de l'academie Royal des Sciences depuis 1666 jusqu'en 1699, 7:379–398
- Pugh DT (1987) Tides, surges and mean sea level: a handbook for engineers and scientists. Wiley, Chichester, 047191505X
- Savoie D (2001) La gnomique. Editions Les Belles Lettres, Paris
- Simon B (2005) La marée. Manuel de cours, version soumise aux éditions Océanis
- Simon B, Lahaye-Collomb A (1997) La marée. SHOM, Collection Les Guides du SHOM, Paris
- SHOM (1861) Note sur l'inspection des marégraphes. Archives EPSHOM, Brest
- SHOM (1933) Cahiers d'observations du service des marées, vol 9. Archives EPSHOM, Brest
- Thevenard GV (1778) Observations des plus grandes hauteurs des marées de chaque jour dans le port de Brest faites depuis le 1^{er} Mars 1756 au 30 Juin 1778. Bibliothèque de l'Académie des Sciences, cote: Pochette de séance du 1781/01/31
- Warrick RA, Le Provost C, Meier MF, Oerlemans J, Woodworth PL (1996) Changes in sea level. In: Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (eds) The science of climate change. Cambridge University Press, UK, pp 359–405
- Woodworth PL (1990) A search for accelerations in records of European mean sea level. Int J Climatol 10:129–143
- Woodworth PL (1999a) A study of changes in high water levels and tides at Liverpool during the last two hundred and thirty years with some historical background. POL Report No. 56
- Woodworth PL (1999b) High waters at Liverpool since 1768: the UK's longest sea level record. Geophys Res Lett 26(11): 1589–1592
- Woodworth PL (2003) Some comments on the long sea level records from the Northern Mediterranean. J Coast Res 19: 212–217
- Woodworth PL, Player R (2003) The Permanent Service for Mean Sea Level: an update to the 21st century. J Coast Res 19: 287–295
- Woodworth PL, Shaw SM, Blackman DL (1991) Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline. Geophys J Int 104:593–609

7.2. Compléments d'information sur l'article.

La rédaction d'un article est un "instantané" d'une recherche. Lorsque des hypothèses sont émises, la découverte ultérieure de nouveaux documents peut permettre de les confirmer ou de les infirmer. La localisation de l'observatoire utilisé entre 1711 et 1716 est par exemple confortée grâce à de nouveaux éléments. Un article scientifique est aussi un "concentré" limité par le nombre de pages. Revenir dessus ici permet de développer les systèmes de temps utilisés à Brest dans chaque lot d'observations.

7.2.1. Correction à apporter dans la section "MSL vs MTL".

Peu de temps après la publication de l'article, nous nous sommes aperçus d'une faute de transcription dans la formule du paragraphe "*Influence of non-linear tidal waves*" de la partie "*MSL vs MTL*" (colonne de droite, page 495 de l'article). Au lieu d'avoir :

$$MSL - MTL = A_{M_4} \cdot \cos(2 \cdot g_{M_2} - g_{M_4}) + A_{M_8} \cdot \cos(4 \cdot g_{M_2} - g_{M_8}) + \dots$$

La formule correcte est (Simon, 2007, pp.203 ou Pugh, 1987, pp.304.) :

$$MTL - MSL = A_{M_4} \cdot \cos(2 \cdot g_{M_2} - g_{M_4}) + A_{M_8} \cdot \cos(4 \cdot g_{M_2} - g_{M_8}) + \dots$$

Ainsi, le MSL est de 29mm (23mm) au-dessus du MTL.

7.2.2. Conversion des observations horaires en temps et hauteurs des PM et BM.

Le paragraphe "*Tide staff data*" de l'article explique la méthode utilisée et présenté par Woodworth *et al.* (1991) pour convertir les observations horaires en des données de PM et BM avec à chaque fois le temps et sa hauteur associée. A chaque extrême (PM ou BM), la procédure d'interpolation par spline cubique vient s'ajuster au mieux à quatre hauteurs horaires l'encadrant, c'est-à-dire deux hauteurs avant et deux hauteurs après. Ensuite, la hauteur minimale (pour une BM) ou maximale (pour une PM) de la courbe ajustée est recherchée. Une fois la hauteur déterminée, le temps qui lui est associé est déterminé.

Trois méthodes de conversion ont été testées et comparées, pour l'année 1856, avec les valeurs en temps et en hauteurs provenant du registre des PM et des BM numérisées. Les données qui y sont notées sont issues du travail de dépouillement des marégrammes réalisé par l'observateur des marées (cf. 5.3.4.3). Les méthodes de conversion testées sont les fichiers de PM et de BM obtenues à partir d'une interpolation utilisant 4 hauteurs horaires, une

interpolation utilisant 6 hauteurs horaires et la procédure utilisée avec MAS par le SHOM (1.3.2.2.). Les résidus en temps et en hauteurs sont donnés dans le tableau 7.1. :

	Résidus en temps (minutes)			Résidus en hauteurs (cm)		
	Interpol. 4pts	Interpol. 6pts	MAS	Interpol. 4pts	Interpol. 6pts	MAS
PBM	3 ± 4	1 ± 4	2 ± 4	0,1 ± 2	-0,1 ± 2	-0,1 ± 2
PM	3 ± 4	1 ± 4	2 ± 4	0,4 ± 2	0,6 ± 2	0,7 ± 2
BM	3 ± 4	1 ± 4	2 ± 4	-0,4 ± 2	-0,7 ± 2	-0,8 ± 2

Tab. 7.1 – Résidus en temps et résidus en hauteurs entre 3 méthodes de conversion des observations horaires en données de PM et de BM avec le registre des PM et de PM pour l'année 1856.

Les différents résidus calculés avec les trois méthodes de conversion sont identiques à l'écart-type près. Les moyennes des résidus en temps sont plus importants avec l'interpolation ajustée avec 4 points qu'avec 6. Les écarts pour les résidus en hauteurs des PM (+4mm) et BM (-4mm) sont identiques à celles trouvées par Woodworth *et al.* (1991) pour Liverpool. La détermination précise du temps n'est pas indispensable pour nous car c'est avec les hauteurs que nous allons travailler.

En conclusion, la conversion des observations horaires en hauteurs de PM et en hauteurs de BM n'introduit pas d'erreurs dans les mesures.

7.2.3. Élément nouveau sur la localisation de l'observatoire entre 1711 et 1716.

Les contrôles de la qualité des mesures ont permis de remettre en cause, une correction proposée depuis près de 300 ans par Cassini (1714b) et repris par la suite par plusieurs chercheurs : Lalande, 1781 ; Laplace, 1789,1825 ; Cartwright, 1972. La correction en temps, liée à l'utilisation d'un cadran solaire mal réglé entachait les heures des observations comprises entre le 10 juin 1711 et le 1^{er} août 1714 (cf. 3.2.3). Or ce n'est pas une constante de temps uniforme au cours de l'année qu'il faut ôter, comme le propose Cassini, mais une valeur variant au cours de l'année. En utilisant la correction entre le temps du Soleil apparent et le temps solaire moyen (Savoie, 2001), il a été possible de retrouver le décalage journalier en temps engendré par le cadran solaire mal réglé (section "*Sundial correction : 1711-1714*" de l'article).

Notre présomption concernant la localisation de l'observatoire entre 1711 et 1716 semble confirmée grâce à une gravure réalisée par Nicolas Ozanne [1728-1811] (fig. 7.1). Un extrait de cette planche représente dans la partie droite, un navire en cours de réparation dans la forme de Brest. Au centre de l'image, s'étirant parallèlement à la Penfeld (visible sur la partie gauche) se trouve le magasin général construit vers 1670-1680 (Cloître et Bugat, 2001). Donnant sur le bassin de Brest (face visible sur la gravure), la façade Sud du pavillon achève ce bâtiment tout en longueur surmonté d'un cadran solaire.

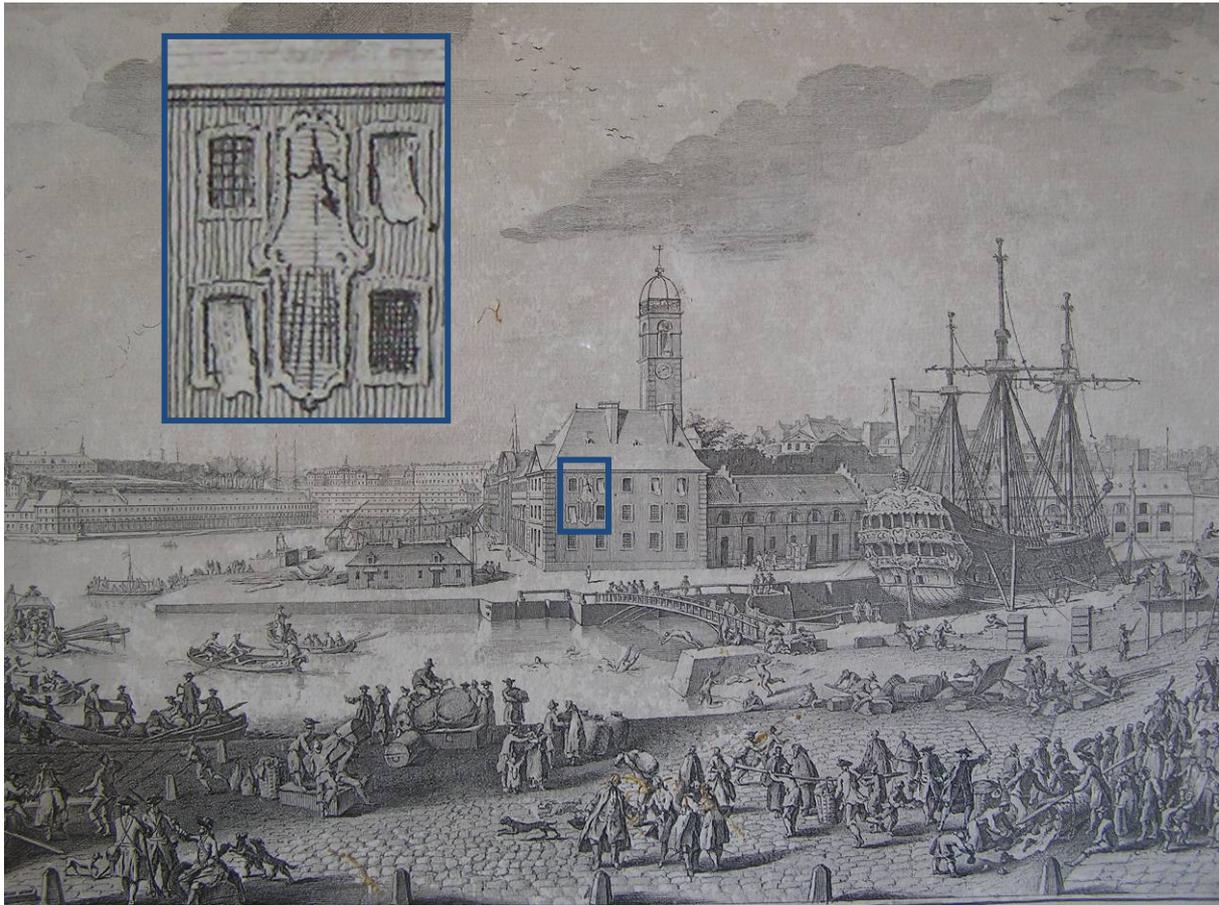


Fig. 7.1 – *Embarquement au Port de Brest. Dédié à l'Académie de Marine* par Ozanne l'ainé. Détail, SHD – Marine Brest, cote : OA 1994-1.

Aucune autre information n'a été trouvée sur ce cadran solaire mais il est fort probable qu'il s'agisse du cadran qui a servi à obtenir les heures des observations effectuées entre 1711 et 1716. Dès lors, pourquoi observer le niveau de la mer ailleurs qu'au bassin de Brest ? Le site disposait de toutes les commodités indispensables : le cadran solaire pour régler la pendule, la forme avec une échelle de marée et enfin à proximité, la ville avec le logement de l'observateur au plus près de l'observatoire. La tour de l'horloge, visible sur la gravure, n'a pu être utilisée à cette époque car elle est contemporaine aux mesures, sa construction ne remontant qu'à la fin des années 1740 (Cloitre et Bugat, 2001).

Pour autant, quelle confiance peut-on accorder à ce dessin ? L'artiste à l'origine de cette planche, Ozanne devient maître de dessin des gardes de la marine à Brest en 1750 et dessinateur au dépôt des cartes et plans ainsi que membre fondateur de l'Académie de Marine fondée en 1752¹. La gravure, dédiée à cette académie, ne pouvait souffrir d'inexactitude sous peine de protestation de la part des 75 membres² la composant. Grâce à cette dédicace, la gravure peut-être datée autour des années 1750.

Cette gravure est un élément nouveau qui tend à confirmer que les hauteurs du niveau de la mer ont été mesurées depuis l'entrée du bassin de Brest. Dès lors, il est très probable que le

¹ URL : <http://cths.fr/an/prosopo.php?id=47> (consulté le 5 octobre 2008).

² URL : <http://www.mairie-brest.fr/academie-marine/academie.htm> (consulté le 5 octobre 2008).

zéro de cette échelle soit celui du bassin de Brest, confondu avec la base de la rigole du bassin (cf. 6.2.3.2).

7.2.4. Référentiels temporels utilisés pour dater les mesures.

Obtenir une série de mesures homogène suppose un seul et unique système de temps. Le paragraphe 5.3.4.4 rappelle ceux ayant eu cours en France : TSV, TSM, TC, TU. L'apport des nouveaux jeux d'observation, avec différents types de temps, contraint à les corriger afin que chaque hauteur soit exprimée en fonction d'un même et unique système : le TU.

Le tableau 7.2 consigne l'ensemble des corrections en temps apportées aux nouveaux jeux de mesures. Le lot d'observation de 1756 à 1778 n'est pas indiqué dans le tableau car aucune information temporelle n'accompagnait les hauteurs de PM.

Type de donnée	Période	Temps utilisé pour les mesures	Temps légal en France
PBM	1711-1716	TSV	TSV
PBM	1807-1811	TSV	TSV
PBM	1810-1815	TSV	TSV
PBM	1816-1826	TSV	TSM
PBM	1827-1837	TSM	TSM
Horaire	1846-1860	TSV	TSM
Horaire	12/11-26/11/1850	TSV	TSM
PBM	03/07-31/07/1897	TSV	TC
Horaire	01/01-01/06/1915	TSM	TU
Horaire	01/06-31/12/1915	TU	TU
PBM	31/08-01/10/1922	TU	TU+1
Horaire	01/08-01/10/1937	TU	TU+1
Horaire	02/10-01/11/1937	TU	TU
PBM	01/01-26/03/1938	TU	TU
PBM	27/03-01/10/1938	TU	TU+1
PBM	02/10-31/12/1938	TU	TU
Horaire	29/09-31/12/1952	TU	TU+1

Tab. 7.2 – Inventaire des systèmes de temps utilisés pour les nouveaux jeux de mesures.

Le TSV, TSM et TU sont les temps utilisés lors des campagnes de mesures du niveau de la mer. A plusieurs reprises, le système de temps de l'observatoire diffère du temps légal en France au même moment.

7.2.5. Relations entre les différentes références verticales : continuité du zéro hydrographique.

Il est essentiel de déterminer les relations entre les différentes références verticales des lots d'observation afin de construire une série cohérente de hauteurs et de pouvoir étudier précisément l'évolution du niveau de la mer.

La mesure simultanée du niveau de la mer en deux endroits distincts est précieuse pour rattacher en hauteur par le calcul, une série à une autre. C'est grâce à cette méthode que les observations réalisées durant la première moitié du 19^{ème} ont pu être rattachées les unes aux autres comme l'explique très succinctement l'article.

7.2.5.1. Année 1810 : observations à la mâture et au bassin de Brest.

La comparaison des observations faites simultanément à la mâture et au bassin de Brest en 1810 est riche d'enseignements. D'une part, le nombre de mesures diffère d'un moment de la journée à l'autre et suivant le phénomène à observer (PM ou BM) et, d'autre part, ce nombre varie d'un site à l'autre :

	PM le matin	PM le soir	BM le matin	BM le soir	TOTAL
Mâture	193	230	222	167	812
Bassin de Brest	233	223	219	212	887

Tab. 7.3 – Nombre de mesures pour l'année 1810 réalisées aux deux observatoires.

Les disparités dans le nombre des observations ne sont pas clairement expliquées. Les lacunes en revanche s'expliquent par le fait que les observateurs n'étaient pas présents en permanence aux observatoires. Seul 765 mesures sont effectuées simultanément à la mâture et au bassin de Brest.

Comme Savary *et al.* (1843) l'écrivent, les observations au bassin de Brest sont réalisées grâce à 2 échelles de marée : une pour les PM et l'autre pour les BM tandis qu'à la mâture, toutes les hauteurs sont mesurées sur une unique échelle (cf. 4.4.3). Pourtant, nulle part il n'est fait référence d'une concordance entre l'échelle servant à mesurer les PM avec celle servant à obtenir les hauteurs des BM. Les différences entre les hauteurs lues au bassin de Brest et celles obtenues à la mâture permettent de calculer les moyennes, les écarts-types des valeurs (σ) et les écarts-types sur les moyennes (σ_{moy}) pour les PBM, les PM et les BM (tab. 7.4).

Nature des données	Moyenne $\pm \sigma$ (m)	σ_{moy} (m)
PBM	4,415 \pm 0,034	0,002
PM	4,416 \pm 0,035	0,002
BM	4,413 \pm 0,034	0,002

Tab. 7.4 – Moyennes et écarts-types sur les moyennes des différences entre les hauteurs observées au bassin de Brest et celles mesurées à la mâturation.

Il n'existe pas de différences statistiquement significatives entre la moyenne calculée avec les PM et celle calculée avec les BM. Cela signifie donc que les deux échelles du bassin de Brest étaient bien rattachées entre elles. La moyenne obtenue avec les PBM, 4,415m a servi pour caler les observations de 1807 à 1811 avec celles de 1810 à 1835.

7.2.5.2. Année 1816 : au bassin de Brest et au lieu d'observation des réductions de sondes lors de la campagne bathymétrique aux abords de Brest.

La campagne bathymétrique de 1816 aux abords de Brest, sous la direction de Beautemps-Beaupré, inaugure le lancement des premiers levés précis de l'ensemble des abords côtiers français (cf. 5.2.1). Il devient indispensable de coupler les levés avec des mesures du niveau de la mer afin de réduire les sondes au niveau des plus BM (cf. 5.2.2). A cette occasion, les observations de la marée ont été réalisées "*à la mâturation*"¹.

Dès lors, sachant que nous disposons pour cette période de deux observatoires distincts : "*à la mâturation*" et au bassin de Brest, il devient possible de les comparer. Ici, seulement 219 hauteurs acquises simultanément sont utilisées pour calculer les moyennes et les écarts-types présentés dans le tableau 7.5 :

Nature des données	Moyenne $\pm \sigma$ (m)	σ_{moy} (m)
PBM	-0,357 \pm 0,028	0,002
PM	-0,339 \pm 0,021	0,002
BM	-0,371 \pm 0,021	0,002

Tab. 7.5 – Moyennes et écarts-types sur les moyennes des différences entre les hauteurs observées au bassin de Brest et celles mesurées pour réduire les sondes lors de la campagne bathymétrique aux abords de Brest.

Les moyennes obtenues pour les PM et les BM sont légèrement différentes. Pour autant cette différence n'est pas significative si l'on considère les écarts-types. Les moyennes pour l'année 1816 sont par contre différentes de celles obtenues en 1810 au bassin de Brest et à la mâturation (cf. 7.2.5.1). Cela signifie que l'observatoire utilisé en 1816 pour réduire les sondes est différent de l'observatoire de la mâturation dont nous disposons des observations entre 1807 et 1811. Il est probable que peu de temps après la fin de son utilisation, l'observatoire de la

¹ Observations de marée, 1816. SHD Marine, 7JJ 140.

mature 1807-1811, se trouvant à un endroit stratégique — à coté de la mature — (savary et al., 1843) ait été soit démonté, soit affecté à une autre mission.

7.2.5.3. Années 1850 et 1851 : observations au bassin de Brest et au marégraphe.

Plusieurs documents attestent que le zéro du marégraphe est confondu avec celui de l'échelle du bassin de Brest : Courtier (1934) écrit par exemple : *"La mise en place du marégraphe et l'installation d'une échelle de marée voisine établie en concordance avec l'échelle du Bassin, ont été effectuées en décembre 1845 sous la direction de Chazallon avec toutes les garanties de repérage désirables"*. Aucun document signé par Chazallon n'a été retrouvé pour confirmer cette affirmation. En revanche nous disposons de deux années consécutives d'observations réalisées au bassin de Brest en 1850 et 1851. Comme le marégraphe fonctionne depuis 1846, nous pouvons étudier la relation existant entre le zéro du bassin de Brest et celui de l'observatoire marégraphe (tab. 7.6.).

Type de valeurs	1850		1851		1850-1851	
	Moyenne ± σ (m)	σ_{moy} (m)	Moyenne ± σ (m)	σ_{moy} (m)	Moyenne ± σ (m)	σ_{moy} (m)
PBM	-0,02 ± 0,04	0,002	-0,01 ± 0,06	0,002	-0,02 ± 0,05	0,001
PM	-0,03 ± 0,03	0,002	+0,01 ± 0,06	0,003	0,00 ± 0,05±	0,002
BM	-0,03 ± 0,04	0,002	-0,04 ± 0,05	0,003	-0,03 ± 0,02	0,002

Tab. 7.6 – Moyennes et écarts-types sur les moyennes des différences entre les hauteurs observées au bassin de Brest et celles mesurées avec le marégraphe.

Pour 1850, 811 PBM sont utilisés et 908 PBM pour l'année 1851. La différence pour les deux années n'est pas statistiquement significative. La moyenne des différences avec les PM et les BM est identique, aux écarts-types près (σ_{moy}) confirmant (cf. 7.2.5.1) et (cf. 7.2.5.2), à savoir qu'au bassin de Brest, l'échelle utilisée pour mesurer les PM est bien rattachée avec celle employée pour observer les hauteurs des BM.

7.2.5.4. Quelques réflexions sur le zéro hydrographique et l'échelle de Laplace.

En 1934, Courtier explique l'origine du zéro hydrographique à Brest : *"C'est l'échelle de Laplace qui a servi à Beautemps-Beaupré en 1816 lors de ses travaux hydrographiques dans la région de Brest ; Beautemps-Beaupré en a adopté le zéro comme zéro de réduction des sondes des cartes marines de la région de Brest"*.

Pourtant Courtier semble dubitatif car il ajoute : *"il convient de noter que le zéro de l'échelle de Laplace se trouve placé à 0m.45 environ en contre-bas du niveau des plus basses mers et que, par suite, Beautemps-Beaupré n'a pas appliqué la règle qui consiste à rapporter les sondes inscrites sur les cartes marines au niveau des plus basses mers ; il n'a pas indiqué les raisons qui l'ont conduit à opérer ainsi"*.

Pour justifier cette singularité, Courtier avance l'hypothèse suivante : "*mais il est à présumer qu'il n'a pas voulu modifier un zéro utilisé depuis longtemps dans le port de Brest, et consacré par Laplace*".

Beautemps-Beaupré a préféré utiliser une échelle de marée établie sur les quais de la mâture pour réduire ses sondes au lieu d'employer celles installées dans le bassin de Brest (cf. 7.2.5.2). Pourtant, le rattachement des sondes au zéro hydrographique est celui défini par le zéro des échelles du bassin de Brest : sur le cahier des relevés des hauteurs d'eau¹ mesurées pour la campagne hydrographique il est indiqué : "*Le 18 juillet 1816 observations faites à 12h00 simultanément à l'échelle du Bassin et à l'échelle de la mâture.*"

Echelle du Bassin 15 pieds 5 pouces
Echelle de la mâture 16 pieds 3 pouces
Différence : 10 pouces à ôter de toutes les sondes d'après ma réduction de l'échelle de Brest pour cette année."

A la fin du cahier, sont ajoutés trois jours d'observations du niveau de la mer "*faites dans le Bassin de Brest, 1^{ère} échelle de tribord en entrant*" par M. de Marigny du 29 au 31 octobre 1816. Les observations débutent à 7h00 pour se terminer à 17h00 avec une mesure tous les quarts d'heure. Ces observations ont été comparées entre elles. Sur les 110 valeurs communes, la différence entre les hauteurs lues sur l'échelle du bassin et sur l'échelle de Marée des réductions de sondes est de 1 pied ± 1 pouce soit environ 0,33 ± 0,03 cm. Cette moyenne des différences est statistiquement identique à celles trouvés dans le tableau 7.5.

Enfin, pour confirmer cette différence, j'ai réalisé une étude similaire entre les hauteurs de PM et BM consignées dans le cahier et celles imprimées dans le Pilote Français dont "*Les élévations des eaux sont exprimées en Pieds de France, et rapportées au niveau des plus Basses Mers qui ont été observées sur l'Echelle du Bassin de Brest*". 219 hauteurs de PBM portant du 24 juillet au 25 septembre 1816 ont été réalisées. La différence entre les hauteurs lues sur l'échelle du bassin de Brest et sur l'échelle utilisée à la mature est de 0,36 ± 0,03 cm (cf. 7.2.5.2). Cette nouvelle moyenne des différences est la même que celles obtenues précédemment aux incertitudes près.

Au premier janvier 1996, le SHOM décide de mettre fin à cette singularité en modifiant le zéro hydrographique aux abords de Brest ($ZH_{1996-Actu} = ZH_{1816-1995} + 0.5m$) pour être en accord avec la définition du niveau des plus basses mer.

Qu'en est-il de l'appellation "*échelle de Laplace*" et de sa confusion avec l'échelle du bassin de Brest ? Est-ce Laplace qui est à l'origine de l'emplacement de l'échelle des marées au bassin de Brest ?

Deux observatoires se sont succédés à Brest au début du 19^{ème} siècle : d'abord à la mâture (1806-1811), puis au bassin de Brest (1810-1835). Comme Laplace réclamait des observations du niveau de la mer depuis 1803 (cf. 4.4.2), il est étrange qu'il décide de placer, seulement en 1810, "son" échelle de marée au bassin de Brest. D'autre part, dans sa lettre du 29 brumaire an IX (29 octobre 1800) adressée au Préfet maritime Caffarelli², Laplace lui

¹ Observations de marée, 1816. SHD Marine, 7JJ 140.

² Laplace. Lettre à Caffarelli, le 29 brumaire an 9. Catalogue de ventes d'Autographes et Documents, Demarest, Mars 2002.

explique que le zéro de l'échelle des marées doit se trouver au niveau d'équilibre de la mer c'est-à-dire approximativement à mi-marée ce qui implique des hauteurs négatives pour les BM et des hauteurs positives pour les PM (cf. 4.4.1). Or, le zéro de l'échelle du bassin de Brest, utilisé entre 1810 et 1835, n'est pas placé comme Laplace l'explique dans sa lettre, mais a son zéro en dessous des plus BM. En revanche, les observations faites à la mâture reflètent parfaitement le positionnement du zéro exposé par le savant. En effet, les mesures sont positives pour les PM et négatives pour les BM (cf. 7.2.5.1). De plus, les hauteurs d'une PM et de sa BM immédiate sont quasi-identiques au signe près.

En conclusion, il apparaît impropre de confondre l'échelle du bassin de Brest avec l'échelle de Laplace. Il semble plus probable que les observations faites à la mâture entre 1807 et 1811 portent davantage la marque du grand savant. Malheureusement, il ne reste rien de cet observatoire. Depuis 1846, ces quais sont le siège des marégraphes à Brest.

7.3. Compléments sur les contrôles qualité des jeux de mesures.

Le contrôle de données est effectué en quatre étapes successives. La première permet la détection d'erreurs ponctuelles ou fautes lors de la numérisation ou d'erreurs dans les registres (cf. 7.3.1). La deuxième permet d'apprécier les arrondis en temps et en hauteur des mesures à partir de leur distribution (cf. 7.3.2). La troisième étape permet d'estimer la qualité des résidus par les indicateurs de tendance centrale et les mesures de dispersion aussi bien en hauteur qu'en temps (cf. 7.3.3). Enfin La quatrième étape tire le bilan sur la qualité des données en y portant un regard plus global avec l'étude des écarts quadratiques moyens à partir des résidus annuels (cf. 7.3.4).

7.3.1. Détection d'erreurs ponctuelles.

Les résidus (différence) entre les observations et les prédictions peuvent se décliner en deux sortes : résidus en hauteurs et résidus en temps (cf. 1.1.2.3). En effet, lors des observations et du calcul des prédictions pour les PM et BM, les deux paramètres sont enregistrés ou calculés. L'étude des résidus permet de détecter facilement toute erreur éventuelle liée à une mauvaise numérisation ou en mettant en avant des problèmes sur plusieurs jours de mesures. Les hauteurs prédites sont issues de l'analyse harmonique des observations horaires depuis 1846. 247 constituants de marée ont été ainsi déterminés (1.3.2.2). L'expérience acquise au cours des nombreux contrôles réalisés sur les observations de Brest permet de considérer que seuls posent problèmes, les résidus supérieurs à 50cm pour les hauteurs et supérieurs à 20min pour le temps. Une fois que la valeur observée incriminée est détectée, l'étude se poursuit avec la comparaison de cette dernière aux autres observations avoisinantes. Cette analyse comparative permet de confirmer les corrections apportées.

7.3.1.1. Mesures réalisées entre 1711 et 1716.

Les données, imprimés dans l'ouvrage de Lalande (1781) ont été utilisées en 1972 par Cartwright. Ce dernier a consigné dans son article, les erreurs qu'il y avait alors détectées (tab. 7.7) :

N°	date	Type d'erreur	Document d'origine	Après correction	Contrôle des corrections.
1	14/02/1712	Confusion matin/soir	8h13	20h13	Correction non confirmée.
2	07/03/1712	Signe "-" manquant	2pi 2po	-2pi -2po	Correction confirmée.
3	15/03/1712	Erreur de frappe	03h52	08h52	Aucune heure égale à 03h52 n'existe pour ce jour.
4	29/03/1712	Confusion matin/soir			Correction non confirmée.
5	21/04/1714	Erreur de 2h00			Correction non confirmée.
6	18/02/1715	Confusion matin/soir	3h35	15h35	Correction confirmée.
7	15/09/1715	Signe "-" manquant	-2pi-8po	-2pi -8po	Aucune correction à apporter ici.
8	25/02/1716	Signe "-" manquant	2pi 6po	-2pi -6po	Correction confirmée.
9	05/06/1716	Erreur de 2h00			Correction non confirmée.

Tab. 7.7 – Liste des corrections indiquées par Cartwright (1972) contrôlées (pi pour pieds et po pour pouces).

Voici le détail du contrôle réalisé sur les corrections proposées par Cartwright :

N°1 n'a pas lieu d'être car, ni le résidu en temps, ni le résidu en hauteur, ne présentent de valeurs importantes. De plus, le manuscrit retrouvé dans les archives de Cassini, à l'Observatoire de Paris¹, confirme que la mesure est bien effectuée le matin ;

N°2 est confirmée par un résidu important calculé pour cette hauteur ;

N°3 est remise en question par le fait qu'il n'existe pas, pour le 15 mars 1712 de hauteur mesurée à 3h52 (archives de Cassini, idem que pour n 1);

N°4 est non confirmée car lorsqu'on utilise cette correction, les résidus en temps deviennent plus importants que ceux obtenus sans celle-ci ;

N°5 n'est pas valable car pour les temps : 8h31, 2h53 (14h53) et 9h01 (21h01) chaque résidu en temps est inférieur à 2h00. Or Cartwright propose une correction horaire pour toute valeur temporelle supérieure cette grandeur de temps ;

N°6 est validée pour deux raisons : le résidus en temps est plus important si la hauteur est prise le matin au lieu d'être prise le soir. De plus, une seule observation de PM a lieu cette journée. Très souvent pour ce jeu de données, les mesures sont diurnes et non nocturnes, donc l'observation a bien lieu à 15h35 au lieu de 3h35 ;

N°7 n'a pas lieu d'être, vu que le signe "-" est déjà présent dans l'ouvrage de Lalande ;

¹ Cote D-2.42.

N°8 est identique à la justification apportée pour la correction n°2 ;

N°9 est identique à la justification apportée pour la correction n°5.

La majorité des erreurs détectées par Cartwright (1972) s'avèrent infondées. En revanche, grâce à notre procédé utilisant les valeurs des résidus en hauteur et en temps, plusieurs anomalies ont été décelées et corrigées (tab. 7.8) :

date	Type d'erreur détectée	Sur le document d'origine	Après correction
14/07/1711	Décalage de 1h00	02h00	03h00
17/08/1711	Décalage de 2h00	14h08 1/3	12h08 1/3
29/08/1711	Décalage de 1h00	11h44 ½	10h44 ½
29/08/1711	Signe "-" manquant	0pi 7po	0pi -7po
14/10/1711	Erreur de 3pieds	15pi 11po	18pi 11po
23/11/1711	Erreur hauteur BM	9pi 0po	? impossible à corriger.
20/02/1712	Décalage de 1h00	09h51	08h51
08/03/1712	Signe "-" manquant	2pi 1po	-2pi -2po
09/04/1712	Décalage de 1h00	04h39	05h39
29/04/1712 30/04/1712	Mélange dans les heures et hauteurs des BM entre les 2 jours		
09/05/1712	Décalage de 1h00	03h02	02h03
21/06/1712	Décalage de 1h00	04h39 (16h39)	05h39 (17h39)
01/10/1712	Signe "-" manquant	0pi 7po	0pi -7po
12/05/1714	Signe "-" manquant	0pi 10po	0pi -10po
14/05/1714	Signe "-" manquant	1pi 4po	-1pi -4po
22/10/1714	Signe "-" manquant	1pi 6po	-1pi -6po
22/11/1714	Signe "-" manquant	1pi 9po	-1pi -9po
05/05/1715	Signe "-" manquant	1pi 10po	-1pi -10po
08/09/1715	Décalage de 1h00	10h54 (22h54)	11h54 (23h54)
16/09/1715	Signe "-" manquant	2pi 2po	-2pi -2po
17/09/1715	Signe "-" manquant	1pi 4po	-1pi -4po
15/10/1715	Signe "-" manquant	1pi 6po	-1pi -6po
06/11/1715	Double PM à 11h24, 13pi 01po et 00h00 (12h00), 13pi 05po		
14/11/1715	Signe "-" manquant	1pi 0po	-1pi 0po
20/02/1716	Décalage de 1h00	2h56 (14h56)	1h56 (13h56)
26/02/1716	Signe "-" manquant	2pi 4po	-2pi -4po
27/03/1716	Signe "-" manquant	1pi 8po 6lig	-1pi -8po -6lig
15/07/1716 16/07/1716	Doublon avec 2 temps et 2 hauteurs de PM identiques : 0h40 (12h40) et 14pi 8po		
19/07/1716	Décalage de 1h00	08h46	09h46

Tab. 7.8 – Liste des nouvelles corrections apportées (pi pour pieds, po pour pouces et lig pour lignes).

Le travail initié par Cartwright (1972) nous semble donc désormais achevé. Des décalages de 2h00 à 1h00 ont été découverts. Les valeurs de BM négatives ont également été listées tout comme des erreurs inédites : mélanges des heures et hauteurs sur 2 jours, doublons.

7.3.1.2. Mesures réalisées entre 1757 et 1792.

Ce jeu de mesures est entièrement inédit. Aucune étude jusqu'à présent ne s'est appuyée dessus. Nous sommes donc les premiers à exploiter ses données et à rechercher d'éventuelles erreurs, quelques 250 ans après la réalisation de ces premières mesures. Le tableau 7.9 fait l'inventaire des corrections apportées pour les observations comprises entre 1757 et 1792 :

Date	Type d'erreur	Commentaire.
03/1756-07/1757	Une seule PM par jour	Impossibilité de savoir, pour chaque PM, s'il s'agit de celle diurne ou celle nocturne.
01-30/06/1762	Doublon d'un mois	Les mesures consignées dans le registre sont identiques à celles du mois de mai 1762 (cf. texte à la suite du tableau).
01-30/11/1763		Les mesures consignées dans le registre sont identiques à celles du mois d'octobre 1763 (cf. texte à la suite du tableau).
01-04/12/1763	Résidu important	Résidu supérieur à 2m.
08-12/12/1763		
29-31/12/1763		
22-26/12/1772		
19/04/1778		12pi 0po au lieu de 19pi 0po (PM matin)
26/04/1778		17pi 0po au lieu de 11pi 0po (PM matin)
24/01/1779		13pi 8po au lieu de 19pi 8po (PM matin)
16/11/1779		12pi 1po au lieu de 16pi 1po (PM soir)
07/08/1780		16pi 9po au lieu de 22pi 9po (PM matin)
08/11/1780		13pi 9po au lieu de 19pi 9po (PM matin)
28/09/1782		12pi 2po au lieu de 16pi 2po (PM matin)
14/12/1783		13pi 10po au lieu de 19pi 10po (PM soir)
17/02/1784		13pi 0po au lieu de 19pi 0po (PM matin)
25/05/1784		13pi 0po au lieu de 19pi 0po (PM matin)
24/08/1784		12pi 8po au lieu de 18pi 8po (PM matin)
20/12/1784		16pi 6po au lieu de 10pi 6po (PM matin)
17/02/1785		12pi 0po au lieu de 17pi 0po (PM matin)
24/04/1786		13pi 5po au lieu de 17pi 5po (PM matin)
28/10/1787		18pi 4po au lieu de 13pi 4po (PM soir)
20/02/1788		20pi 4po au lieu de 13pi 4po (PM soir)
02/10/1788		18pi 0po au lieu de 12pi 0po (PM soir)
08/12/1788		12pi 7po au lieu de 17pi 7po (PM soir)

Tab. 7.9 – Inventaire des erreurs détectées pour les mesures acquises entre 1757 et 1792.

D'après le tableau 7.9, les anomalies détectées sont de deux natures :

- celles qui présentent un résidu en hauteur important, c'est-à-dire supérieur ou égal à 4 pieds ($\approx 1,299\text{m}$). Ce résidu est comparé avec les deux autres résidus l'encadrant, juste avant et juste après, et les 3 hauteurs sont également comparées. S'il s'agit manifestement d'une erreur, la hauteur est corrigée au pied près, sans modifier le nombre de pouces.

- A Deux reprises, c'est l'ensemble des observations mensuelles qui sont fausses. En effet, les mois de juin 1762 et novembre 1763 sont les copies conformes respectives des mois de mai 1762 et octobre 1763. Deux critères nous ont permis de déterminer à quel mois appartenait chaque doublon. A chaque fois, les observations duraient 31 jours. Or les mois de juin et novembre ne durent que 30 jours. De plus, les phases de la Lune sont consignées avec le registre. Comme Sept jours séparent chacune de ces phases, il est facile, en les comparant à celles de chacun des mois de déterminer quel doublon est illogique confirmant par la même le critère précédent.

7.3.1.3. Mesures du BdL entre 1807 et 1837.

Tout comme les observations de 1711 à 1716 publiées dans le *traité sur le flux et reflux de la mer* de Lalande (1781), les mesures réalisées entre 1807 et 1837 ont fait l'objet d'une publication à "grande échelle" sous l'auspice du Bureau des Longitudes (cf. 4.4.3). Pareillement aux observations faites au début du 18^{ème} siècle, une partie des registres originaux, du mois de juin 1819 au mois de décembre 1832 ont été retrouvés (tab. 6.13).

Les valeurs numérisées sont celles qui ont été imprimés par le Bureau des Longitudes. De nombreuses erreurs ont été détectées (hauteur, heure, confusion matin et soir pour les heures). L'ensemble des corrections apportées sont consignées dans l'annexe C avec un tableau pour chaque site d'observation : à la mâtire (cf. 6.2.3.3) et au Bassin de Brest (cf. 6.2.3.2).

Lorsque, pour la période 1819-1832, les écarts en résidus de hauteur ou de temps étaient trop importants, les mesures ont été contrôlées à l'aide du registre original retrouvé. En dehors de cette période, le procédé est identique à celui utilisé précédemment (cf. 7.3.1.1 et 7.3.1.2).

Très souvent, les corrections apportées entre 1819 et 1832 étaient confirmées par les registres originaux confortant de nouveau la méthode utilisée.

7.3.1.4. Mesures réalisées par les marégraphes mécaniques entre 1846 et 1993.

La grande partie des mesures s'étalant de 1846 à 1993 étaient déjà disponibles sous format numérique. L'étude des résidus s'est donc porté tout naturellement vers les données nouvellement numérisées afin de vérifier leur qualité (tab. 6.7). Quelques erreurs ponctuelles pour des hauteurs ont été détectées. Jusqu'en 1952, les corrections apportées ont été vérifiées en remontant à la source des enregistrements (marégrammes et registres). Le tableau 7.10 rassemble les hauteurs posant problème qui ont été vérifiées :

Année	n° de jour	heure [TU]	Hauteur non corrigée (cm)	Hauteur corrigée (cm)
1864	60	23	77	477
1864	61	0	199	399
1864	61	1	387	337
1872	91	23	131	488
1872	92	0	315	415
1886	312	17	0	400
1888	56	17	292	492
1888	56	18	63	363
1893	67	16	422	322
1893	67	17	95	405
1893	67	18	307	507
1912	248	22	569	561
1912	248	23	430	502
1912	249	0	520	440
1952	366	23	490	177
1956	112	23	311	451
1956	113	23	200	350
1956	114	23	169	229
1956	144	23	341	221
1956	229	23	196	496
1956	230	23	176	476
1961	69	23	414	514
1961	72	23	279	449
1961	83	23	428	488
1961	98	23	397	547
1961	112	23	427	497
1961	127	23	363	563
1961	145	23	369	469
1961	146	23	274	474
1961	147	23	207	407
1961	148	23	163	263
1961	173	23	489	529
1961	187	23	543	573
1961	191	23	241	341
1963	268	23	382	432
1963	283	23	443	493
1963	325	23	279	339
1969	305	10	509	459
1969	305	11	510	410
1969	305	12	468	368
1969	305	13	376	326
1982	364	22	225	95
1982	365	23	302	92
1983	83	22	543	443

Tab. 7.10 – Détails sur chacune des hauteurs horaires corrigées (hauteurs données en cm, unité adoptée par le SHOM).

La plupart du temps, les erreurs (lors de la numérisation ?) se retrouvent dans le chiffre des centaines de cm. Il est probable que certaines hauteurs ont été mal numérisées. Il est alors fortement possible que d'autres erreurs subsistent, notamment dans les dizaines de centimètres et les centimètres eux-mêmes. Elles sont plus difficiles à localiser car les effets du décalage en temps notamment peuvent être aussi à l'origine de ce genre de problèmes (communication personnelle B. Simon). Aucune analyse complémentaire n'a été entreprise mais le travail mériterait d'être réalisé.

Une autre erreur dans le fichier original a été détectée pour l'année 1900. En effet, pour cette année, 366 jours étaient donnés. Or pour qu'une année soit bissextile, il faut que la valeur soit divisible par 4, sauf pour les multiples de 100 non divisibles par 400. L'année 1900 n'est donc pas bissextile car divisible par 100 mais pas par 400. La ligne du 366^{ème} jour ne contenant pas de hauteurs (sauf pour la 23^{ème} heure) a été supprimée. La hauteur disponible est en fait celle du 365^{ème} jour à 23h00 dont la valeur manquait.

7.3.2. Distribution des valeurs en hauteur et en temps.

Afin d'apprécier la qualité des observations, nous avons étudié leur distribution en hauteur et en temps pour les jeux d'observations lus directement par un observateur. En effet, l'être humain, même inconsciemment, peut observer en introduisant un certain systématisme. En effet, l'expérience acquise par l'équipe niveau marin de l'Université de La Rochelle a montré, lors d'étalonnages de marégraphes durant un cycle complet de la marée, que des systématismes pouvaient apparaître si un même observateur réalisait l'ensemble des mesures. Les séries de mesures étudiées ici sont celles provenant d'observateurs, c'est-à-dire 1711-1716, 1757-1792, 1807-1811 et 1810-1835.

Pour toutes ces séries, seuls les observations brutes ont été exploitées car elles seules sont directement liées à l'observateur. Les hauteurs sont toutes exprimées en pieds et pouces, avec parfois même des valeurs en lignes, parfois. La valeur de 12 lignes étant égale à 1 pouce et 1 pied = 12 pouces = 144 lignes = 0,32484m (BdL, 1852).

Woodworth (1999a) applique cette méthode pour apprécier la précision des mesures en temps et en hauteur pour les observations anciennes réalisées à Liverpool.

7.3.2.1. Pour le jeu de valeurs entre 1711 et 1716.

Pour cette série de mesures, les hauteurs sont exprimées en pieds, pouces et lignes. La distribution des lignes (fig. 7.2.a) ainsi que la distribution des pouces (fig. 7.2.b) présentent deux configurations différentes. La distribution en pouces est homogène sans valeur privilégiée entre 0 et 11, ce qui n'est pas le cas pour la distribution en lignes qui montre une nette utilisation de la valeur 0 ligne et dans une très moindre mesure, de la valeur 6 lignes (c'est-à-dire un demi pouce). Cela signifie que la précision sur les hauteurs est au mieux égale à ½ pouce ($\approx 0,014m$).

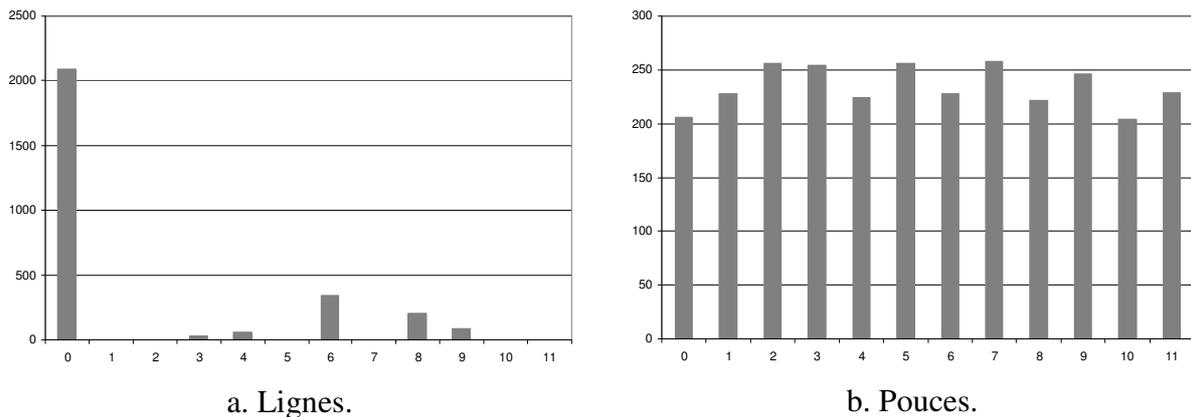


Fig. 7.2 – Distribution des valeurs en lignes et des pouces pour les hauteurs d'eau observées entre 1711 et 1716.

La distribution des valeurs en temps est homogène comme l'illustre la figure 7.3. Aucune valeur comprise entre 0 et 59 minutes n'est privilégiée par rapport à une autre. La précision en temps peut donc être évaluée à la minute près.

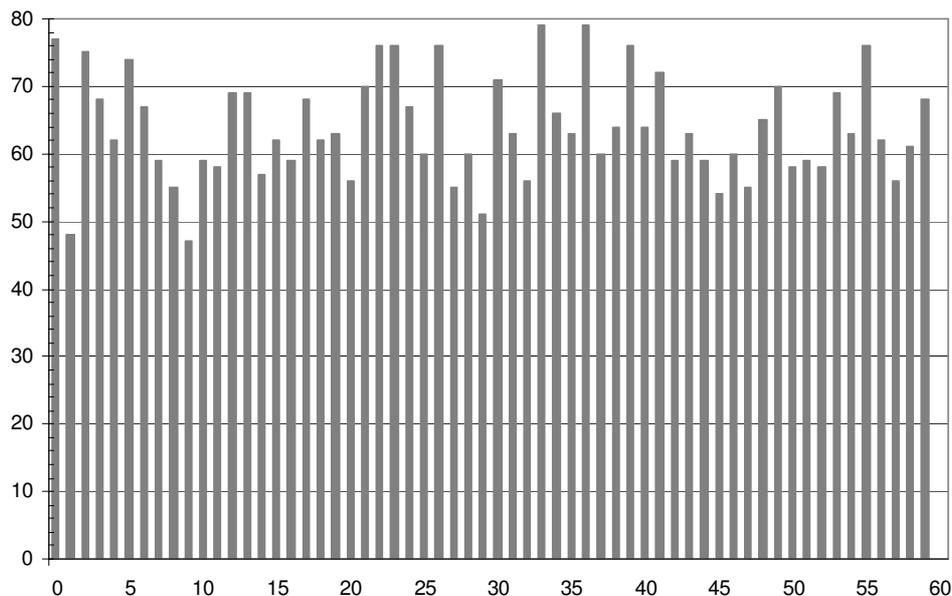


Fig. 7.3 – Distribution des valeurs en minutes associées aux hauteurs d'eau observées entre 1711 et 1716.

7.3.2.2. Pour le jeu de valeurs entre 1757 et 1792.

Les registres où sont consignées les observations pour cette période sont composés uniquement par de hauteurs exprimées en pieds et en pouces. La distribution des pouces (fig. 7.4) montre que la valeur 0 pouce et dans une moindre mesure la valeur 6 pouces sont presque deux fois plus utilisées que les autres valeurs de pouces.

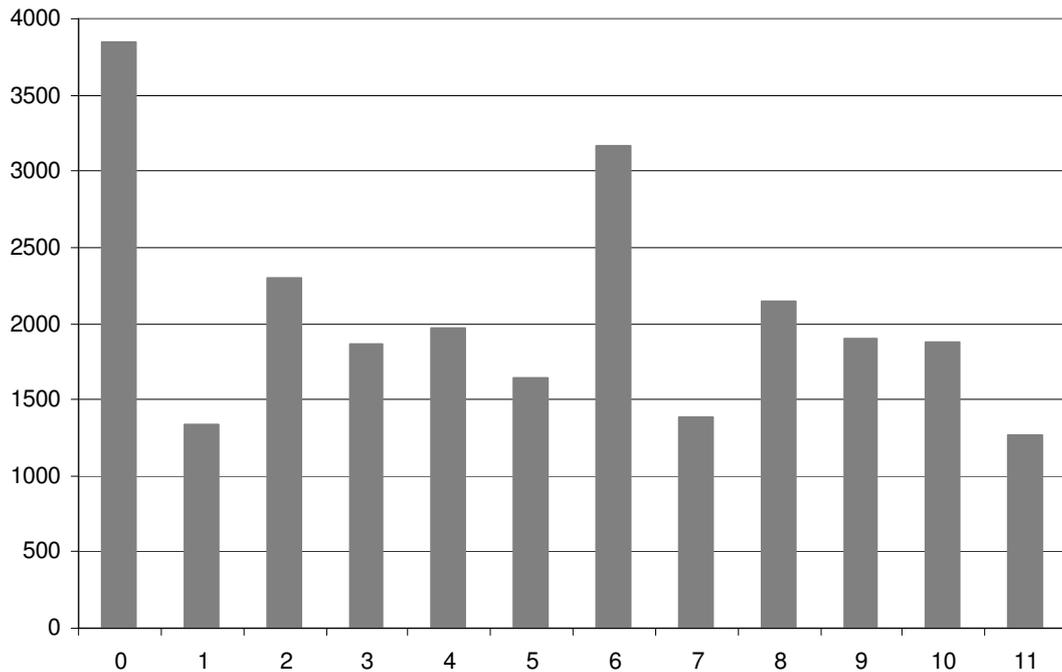
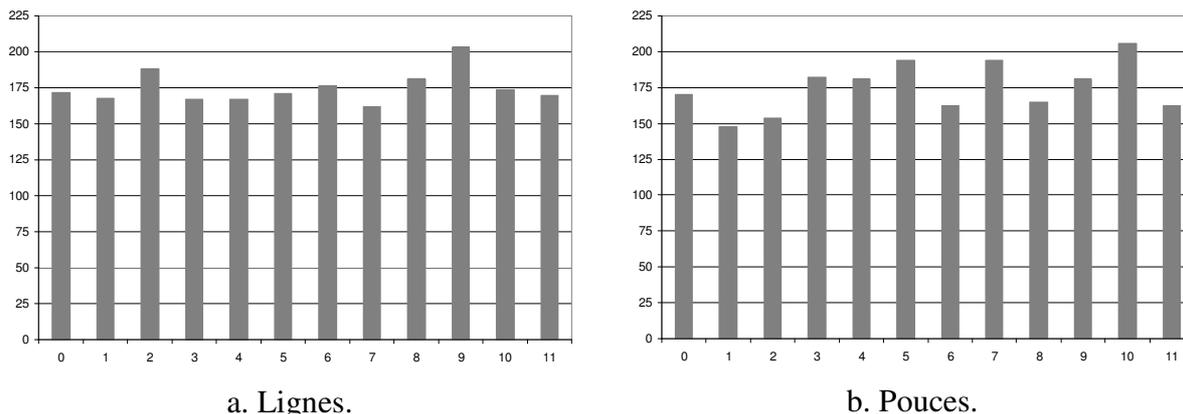


Fig. 7.4. – Distribution des valeurs en pouces pour les hauteurs d'eau observées entre 1757 et 1792.

Pour cette période, la précision des hauteurs est donc de ± 3 pouces [$\approx 0,081\text{m}$] ou mieux.

7.3.2.3. Pour le jeu de valeurs entre 1807 et 1811.

D'après Savary *et al.* (1843), les observations réalisées à la mâturation ne sont pas un modèle de qualité (cf. 4.4.3). Une échelle flottante était utilisée pour mesurer les hauteurs d'eau. Pourtant, lorsqu'on étudie les dispersions en pouces et en lignes (fig. 7 5) aucune anomalie n'apparaît : chaque ligne et chaque pouce entre 0 et 11 est proportionnellement bien répartie.



a. Lignes. b. Pouces.
 Fig. 7.5. – Distribution des valeurs en lignes et en pouces pour les hauteurs d'eau observées entre 1807 et 1811 à la mâture.

La distribution des minutes ne présente pas le même caractère que la distribution des valeurs en lignes et en pouces. Une hétérogénéité avec une utilisation quelque deux fois plus fréquente des valeurs pour 0, 10, 20, 30, 40 et 50 minutes se démarque (pics rouges) sur la figure 7.6. Ces "pics" signifient que la précision en temps est ici égale à ± 5 minutes. Une étrangeté apparaît néanmoins avec l'utilisation fréquente des valeurs 7, 17, 27, 37, 47 et 57 minutes (pics bleus) qui ne trouve aucune explication. La précision des valeurs en temps est au mieux égal au quart de 15 minutes soit 4 minutes.

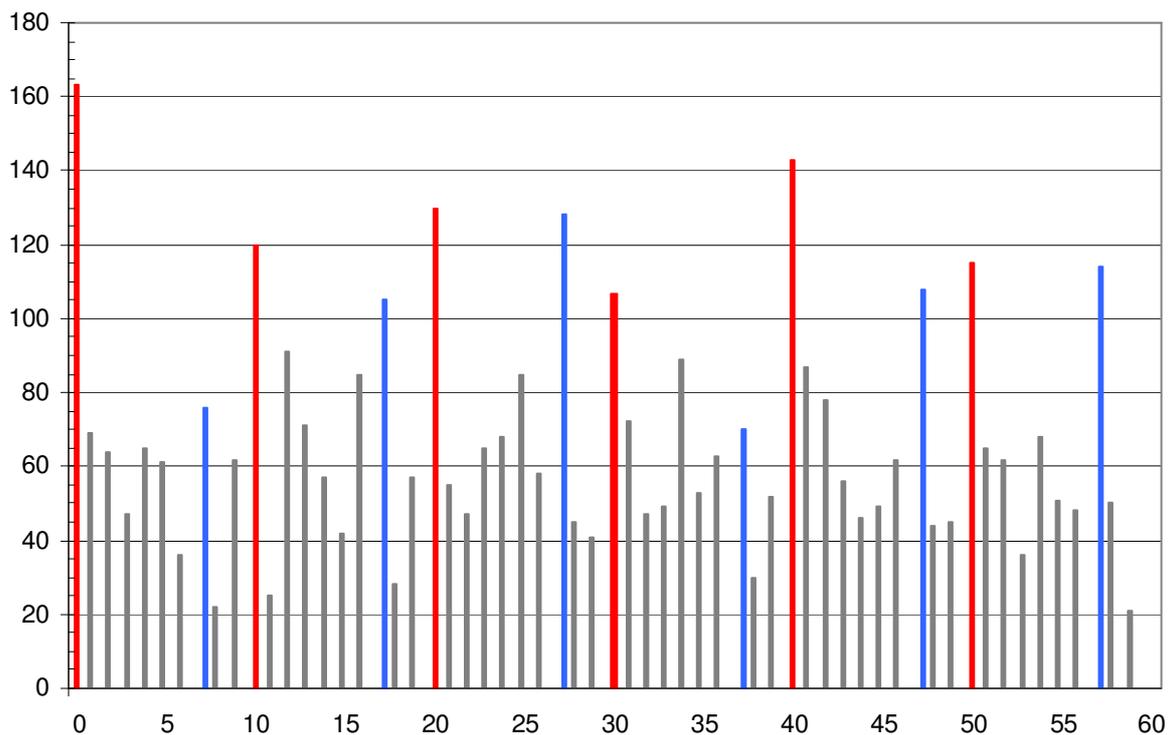


Fig. 7.6 – Distribution des valeurs en minutes associées aux hauteurs d'eau observées entre 1807 et 1811 (en rouge : pics pour 0, 10, 20, 30, 40 et 50 minutes ; en bleu : pics pour 7, 17, 27, 37, 47 et 57 minutes ; gris pour les autres).

7.3.2.4. Pour le jeu de valeurs entre 1810 et 1835.

Les mesures numérisées proviennent de l'ouvrage publié par le Bureau des Longitudes en 1843 (Savary *et al.*, 1843). Il y est indiqué que les hauteurs étaient lues sur des échelles de marée graduées en pieds et en pouces (cf. 4.4.3). Or dans cet ouvrage, toutes les mesures sont présentées en mètres. Il a donc fallu faire le calcul inverse afin de retrouver les hauteurs originales exprimées en pieds et en pouces pour en étudier leur distribution. La figure 7.7.a. nous apprend que les hauteurs, même si elles étaient lues sur des échelles graduées en pied et en pouce permettaient aux observateurs de déterminer les valeurs à la ligne près. Néanmoins, la distribution est très hétérogène : les valeurs 5 et surtout 6 lignes ressortent nettement. A noter que peu d'arrondis à 0 ligne existent. En revanche, la distribution des pouces est beaucoup plus homogène. La précision des hauteurs est évaluée ici à $\frac{1}{2}$ pouce près ($\approx 0,014\text{m}$).

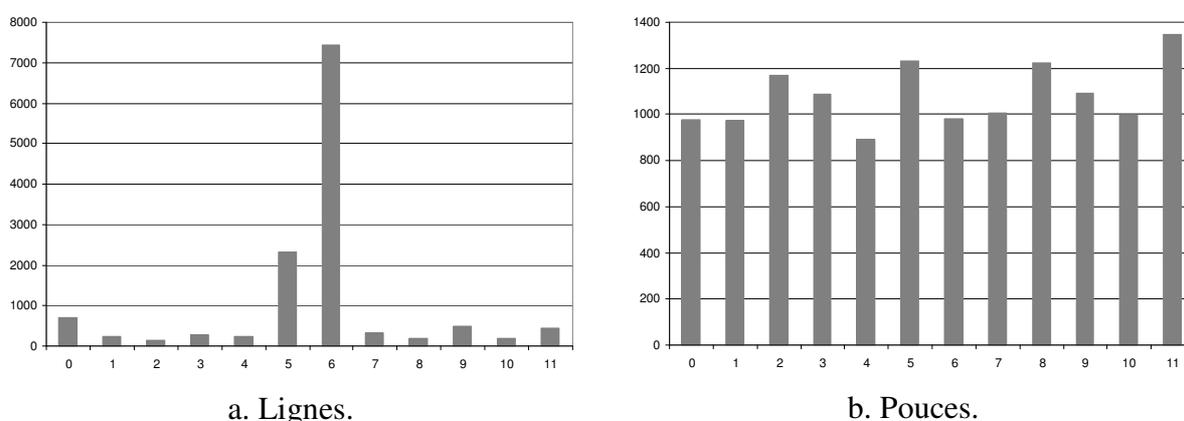


Fig. 7.7. – Distribution des valeurs en lignes et des pouces pour les hauteurs d'eau observées entre 1810 et 1835.

Tout comme la distribution en temps pour les mesures entre 1807 et 1811 cette série présente une surreprésentation des temps arrondis à 15 minutes (pics rouges) mais aussi à 10 minutes (pics bleus) près (fig. 7.8.). La précision est donc évaluée à d'environ 7,5 minutes au pire.

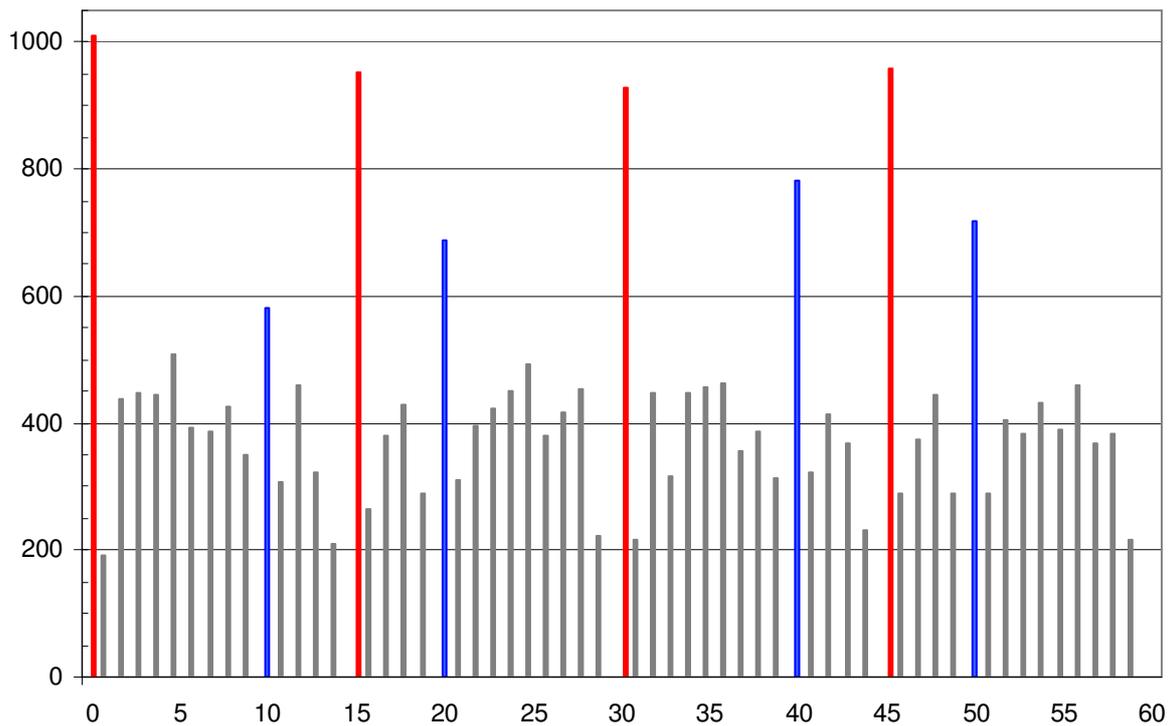


Fig. 7.8. – Distribution des valeurs en minutes associées aux hauteurs d'eau observées entre 1810 et 1835 (en rouge : pics pour 0, 15, 30 et 45 minutes ; en bleu : pics pour 10, 20, 40 et 50 minutes ; gris pour les autres).

7.3.3. Distribution des résidus en hauteur et en temps.

L'étude de la distribution des résidus en hauteur et des résidus en temps permet d'accéder à deux informations pour juger de la qualité des observations : d'abord en caractérisant la distribution par la tendance centrale qui donne une idée simplifiée de l'ordre de grandeur des résidus ; ensuite, pour savoir si les résidus sont plus ou moins homogènes, le calcul des écarts-types permet de quantifier leur dispersion.

Il existe 3 indicateurs statistiques : la moyenne, la médiane et le mode. Chacune présentent ses avantages et ses inconvénients :

- La moyenne représente la mesure la plus courante de la tendance centrale des résidus. Elle a un gros défaut : elle est sensible aux valeurs extrêmes ;
- La médiane permet d'atténuer l'influence des valeurs extrêmes enregistrées lors de circonstances exceptionnelles. ;
- Le mode est simplement la valeur la plus fréquente dans une distribution.

Lorsque la distribution est symétrique, la moyenne est utilisée. En revanche, la médiane est préférée lorsque la distribution est très asymétrique. Le mode est employé lorsque les résidus n'ont pas de relation entre eux ce qui n'est pas le cas ici.

Les statistiques de dispersion (ou de variabilité) quantifient, comme le nom l'indique, la dispersion des résidus par rapport à la valeur centrale de tendance. La moyenne est préférée au mode ou à la médiane pour servir de point de référence à partir duquel on mesure les écarts. Pour obtenir cette dispersion, il suffit de calculer l'écart-type de l'ensemble des résidus.

C'est la comparaison de ces quatre critères, pour chaque jeu de résidus, obtenus pour chacun des lots de mesures, qui permettra de déterminer la qualité des observations. C'est avec les PM et les BM que cette analyse va être réalisée. Les prédictions utilisées pour le calcul des résidus dérivent des constantes harmoniques calculées avec les observations horaires de 1846 à 2007 (cf. 1.3.2).

7.3.3.1. Distribution des résidus en temps.

Les résidus en temps sont calculés à chaque fois que cela est possible. Le jeu de mesures de 1757 à 1792 est exclu de cette étude car seules les hauteurs étaient enregistrées sans les temps. L'ère marégraphique (1846-2007) va être scindée en plusieurs sous périodes : 1846-1857, 1860-1944, 1953-1992 et 1993-2007. Chacune d'entre elle présente une spécificité particulière : la première est constituée d'observations nouvellement numérisées par nos soins, la seconde série a été obtenue à l'aide du marégraphe Chazallon, la troisième à l'aide de différents MCM installés dans le même observatoire et la quatrième à l'aide de MCN. Les indicateurs statistiques de la tendance centrale et la dispersion pour chaque série sont rassemblés dans le tableau 7.11 tandis que les courbes des distributions en hauteur pour chacune des périodes se trouvent aux figures 7.9.a à 7.9.h. Pour chaque figure, l'échelle des abscisses est identique ce qui n'est pas le cas de l'échelle des ordonnées qui varie fortement d'une série à l'autre.

Appareil	Période	Indicateurs de la tendance centrale			σ_{moy}	Référence figure
		moyenne $\pm 2\sigma$	médiane	mod		
Echelle de marée	1711-1716	-1 \pm 13	0	0	0,10	7.09.a.
	1807-1811	1 \pm 18	1	-2	0,15	7.09.b.
	1810-1835	2 \pm 8	2	1	0,01	7.09.c.
Marégraphe	1846-1857	1 \pm 8	1	0	0,03	7.09.d.
	1860-1944	-1 \pm 8	0	0	0,01	7.09.e.
	1953-1992	-1 \pm 10	-1	-1	0,02	7.09.f.
	1993-2007	0 \pm 7	0	1	0,02	7.09.g.
Totalité	1711-2007	0 \pm 9	0	0	0,01	7.09.h.

Tab. 7.11 – Tendances centrales et dispersion des résidus en temps (minute) pour les différents lots de données marégraphiques.

Dans le tableau 7.11 (et 7.12), les écarts-types accompagnant les moyennes sont choisies à 2σ correspondant à l'intervalle de confiance de 95%. Pour l'ensemble des séries, les mesures

de la tendance sont toutes proche du centrage autour de 0 min, aussi bien lorsqu'on regarde la moyenne, la médiane ou le mod. Les 3 mesures, lorsqu'elles sont très proches signifie que la distribution est normale ou Gaussienne. Ce fait est confirmé grâce par les figures 7.9.

Les dispersions mesurées autour de la tendance centrale à 0 minute varient du simple à plus du double en fonction de la série choisie. Ainsi, les mesures réalisées avec les MCN (1993-2007) présentent la dispersion la moins importante avec seulement 7 minutes à 2σ (fig. 7.9.g) contre 18 minutes pour celles de la période 1807-1811 (fig. 7.9.b). C'est d'ailleurs cette seule série de mesures qui présentent une dispersion aussi importante. Pour toutes les autres, la dispersion s'échelonne entre 7 et 13 minutes. Woodworth (1999a) pour Liverpool trouve aussi une dispersion des résidus d'environ 10 minutes. Plus généralement, les résidus obtenus à partir des enregistrements automatiques des marégraphes présentent une dispersion moins importante que ceux calculés à partir de données acquises manuellement hormis pour la période 1952-1992 ou alors, les appareils étaient entretenus par divers organismes par toujours des plus compétents (cf. 6.2.1.5).

Pour les marégraphes de l'ère numérique (1992-2007), le résidu en temps est de l'ordre de 7 minutes (intervalle de confiance de 2σ). Il représente la précision de l'appareil et les effets de surcotes / décotes.

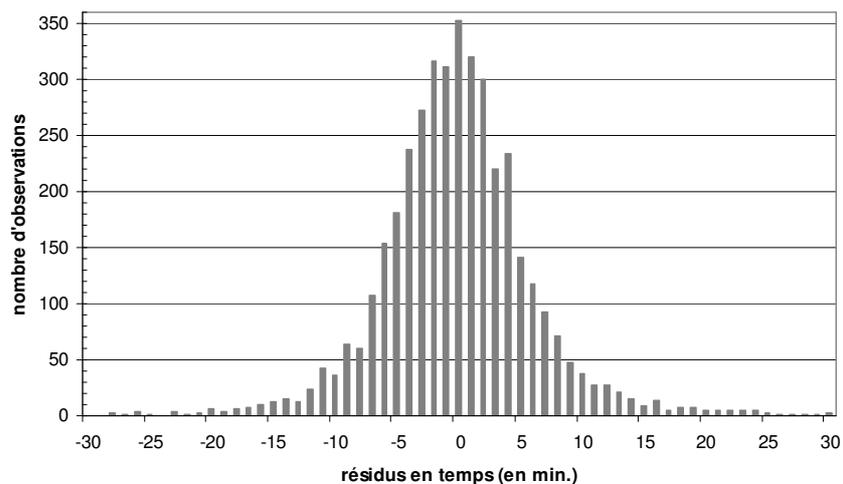


Fig. 7.9.a – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1711 à 1716 (en minutes).

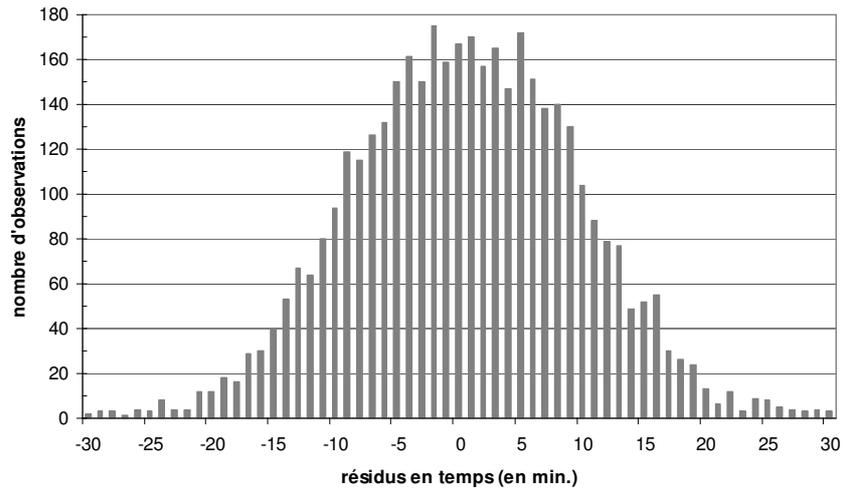


Fig. 7.9.b – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1807 à 1811 (en minutes).

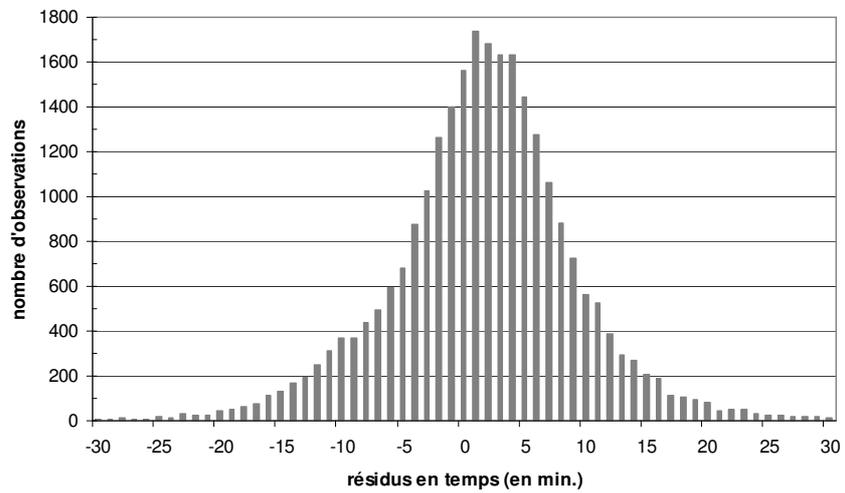


Fig. 7.9.c – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1810 à 1835 (en minutes).

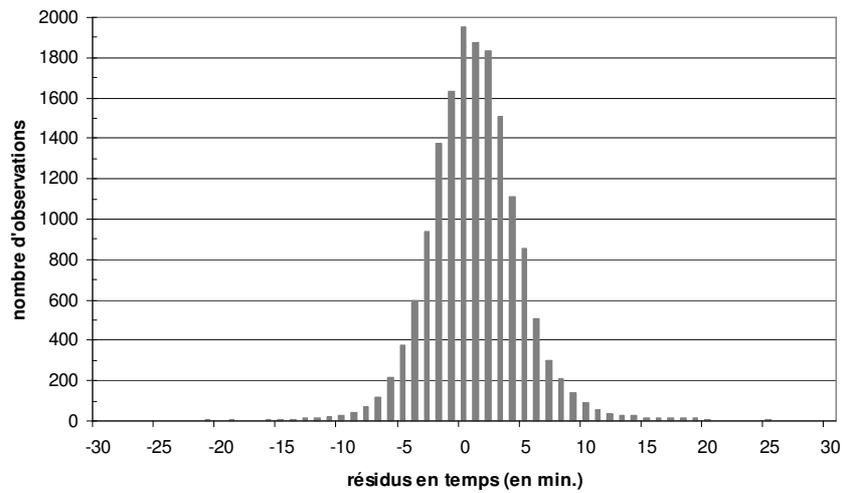


Fig. 7.9.d – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1846 à 1857 (en minutes).

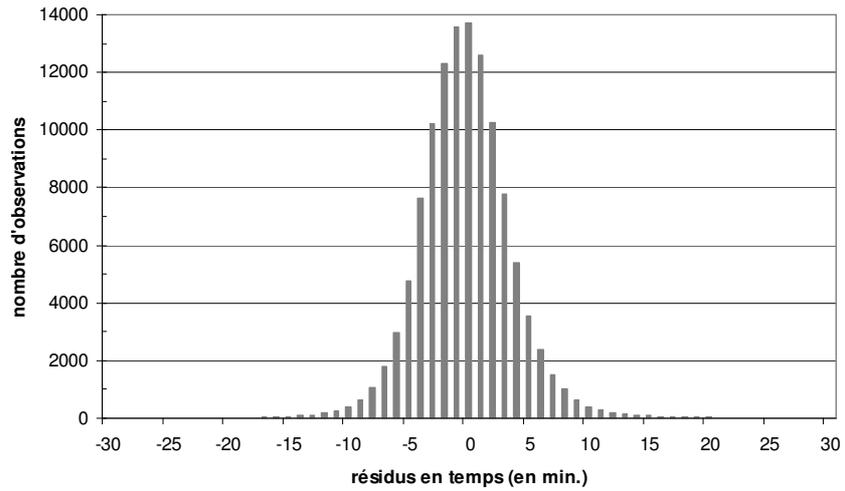


Fig. 7.9.e – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1860 à 1944 (en minutes).

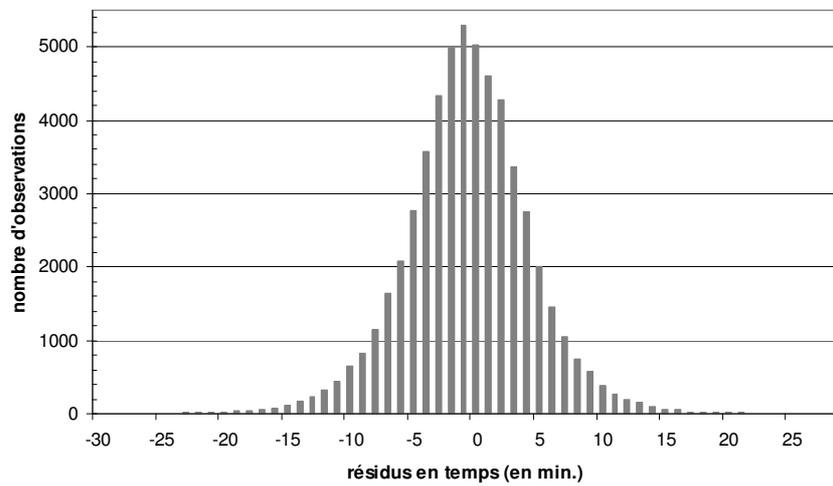


Fig. 7.9.f – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1953 à 1992 (en minutes).

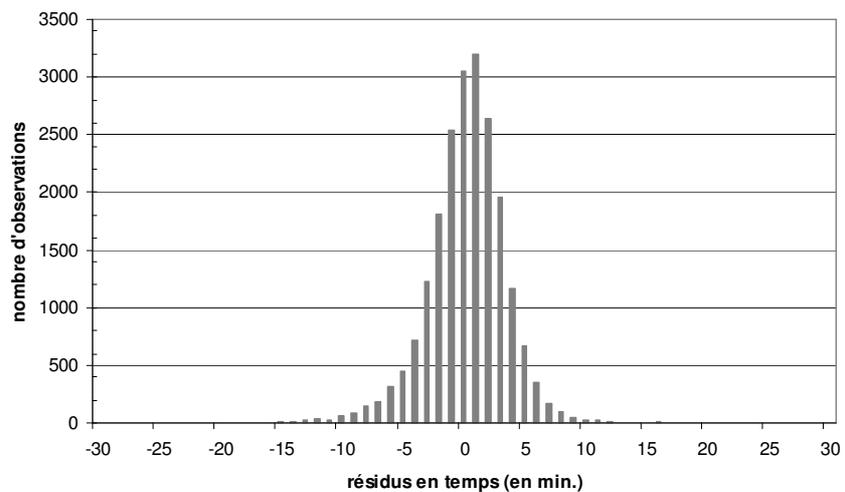


Fig. 7.9.g – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1993 à 2007 (en minutes).

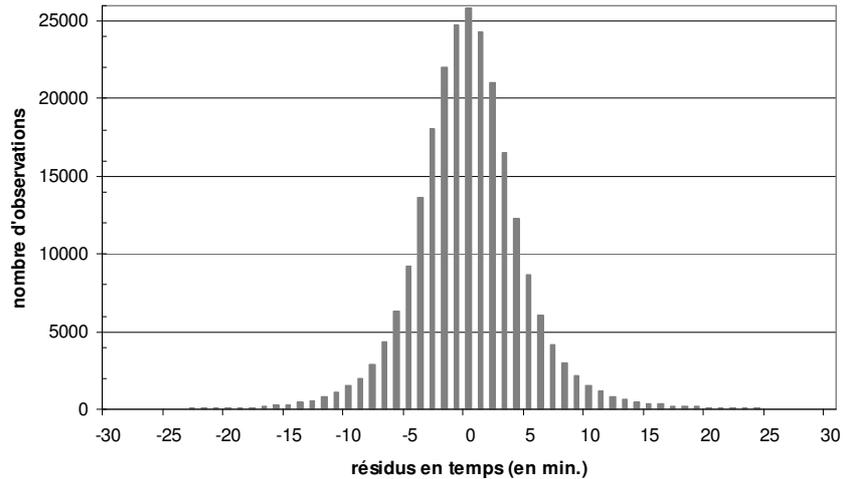


Fig. 7.9.h – Distribution des résidus en temps des PM et BM de 1711 à 2007 (en minutes).

L'étude sur les mesures de la tendance centrale est fondamentale pour vérifier si la propagation de la marée a évolué avant 1846. En effet, nous utilisons comme prédictions, les heures et hauteurs des PM et des BM calculés à partir des constantes de marée obtenues grâce à l'analyse harmonique des hauteurs horaires entre 1846 et 2007 (cf. 7.3.3 et 1.3.2). Grâce à cette méthode, Woodworth (1999a), a confirmé un changement de la marée à Liverpool. Comme ici, les moyenne, médiane et mod sont identiques pour nos différents lots de mesures, nous pouvons en conclure que pour nos deux sites de mesures (bassin de Brest et la mâtère), la marée observée était identique.

7.3.3.2. Distribution des résidus en hauteur.

Les résidus en hauteur sont calculés avec les mêmes sous périodes que pour la distribution en temps (cf. 7.3.3.1). A ces séries, s'ajoute celle de 1757 à 1792. Pareillement que précédemment, les indicateurs de tendance centrale et de dispersion sont calculés pour chaque série et rassemblés dans le tableau 7.12 tandis que les courbes de distribution en hauteur pour chacune des périodes sont rassemblées dans les figures 7.10. Pour chaque figure, l'échelle des abscisses est identique, ce qui n'est pas le cas de l'échelle des ordonnées qui varie fortement d'une série à l'autre.

Appareil	Période	Indicateurs de la tendance centrale			Dispersion	Référence figure
		moyenne $\pm 2\sigma$	médiane	mod	Ecart-type	
Echelle de marée	1711-1716	1 \pm 15	-1	3	0,23	7.10.a.
	1757-1792	1 \pm 15	0	-3	0,39	7.10.b.
	1807-1811	-1 \pm 16	-1	0	0,25	7.10.c.
	1810-1835	0 \pm 15	-1	-4	0,10	7.10.d.
Marégraphe	1846-1857	-1 \pm 14	+1	-5	0,11	7.10.e.
	1860-1944	0 \pm 14	-1	-3	0,04	7.10.f.
	1953-1992	0 \pm 14	-2	-2	0,06	7.10.g.
	1993-2007	1 \pm 13	-2	-3	0,10	7.10.h.
Totalité	1711-2007	0 \pm 15	-1	-2	0,03	7.10.i.

Tab. 7.12 – Tendances centrales et dispersion des résidus en hauteur (cm) pour les différents lots de données marégraphiques.

La prédiction des hauteurs oscille autour du niveau moyen Z_0 qui est calculé sur la période 1846-2007 lors de l'analyse harmonique d'un fichier d'observations de la même manière que dans la section 1.3.2.1. Il est déterminé tout simplement en calculant la moyenne de l'ensemble des hauteurs. Lorsque le fichier d'observations, comme celui utilisé à Brest, contient plusieurs dizaines d'années de mesures, l'évolution du niveau moyen de la mer affecte ce niveau moyen (cf. 7.3.4). Pour y remédier, une fonction linéaire est appliquée aux prédictions afin que les hauteurs calculées suivent également l'évolution du niveau moyen et que ne soit pas introduit dans les résidus cette évolution significative du niveau moyen (≈ 20 cm entre 1807 et 2007).

Pour toutes les séries, la distribution des résidus sont centrées autour de 0cm, pour la moyenne, la médiane ou le mode. Néanmoins, les distributions présentent une légère asymétrie comme le montre les figures 7.10 avec une distribution des résidus plus importante entre +40 et +50cm qu'entre -40 et -50cm. Les résidus négatifs sont des décotes, c'est-à-dire une hauteur d'eau inférieure à celles prédites. A l'inverse, un résidu positif signifie que la hauteur d'eau est supérieure à la prédiction. Bouligand et Pirazzoli (1998) remarquent dans une étude similaire englobant l'ensemble des résidus en hauteurs horaires (1860-1994) que le nombre de surcotes est supérieur à celui des décotes et que le phénomène est accentué pour la période récente (1953-1994), ce qui semble plus visible sur le graphique 7.10.h avec la période 1993-2007.

Les résidus mesurés autour de la tendance centrale de 0cm sont globalement identiques, variant entre 13cm pour la série 1993-2007 et 15cm pour le jeu de données allant de 1757 à 1792. En revanche, la dispersion des hauteurs lues sur les échelles de marée varie du double au quadruple par rapport à celle calculée pour les mesures obtenues avec les MCN.

La précision des mesures s'améliore avec l'avènement des marégraphes mais qu'en conclure vis-à-vis des surcotes/décotes liées aux fluctuations météorologiques depuis 300 ans (cf. 1.1.2.3) ? Ces dernières peuvent également avoir variées durant ce laps de temps. Une analyse plus poussée, malheureusement non réalisée dans le cadre de ce travail, devrait permettre l'apport de nouveaux éléments de réponse.

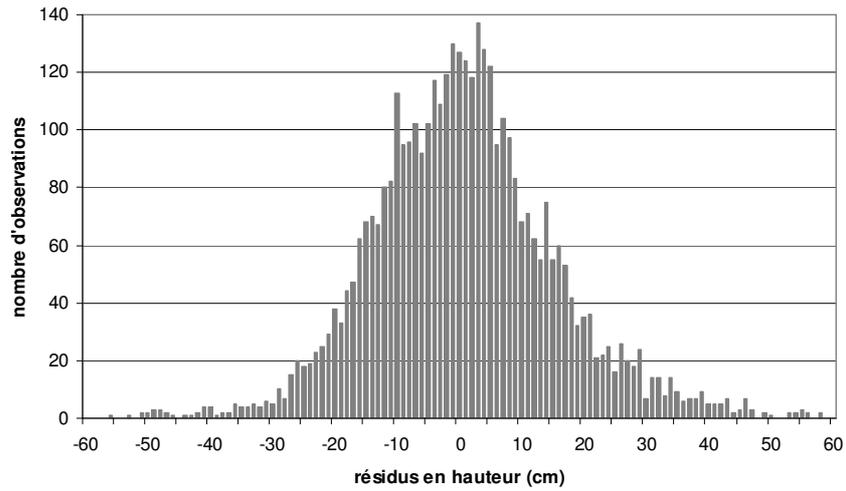


Fig. 7.10.a – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1711 à 1716 (en cm).

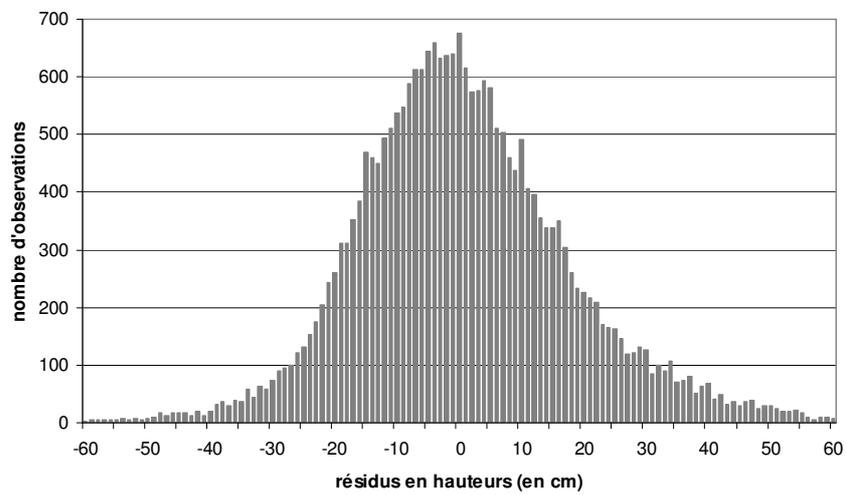


Fig. 7.10.b – Distribution des résidus en hauteurs des PM entre 1757 à 1792 (en cm).

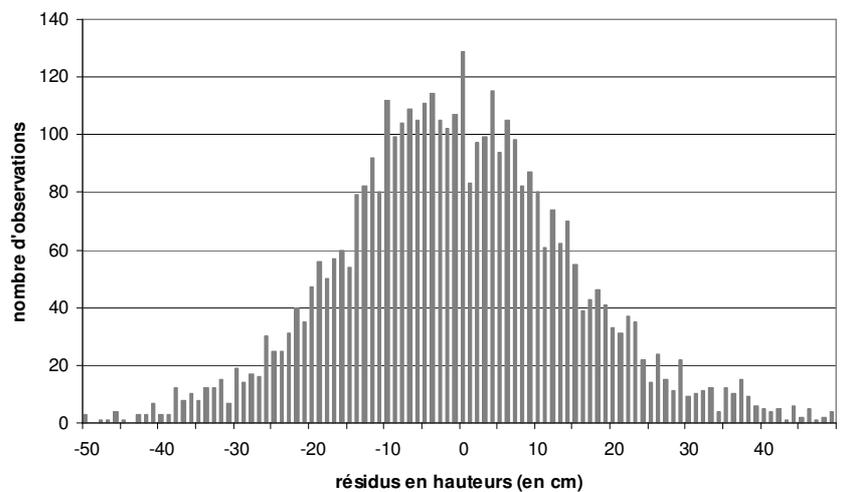


Fig. 7.10.c – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1807 à 1811 (en cm).

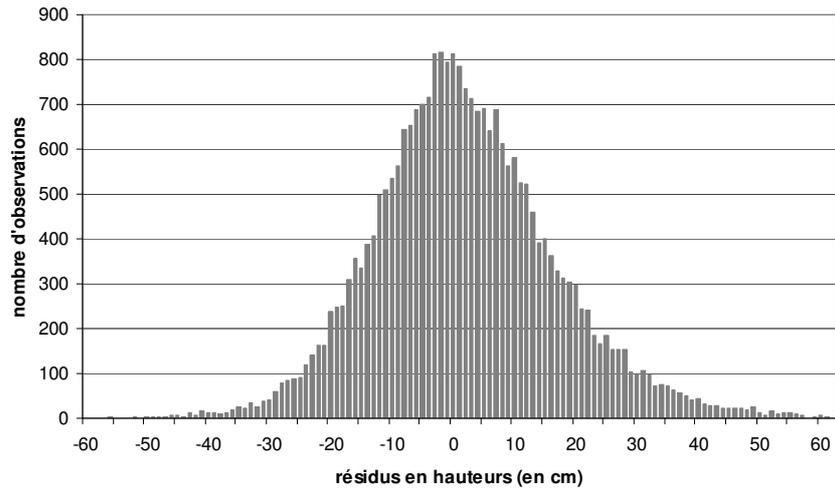


Fig. 7.10.d – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1810 à 1835 (en cm).

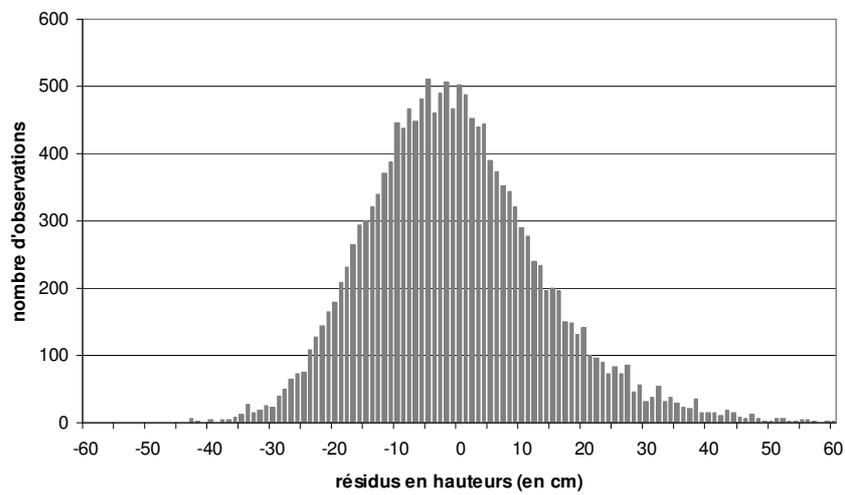


Fig. 7.10.e – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1846 à 1857 (en cm).

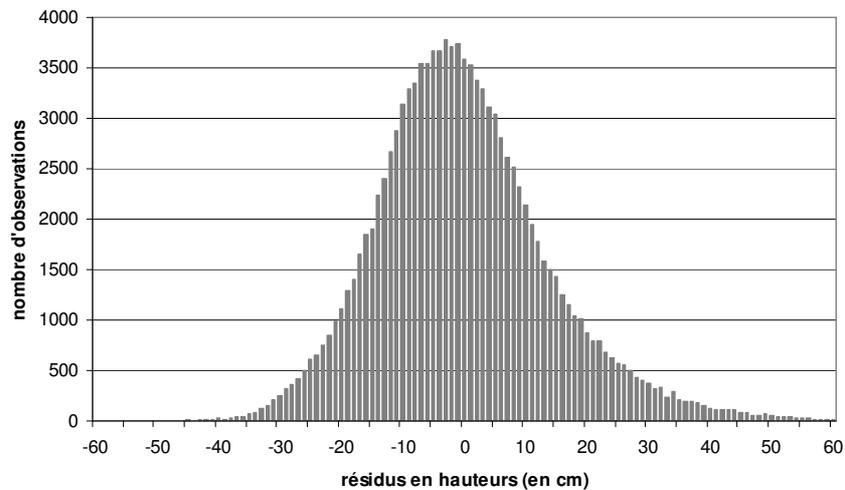


Fig. 7.10.f – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1860 à 1944 (en cm).

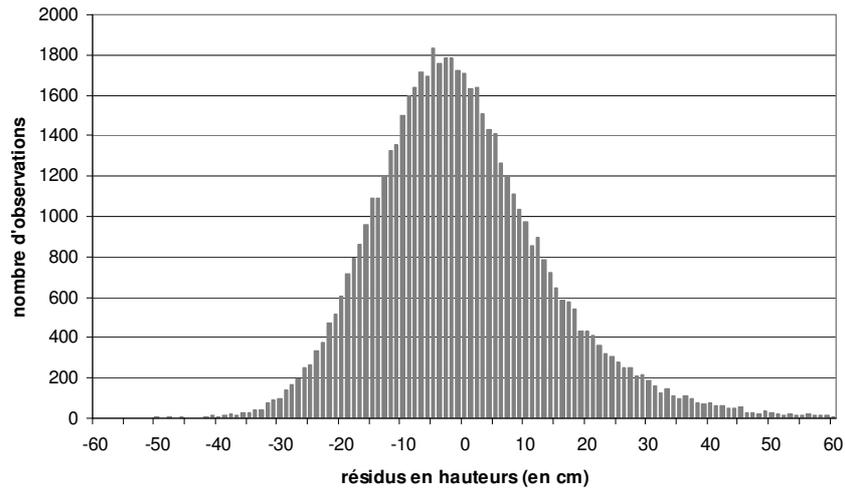


Fig. 7.10.g – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1953 à 1992 (en cm).

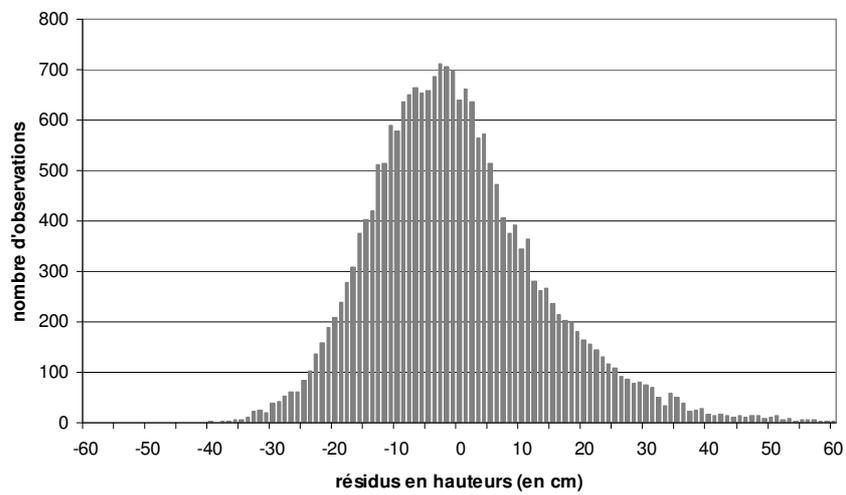


Fig. 7.10.h – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1993 à 2007 (en cm).

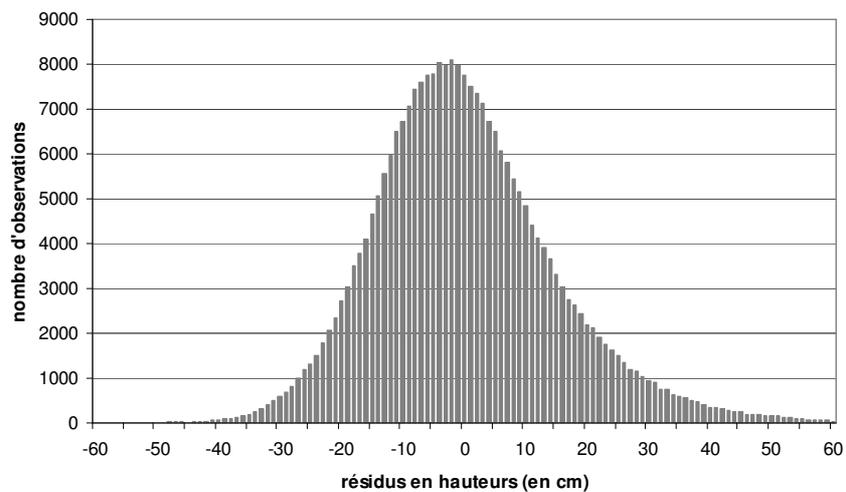


Fig. 7.10.i – Distribution des résidus en hauteurs des PM et BM de 1711 à 2007 (en cm).

7.3.4. Ecart quadratique moyen des résidus.

7.3.4.1. Présentation.

La partie "*Tide gauge data*" de l'article paru en 2006 (cf. 7.1) explique succinctement la méthode utilisée pour calculer les RMS (Root Mean Square en anglais soit écart quadratique moyen en français) annuels des résidus. La voici de manière détaillée :

1- D'abord, il faut enlever la tendance liée à l'évolution du niveau de la mer des observations pour être homogène avec les prédictions qui elles ne sont affectées par ce facteur (7.3.2.2). Pour ce faire, à chaque mesure disponible est extraite la prédiction qui lui est associée. Pour chaque jour d'observation, La différence journalière entre les observations et les prédictions est calculé et enlevé à l'ensemble des observations.

2- Une fois chaque hauteur observée affectée de son terme correctif journalier, les résidus sont calculés pour chaque observation avec la prédiction qui lui est propre. Pour chaque année, le RMS est calculé avec l'ensemble des résidus le constituant.

Les avantages de cette méthode sont multiples : elle est simple d'application ; elle peut être utilisée avec des observations horaires, des PBM, des PM, des BM, des PBM diurnes, PBM nocturnes, etc. ; La méthode est indépendante de l'évolution du niveau de la mer qui n'est pas constante (cf. 8.1.3.2) ; les lacunes d'observations affectant certaines années ne sont plus un obstacle pour vérifier la qualité de ces observations. Le but initial de cette procédure était d'évaluer la cohérence entre les observations et prédictions, mais elle s'est révélée très utile pour détecter les défauts d'observation.

7.3.4.2. RMS calculés avec les résidus horaires.

Lors de la rédaction de l'article, une partie des données était en cours de numérisation expliquant de fait les lacunes présentes sur les figures 7 et 8 l'illustrant (Wöppelmann *et al.*, 2006b). Les graphiques ci-après (fig 7.11 et fig. 7.13) utilisent cette fois la totalité des valeurs disponibles et expliquées :

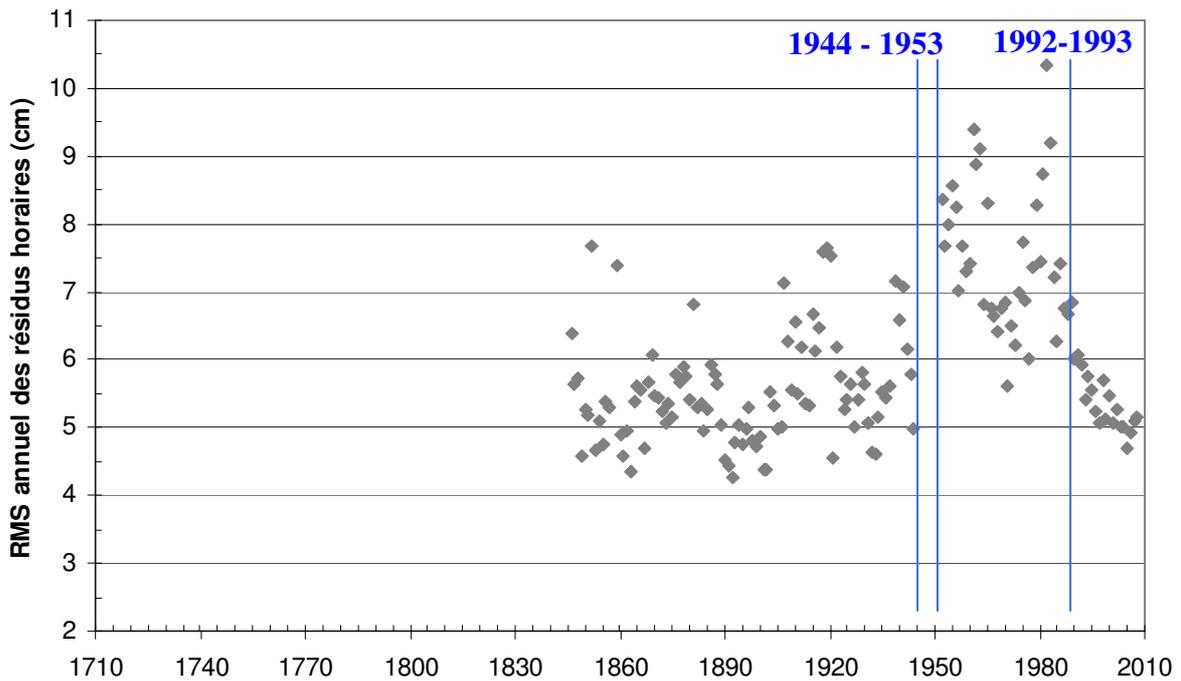


Fig. 7.11 – RMS annuels des résidus calculées avec les hauteurs horaires (cm).

Les RMS annuels des résidus "horaires" sont compris entre 4,28cm (1892) et 10,35cm (1982). La moyenne, calculée avec 154 RMS annuels, est égale à 5,99 avec une dispersion quantifiée à 1,20 cm. Le tableau 7.13 complète la figure 7.11 en donnant les indicateurs de la tendance centrale, de la dispersion et la précision en moyenne de l'instrument pour les différentes ères définies précédemment :

Appareil	Période	Indicateurs de la tendance centrale			Dispersion	Précision en moyenne de l'instrument	Référence figure
		moyenne	médiane	mod			
MCM Chazallon	1846-1944	5,52	5,4	5,1	0,79	2,1	7.12.b.
MCMs	1953-1992	7,38	7,2	6,7	1,09	5,4	7.12.c.
MCNs	1993-2007	5,21	5,1	5,1	0,29	1	7.12.d.
Totalité	1846-2007	5,99	5,6	5,5	1,20	3,2	7.12.a.

Tab. 7.13 – Tendances centrales du RMS et indications sur la dispersion en hauteur (cm) pour les différents lots de données marégraphiques.

La précision en moyenne des instruments a été évaluée de la manière suivante. Sachant que pour l'ère des MCNs, les spécifications actuelles recommandent une précision au moins égale au cm (COI, 2006), nous considérons que la précision en moyenne de l'instrument est effectivement égale à 1cm. Une hypothèse raisonnable qui est confirmée par les expériences d'étalonnage menées 'in situ' ces dernières années (Martin Miguez *et al.*, 2008). La moyenne des RMS annuels des résidus pour la période 1993-2007 est égale à 5,21cm. Cette moyenne contient principalement deux signatures : le bruit de l'instrument et le bruit météorologique (surcote/décote), soit: $RMS^2 = \text{appareil}^2 + \text{météo}^2$. Le bruit météorologique en moyenne peut

être estimé pour la dernière période. Il est égal à 5,1cm. En émettant l'hypothèse que le bruit météorologique n'ait pas changé depuis 1846, il est alors possible de calculer les précisions en moyenne des instruments pour les périodes 1846-1944 et 1953-1992. Une interprétation est alors possible en gardant toujours en mémoire les hypothèses de départ.

Dans la figure 7.11, trois périodes semblent se dégager :

- la première entre 1846 et 1944 présente une moyenne des RMS de 5,52cm avec une dispersion égale à 0,79cm. La dispersion y est homogène. Nous sommes dans l'ère du premier observatoire avec l'utilisation du marégraphe "Chazallon" (cf. 6.2.1.2). L'appareil est suivi et entretenu en permanence (cf. 5.3.4.3 et 6.2.1.5). La précision en moyenne du marégraphe est estimée à 2,1cm.

- la deuxième entre 1953 et 1992. Avec une moyenne de 7,38cm et une dispersion de 1,09cm, cette période présente la moyenne de RMS la plus forte. Durant cette ère, plusieurs MCM ont été utilisés. Parfois lorsque le marégraphe principal, mieux surveillé, tombait en panne, les données alors exploitées étaient tirées des enregistrements du marégraphe secondaire, peu suivi et peu contrôlé (cf. 6.2.1.2). Entre 1953 et 1963, ainsi qu'entre 1975 et 1983, les variations des RMS sont les plus fortes. Durant ces deux intervalles de temps, le Service OCI avait la charge de l'observatoire. On se trouve dans la situation décrite dans le 8^{ème} point présenté en 1961 par le PSMSL (cf. 5.4.1.2) : les surveillants du marégraphe n'effectuaient pas leur mission de la manière la plus rigoureuse. A l'inverse, à l'intérieur de cette période, deux sous-ensembles semblent affectés d'une dispersion annuelle moindre : 1964-1974 et 1984-1992 ; le SHOM était alors chargé du contrôle des appareils (cf. 6.2.1.5) ! La précision en moyenne des instruments est cette fois de 5,4cm soit le quintuple des recommandations actuelles et plus de deux fois supérieures qu'avec le même type d'appareil, utilisé précédemment. La qualité des MCMs n'est pas à remettre en cause. Seul, le manque de contrôle et de suivi régulier des appareils entre 1953 et 1992 explique cette importante imprécision en moyenne des instruments.

- la troisième entre 1993 et 2007 résulte des conclusions tirées de la période précédente. En effet, l'installation de MCN au détriment des MCM est conduite pour les raisons indiquées dans la section 5.4.3.1. Le premier MCN est installé en 1993 à Brest. Avec une moyenne de 5,21cm avec la dispersion la plus faible : 0,29cm.

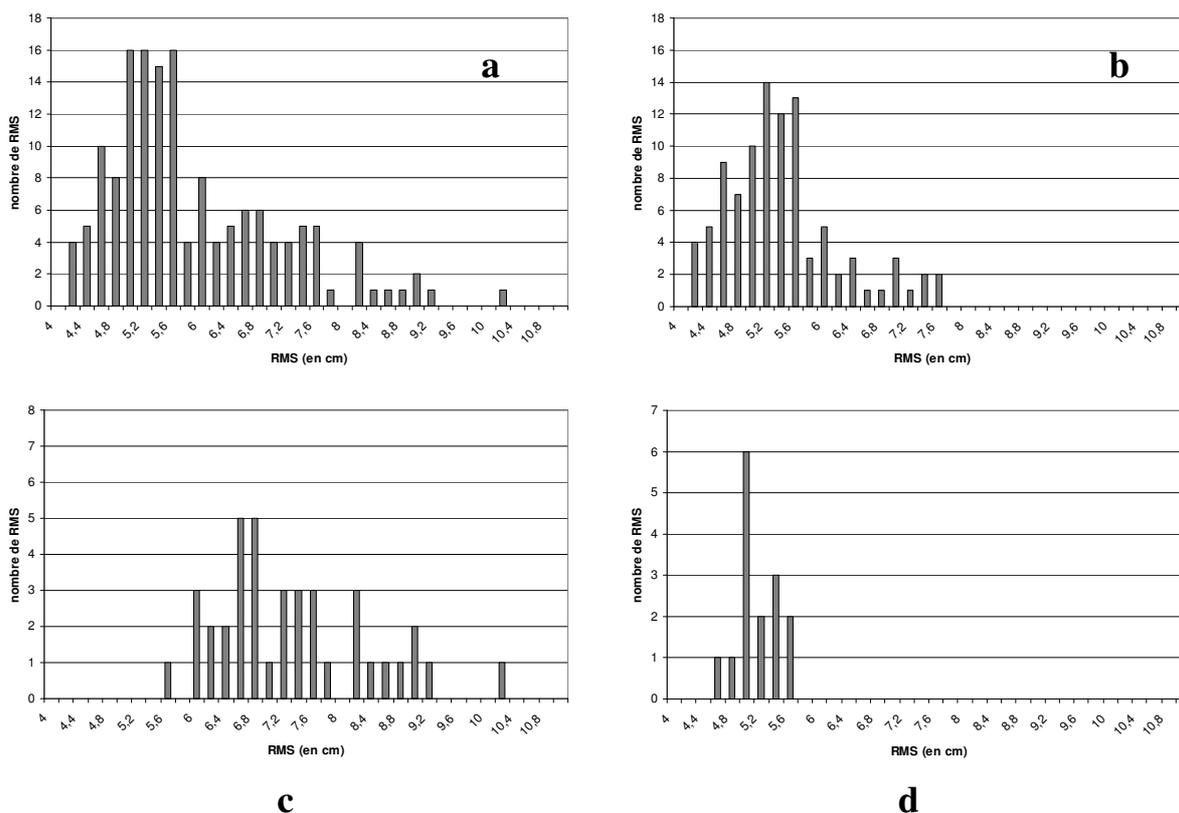


Fig. 7.12 – Distribution des RMS annuels de 1846 à 2007 (a), de 1846 à 1944 (b), de 1953 à 1992 (c) et de 1993 à 2007 (d).

Les moyennes, médianes et modes des RMS sont presque identiques (tab. 7.13). Les distributions pour 1846-2007 (fig.7.12.a) et pour 1846-1944 (b) semblent asymétriques. C'est pourquoi les dispersions ne sont donné ici qu'à titre informatif et dans la section suivante, ils n'apparaîtront pas. Enfin, peu de RMS sont disponibles entre 1953-1992 (c) et 1993-2007 (d) rendant difficile toute analyse à partir des graphiques.

7.3.4.3. RMS calculés avec les résidus des PBM.

De la même manière que précédemment, la figure 7.13 présente la totalité des RMS calculés à partir des résidus annuels des PBM :

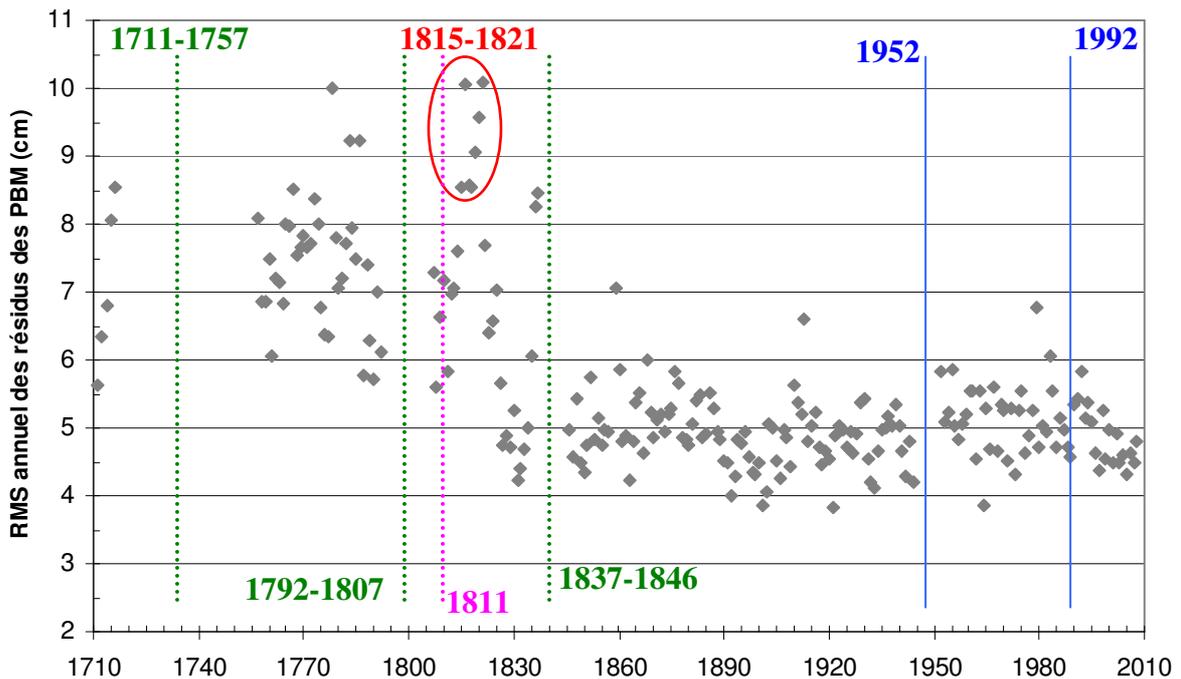


Fig. 7.13 – RMS annuels des résidus calculés avec les PBM (cm).

La moyenne calculée avec 227 RMS, 5,66cm est identique à la moyenne obtenue précédemment. Les RMS varient de 3,83cm (1921) à 10,09cm (1821). Deux périodes se distinguent clairement :

- la première, entre 1711 et 1835, correspond aux hauteurs lues sur des échelles de marées, la moyenne des RMS pour cette période valant 7,12cm pour cette période. Celle-ci est caractérisée par une diminution visible de la moyenne annuelle des résidus, laquelle atteint même la valeur de la seconde période pour les dernières années. La moyenne des RMS entre 1815 et 1821 (ellipse rouge sur la figure) s'écarte de la moyenne générale de cet ensemble avec 9,20cm. En 1822, l'échelle en pierre utilisée depuis plusieurs années est remplacée par une échelle en bois car les inscriptions devenaient illisibles (cf. 4.4.3). Peut-être d'ailleurs l'étaient-elles depuis quelques années déjà, rendant ainsi plus difficile la lecture des hauteurs pour les observateurs.

- la seconde correspond à l'acquisition automatique des observations : 1846-2007. La moyenne des RMS des résidus pour la période 1846-2007 est égale à 4,96cm soit une valeur identique aux incertitudes près, à celle calculée dans le paragraphe précédent. La dispersion plus importante du RMS, identifiée pour la période 1952-1992 sur la figure 7.11, apparaît très peu sur la figure 7.13. L'explication est simple : le calcul des résidus horaires des hauteurs est très sensible aux décalage en temps des observations. Un marégraphe mal réglé en temps, un tambour ayant une marche irrégulière ou un marégramme mal posé introduisent des erreurs en temps. Ce problème entache alors chaque hauteur d'eau qui n'est plus réellement donnée à la bonne heure et affecte alors les résidus horaires en hauteur et donc les RMS (écarts en hauteurs visibles aux extrémités des segments rouges, figure 7.14). Avec le calcul des RMS des résidus en hauteurs des PBM ce n'est pas le cas. La hauteur de la BM ou de la PM sera toujours identique, avec ou sans le décalage en temps (visible sur le gros plan des BM).

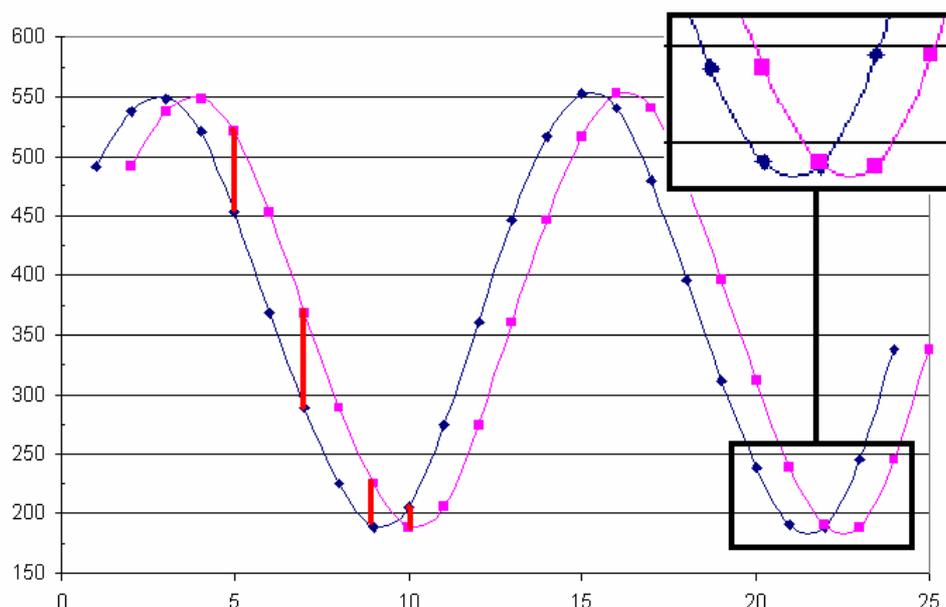


Fig. 7.14 – Effets du décalage en temps sur des observations horaires du niveau de la mer. En bleu, la courbe de marée bien calée en temps, en violet celle décalée. En rouge, le décalage en hauteur introduit par la courbe de marée mal calée. L'encadrement, durant la BM montre que le décalage en temps n'affecte pas les résidus en hauteurs des BM ou PM.

7.3.5. Bilan sur la qualité des mesures.

Tous les contrôles statistiques qui viennent d'être détaillés permettent d'avoir une meilleure connaissance de la qualité des mesures. Le contrôle des mesures est indispensable à réaliser lorsqu'on étudie par exemple, des évolutions minimales du niveau de la mer de l'ordre du millimètre par an (cf. 8.1.1). Les contrôles sont d'autant plus nécessaires que les jeux de mesures utilisés n'ont pas tous été obtenus de la même manière : lecture à l'échelle de marée jusqu'en 1837, enregistrement mécanique des hauteurs à partir de 1846 et utilisation des MCN depuis 1992. Pour autant, la qualité des mesures dépend toujours de l'action de l'Homme : un appareil ou un observatoire mal entretenu, vérifié, contrôlé peut rapidement fournir des observations moins précises. C'est ce qui c'est passé par exemple dans les années 1952-1963 et 1975-1983 (cf. 7.3.4.2).

Woodworth (2006), dans son bilan des études menées sur le changement du niveau de la mer, critique le fait que les mesures sont utilisées sans pondération, c'est-à-dire sans prendre en compte leur qualité. A notre connaissance, aucune étude similaire n'a encore été publiée aujourd'hui.

Grâce aux RMS annuels des résidus déterminés (cf. 7.4.4.2 et 7.4.4.3), il est possible de prendre en compte cette qualité relative des observations pour de telles analyses. La pondération qui sera appliquée pour chaque moyenne annuelle des niveaux de la mer sera choisie comme étant inversement proportionnelle à la moyenne annuelle du RMS déterminé (cf. 8.1.2.7, cf. 8.1.3, cf 8.1.5).

Chapitre 8. Tendances, accélération et évolution des composantes du niveau de la mer depuis 300 ans à Brest.

"Le niveau des océans est une autre mesure fondamentale de notre climat, un outil essentiel pour comprendre la dynamique du changement et les conséquences planétaires". Lee-Lueng Fu, responsable scientifique de la mission franco-américaine Jason-2, du Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la Nasa à Pasadena (Californie). AFP 19/06/2008 12h00.

Dans le contexte actuel du changement climatique, l'étude des tendances et d'accélération du niveau de la mer contribue à mieux comprendre et prédire l'évolution du niveau de la mer dans les 10, 50 ou 100 prochaines années (cf. 8.1). Ce processus de prédiction ne peut pas être entrepris si les observations sur lesquelles il s'appuie ne sont pas fiables c'est-à-dire si nous n'avons pas une idée précise de leur qualité (incertitudes) (cf. 7.3 et Woodworth, 2006).

L'originalité de disposer de 300 années d'observations va conduire à utiliser, pour le calcul des tendances et de l'accélération, des valeurs en prenant en compte les caractéristiques prises à chaque jeu de données à notre disposition. Pour ce faire les valeurs moyennes obtenues (MTL, MHW, MLW, etc...) seront comparées à la référence, les MSL annuels calculées avec des observations horaires.

Différentes tendances et accélérations, à partir d'une même série vont ressortir montrant la complexité, si besoin était, d'estimer ces paramètres. De plus, pour la première fois à notre connaissance, une analyse prenant en compte la qualité relative des observations dans le calcul des tendances et accélération du niveau de la mer est menée à bien.

Dans ce chapitre, avec les tendances et les accélérations déterminées, nous prédisons la hausse possible du niveau de la mer à Brest pour l'horizon 2100

Avoir une longue série du niveau marin permet également la détection d'éventuels signaux basses fréquences. L'évolution de l'onde semi-diurne M2 de la marée découvert à Brest suggère par exemple l'existence d'un phénomène cyclique qui reste encore à expliquer (cf. 8.2.1).

8.1. Tendances et accélération.

A partir des données disponibles, les tendances et accélération vont être calculées pour Brest en utilisant d'abord les moyennes annuelles "traditionnelles" classiquement utilisées dans les études, puis en innovant dans le choix des moyennes annuelles utilisées. Ces préférences sont dictées par les spécificités originales des données à notre disposition. Tout d'abord, un état des connaissances actuelles va permettre de faire un point sur l'étude des tendances et accélération.

8.1.1. Etat de l'art.

Les trois derniers rapports de l'IPCC (2007, 2001 et 1995) montrent des évolutions notables tant sur les tendances calculées que sur l'accélération du niveau de la mer. Naturellement, ces deux premiers paramètres affectent les prévisions données pour le 21^{ème} siècle. Le tableau 8.1 reprend les chiffres de l'IPCC :

Rapport IPCC (année)	Tendances (mm/an)		Accélération (mm/an ²)	Prévision de la hausse en 2100 (m)
	Marégraphie	Altimétrie		
n°2 1995	1895-1995 1,0 à 2,5		0,22	0,95
n°3 2001	1910-1990 1,5 +/- 0,5		0,014	0,09 à 0,88
n°4 2007	1961-2003 1,8 +/- 0,5	1993-2003 3,1 +/- 0,7	1870-2000 0,013	0,13 à 0,58

Tab. 8.1 – Estimation des tendances et accélérations du niveau de la mer et prévisions pour la fin du 21^{ème} siècle.

Entre le 2^{ème} et le 4^{ème} rapport de l'IPCC (respectivement publiés en 1995, 2001 et 2007), de nombreuses études et analyses ont permis de passer d'une fourchette large de la tendance du niveau de la mer à des tendances plus précises ainsi que des valeurs pour l'accélération et des prévisions de la hausse du niveau moyen de la mer en 2100. Entre les rapports de 1995, 2001 et 2007, la hausse prévue a ainsi été revue globalement à la baisse passant de 0,95 (1995) vers 0,09-0,88m (2001) et 0,13-0,58m (2007) soit une diminution de l'ordre de 31% entre les deux dernières estimations. En effet, car derrière ces chiffres apparemment à la baisse, la réalité serait à la hausse (cf. URL : <http://www.realclimate.org/>, consulté le 5 octobre 2008) suivant les incertitudes incluses ou pas dans les fourchettes. Les deux sections suivantes détaillent les recherches menées sur les tendances et sur l'accélération.

8.1.1.1. Méthodes de calcul.

Les tendances et les accélérations sont respectivement déterminées en calculant la régression linéaire et la régression quadratique par la méthode des moindres carrés. La méthode, indépendamment élaborée par Legendre (1806) et Gauss (1809) consiste à comparer les hauteurs moyennes du niveau de la mer (y_i) obtenues aux temps x_i avec une fonction mathématique $f(\theta)$ dont les paramètres θ sont déterminés afin de minimiser $d(\theta)$. La valeur de $d(\theta)$ est obtenue en additionnant chaque différence, élevée au carré (formule ci-dessous) :

$$d(\theta) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \theta))^2$$

La régression linéaire applique une fonction $f(x_i, \theta)$ tel que : $y_i = a + bx_i$ afin d'ajuster la droite aux données. Les coefficients de régression a (interception) et b (pente) sont déterminés afin de réduire au minimum la différence au carré entre les données produites par l'équation et les mesures originales.

Au lieu d'une seule tendance linéaire appliquée pour l'ensemble de la série de données, deux (voire plus) régressions linéaires peuvent être mises en pratique, les unes à la suite des autres dans le jeu de données. Une accélération positive du niveau des mers se confirme lorsque le coefficient des pentes augmente avec les années. La localisation des "points d'inflexion" entre deux pentes est en revanche subjectif, en cherchant par exemple des pentes qui donnent des valeurs cohérentes aux erreurs près en leurs limites d'application c'est-à-dire en introduisant des contraintes plus objectives (Woodworth, 1990).

Une autre méthode pour étudier et quantifier l'accélération du niveau de la mer et d'appliquer une régression quadratique aux moyennes du niveau de la mer. Cette fois, la fonction $f(x_i, \theta)$ est tel que : $y_i = a + bx_i + cx_i^2$ avec c , le terme quadratique de la régression (Van Onselen, 2000).

Avec les coefficients de régression (linéaire ou quadratique), il devient possible d'estimer le niveau moyen de la mer dans les années à venir de manière simple, les méthodes étant faciles à mettre en place et à appliquer (Taylor, 2000 ; Van Onselen, 2000). Une limite néanmoins : la régression linéaire simple est sensible aux valeurs aberrantes dans les données ce qui n'est pas le cas pour la méthode des moindres carrés pondéré en fonction des résidus (Van Onselen, 2000).

8.1.1.2. Tendances du niveau de la mer.

Dans son dernier rapport paru en 2007, l'IPCC estime que le niveau moyen de la mer a augmenté, entre 1961 et 2003, de $1,8 \pm 0,5$ mm/an. Pour la dernière décennie (1993-2003), la hausse, mesurée avec les altimètres donne près du double avec $3,1 \pm 0,5$ mm/an. Mais cette vitesse d'élévation obtenue avec les altimètres est loin d'être uniforme : dans certaines régions, la mer monte, dans d'autres, elle baisse (fig. 8.1).

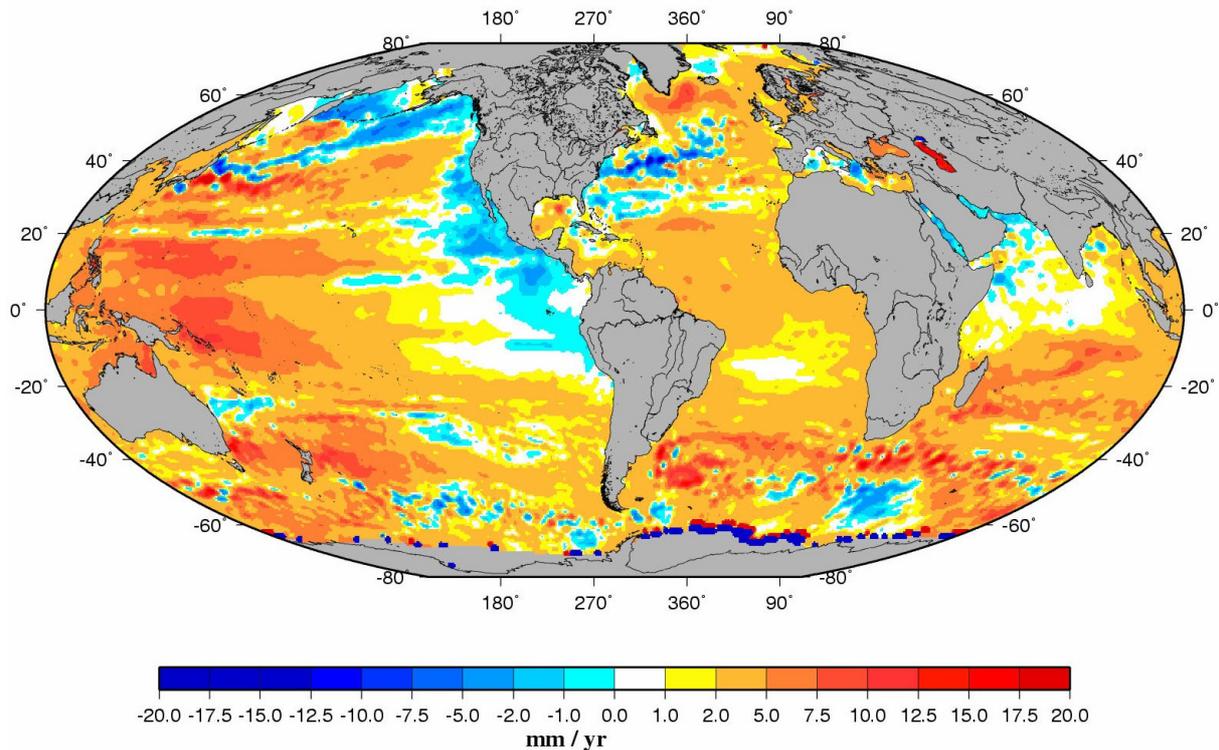


Fig. 8.1 – Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2007) d'après Topex/Poseidon et Jason-1. URL : http://www.legos.obs-mip.fr/fr/equipes/gohs/resultats/b1_nivmer1 (consulté le 5 octobre 2008).

Pour palier à cette non-uniformité, les tendances issues des marégraphes sont calculées en s'appuyant sur plusieurs sites. Même si un consensus existe de la part des chercheurs pour dire que le niveau moyen de la mer augmente, les tendances calculées diffèrent d'une étude à l'autre (tableau 8.2).

Période considérée	Type donnée	Nombre de sites	Tendance (mm/an)	Auteur(s)
1807-1940	M	69	1,1	Gutenberg (1941)
1885-1951	M	76	1,3	Cailleux (1952)
1807-1943	M	6	1,1	Lisitzin (1958)
1860-1960	M	?	1,2	Fairbridge et Krebs (1962)
1830-1930	M	?	1,1	Mörner (1973)
1850-1978	M	247	3,0	Emery (1980)
1807-1984	M	229	0,1-1 → 20,5% stations 1-1,5 → 17% stations 1,5-2,4 → 21% stations 0 → 1% des stations Diminution → 27,5% (Moyenne : 1mm/an)	Pirazzoli (1986) → Conclusion : impossible de tirer une tendance !!
1920-1970	M	40	2,4	Peltier et Tushingham (1989)
1880-1980	M	58 (Europe)	0,52	Pirazzoli (1989)
1880-1980	M	21	1,8	Douglas (1991)
1901-1988	M	33 (Royaume-Uni + mer du	1,0 ± 0,15	Shennan et Woodworth (1992)

Période considérée	Type donnée	Nombre de sites	Tendance (mm/an)	Auteur(s)
		Nord)		
1900-1997	M	27 (sup. à 70ans)	1,71 ± 0,5	Douglas (2001)
	M		1,84 ± 0,35	Peltier (2001)
1901-2000	M	4 (en Nouvelle-Zélande)	≈ 1,6 ± 0,2	Hannah (2004)
1950-2000	M	426 154 → 1950 240 → 1960 317 → 1986 196 → 2000	1,8 ± 0,3	Church <i>et al.</i> (2004)
1993-2000	A	Altimètres	2,6 ± 0,7	White <i>et al.</i> (2005)
1870-2001	M A	10 (1870) à 300 (1980)	1,70 ± 0,30 (1870-2001) 0,71 ± 0,40 (1870-1935) 1,84 ± 0,19 (1936-2001) 1,70 ± 0,30 (1901-2000)	Church et White (2006)
1846-2003	M	1023	2,4 ± 0,7 (1993-2000) 2,5 ± 1,0 (1920-1945) 1,8 (1900-2000)	Jevrejeva <i>et al.</i> (2006)
1900-2005	M	28	1,31 ± 0,3	Wöppelmann <i>et al.</i> (2007)
1904-2003	M	9	1,74 ± 0,16 2,03 ± 0,35 (1904-1953) 1,45 ± 0,34 (1954-2003)	Holgate (2007)
1993-2006	A	Altimètres	3,3 ± 0,4	Rahmstorf <i>et al.</i> (2007)

Tab. 8.2 – Estimation de la hausse du niveau de la mer à partir des données marégraphiques (M), altimétriques (A) et avec des deux couplées (M A).

Le nombre de sites marégraphiques utilisés, la distribution géographique, la période d'étude choisie, les corrections appliquées pour tenir compte des mouvements verticaux du socle sur lequel reposent les marégraphes influent sur les tendances obtenues. La correction des mouvements verticaux du sol peut être appréhendée par géodésie spatiale, plus particulièrement grâce à l'analyse des mesures GPS. Une station GPS, distante de 350m de l'observatoire marégraphique de Brest, est opérationnelle depuis le 1^{er} novembre 1998¹. Cette question ne sera pas traitée par la suite mais pour plus d'information consulter l'article de Wöppelmann *et al.* (2007).

Sur le tableau 8.2, les tendances varient de 0.52 mm/an en Europe entre 1880 et 1980 pour Pirazzoli (1989) à 4,2 mm/an entre 1920 et 1940 pour Jevrejeva *et al.* (2006). Pirazzoli (1986) est le premier à déclarer qu'il est inapproprié de calculer une tendance moyenne du niveau de la mer avec plusieurs dizaines d'enregistrements marégraphiques au vu des valeurs dispersées s'écartant de la distribution gaussienne.

Parmi les estimations les plus récentes, Church *et al.* (2004) combinent les observations marégraphiques avec les données altimétriques de TOPEX/Poseidon par la méthode dite de "reconstruction". Les informations obtenues grâce à la couverture quasi globale des océans

¹ URL : http://www.shom.fr/fr_act_geo/gps_2000.htm#2 (consulté le 5 octobre 2008).

par l'altimétrie spatiale sont couplées aux mesures temporelles enregistrées par les marégraphes. Church et White (2006) ont appliqué leur méthode de reconstruction afin d'étudier les variations du niveau de la mer depuis 1870 avec seulement cinq stations marégraphiques disponibles en 1860, leur nombre était trop faible pour reconstruire la série et étudier les tendances à partir de cette date.

L'analyse de Jevrejeva *et al.* (2006) est différente de Church et White (2006) car elle utilise 1023 stations différentes constituées de 385 324 moyennes mensuelles cumulées, dont 22 130 mois obtenus par interpolation (5,74% du total). Les moyennes sont corrigées des effets du rebond post-glaciaire (Peltier, 2001). Pour la période comprise entre 1993 et 2000, ils obtiennent une tendance de $2,4 \pm 1,0$ mm/an comparable à celle de White *et al.* (2005) calculée pour la même période, $2,6 \pm 0,7$ mm/an déterminée avec les mesures altimétriques TOPEX/Poseidon. La tendance est mise en parallèle avec celle calculée pour la période 1920-1945 (soit 70ans auparavant) laquelle est de $2,5 \pm 1,0$ mm/an. La hausse du niveau de la mer constatée ces dernières années a donc déjà été observée par le passé. Elle est même, d'après Holgate, supérieure entre 1904 et 1953 ($2,03 \pm 0,35$ mm/an) qu'entre 1954 et 2003 ($1,45 \pm 0,34$ m/an).

Avec seulement quelques années d'observations, les tendances calculées à partir des données altimétriques varient sensiblement, tout comme les tendances déterminées avec les mesures marégraphiques. Ici White *et al.* (2005) trouve une tendance égale à $2,6 \pm 0,7$ mm/an [1993-2000] contre $3,3 \pm 0,4$ mm/an [1993-2006] pour Rahmstorf *et al.* (2007). Aux erreurs près, les tendances sont cohérentes entre-elles.

8.1.1.3. Accélération du niveau de la mer.

Les dernières analyses des données d'observation du niveau de la mer indiquent d'après Church et White (2006), une évolution à deux "vitesses" des tendances annuelles. Par exemple, la moyenne du NMM entre 1870-1935 est de $0,71 \pm 0,40$ contre $1,84 \pm 0,19$ mm/an entre 1936-2001. Jevrejeva *et al.* (2006) présentent également des épisodes d'augmentation à deux "vitesses" : $2,5 \pm 1,0$ mm/an (1920-1945) et $2,4 \pm 0,7$ mm/an (1993-2000).

Le calcul de la détermination de l'accélération semble plus délicat à mettre en évidence d'après les experts de de l'IPCC. En effet, les rapports de 2007, 2001 et 1995 donnent respectivement une accélération égale à 0,013 0,014 et 0,22 mm/an². Le tableau 8.3 fait le bilan des dernières valeurs d'accélération calculées.

Période considérée	Nom ou Nombre de sites	Accélération (mm/an ²)	Auteur(s)
1807-1985	Brest	0,0044 ± 0,0011	Woodworth (1990)
1834-1984	Sheerness	0,0094 ± 0,0019	
1700-1925	Amsterdam	0,0042 ± 0,0005	
1774-1984	Stockholm	0,0043 ± 0,0014	
1905-1985	?	-0.011 ± 0.012	Douglas (1992)
1850-1991	37	0.001 ± 0.008	
1846-1992	Key West (Floride)	0,004	Maul et Martin (1993)
1768-1998	Liverpool	0,0033 ± 0,0010	Woodworth (1999b)
1807-2004	Brest	0,0071 ± 0,0008	Wöppelmann <i>et al.</i> (2006b)
1870-2001	10 (1870) à 300 (1980)	0,013 ± 0,006	Church et White (2006)
1700-2007	1023	0,01	Jevrejeva <i>et al.</i> (2008)

Tab. 8.3 – Estimation de l'accélération du niveau de la mer à partir de différentes études.

Les études menées jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle indiquent une accélération du niveau de la mer dix fois inférieure à celles auxquelles concluent les études menées au début du 21^{ème} siècle. Cette différence est davantage liée aux périodes de temps utilisées qu'au nombre ou à la localisation des stations de mesures. En effet, les dernières analyses utilisent les données acquises durant les années 1990 et 2000.

8.1.1.4. Anomalies dans le NMa et NMm disponibles au PSMSL.

Les études des tendances et des accélérations s'appuient en règle générale sur les moyennes mensuelles et les moyennes annuelles du niveau de la mer (cf. 1.4.3.) stockées au PSMSL, la banque mondiale des données à long terme du niveau de la mer (cf. 5.4.1.1.) (Woodworth et Player, 2003).

Les moyennes mensuelles et annuelles du niveau de la mer observées à Brest sont accessibles sur cette base de données¹ sous le code 190/091 (pays/station). C'est d'ailleurs pour cette série que les moyennes les plus anciennes sont disponibles à partir de 1807 (GPC, 1985). Elle se poursuit à partir de 1846 avec une seule lacune entre 1944 et 1952. La comparaison des moyennes disponibles sur le PSMSL avec les moyennes calculées à partir des observations horaires a mis en lumière des différences importantes.

Avec la création du PSMSL en 1933, les ingénieurs hydrographes calculèrent les moyennes mensuelles et annuelles qu'ils avaient à leur disposition pour alimenter la jeune banque de données. Ils en profitèrent pour exploiter celles publiées un siècle plus tôt (Savary *et al.*, 1843) en calculant également les moyennes des hauteurs d'eau. Les cahiers de ces calculs ont été retrouvés nous permettant d'expliquer les anomalies décelées que nous

¹ URL : http://www.pol.ac.uk/psmsl/psmsl_individual_stations.html (consulté le 5 octobre 2008).

obtenions. Pour certaines années :1937, 1939-1943, notamment, les NMa transmis par le Service Hydrographique sont corrigés de la pression barométrique contrairement aux autres NM. Des incohérences de même nature existent aussi pour les NMm. L'annexe D détaille l'ensemble des erreurs dans la transmission des NMm et NMa de Brest au PSMSL.

Le PSMSL a été mis au courant en 2006 de l'ensemble des erreurs de transmission. Seule avertissement pour les observations couvrant la période 1807 à 1835 a été ajoutée dans les pages du PSMSL à ce jour¹.

8.1.2. Validité des moyennes du niveau de la mer utilisées pour le calcul des tendances et de l'accélération.

Les moyennes mensuelles et annuelles du niveau de la mer peuvent être de plusieurs sortes comme l'explique la section 1.4.3 : NMM, NMj, NMm, NMa, MTR, MTL, MHW, MLW. De nouvelles moyennes ont été pensées afin de limiter au minimum les contraintes imposées par les données disponibles.

Avec un recouvrement temporel de 300 années et différents modes opératoires dans l'acquisition et l'enregistrement des observations, les moyennes annuelles du niveau de la mer à Brest souffrent de plusieurs défauts : inégalités des observations diurnes et nocturnes, inégalités du nombre des PM par rapport au nombre des BM, erreurs de lecture plus importantes pour les BM. Tous ces éléments obligent à proposer de nouvelles approches afin d'utiliser au mieux les données qui sont à notre disposition.

Pour valider les mêmes indicateurs, chaque tendance et accélération obtenues avec de nouvelles moyennes seront comparées avec celles obtenues avec le MSL, notre jeu de référence.

8.1.2.1. La référence : tendances et accélération calculées avec les MSL.

Le NMa (MSL) est directement calculé avec les moyennes annuelles des hauteurs horaires (cf. 1.4.3.1). Classiquement, c'est avec les MSL que les tendances et accélérations sont calculées. C'est ainsi que, le MSL va nous servir de série de référence pour comparer tous les autres jeux de moyennes annuelles étudiées sur la période de disponibilité des données : 1846 à 2007. Avec seulement quelques mois d'observations (cf. 6.2.1.1), les années 1816, 1817 et 1818 ne seront pas exploitées par la suite.

Entre 1846 et 2007 (or 1857-1859, 1938 et 1944-1952 où le nombre d'observations est soit insuffisant, soit inexistant), la tendance du niveau de la mer calculée à partir des MSL (fig. 8.1.a, croix noires) est égale à $1,16 \pm 0,06$ mm/an (fig. 8.1.a, courbe rouge). Quant à l'accélération, elle est égale à $0,0050 \pm 0,0015$ mm/an² (fig. 8.1.a, courbe bleu). La tendance

¹ URL : <http://www.pol.ac.uk/psmsl/pubi/docu.psmsl/190091.docu> (consulté le 5 octobre 2008).

et l'accélération calculées pour Brest sont cohérentes avec les chiffres trouvés dans la littérature (tableaux 8.2 et 8.3). Les RMS des résidus entre les observations et les hauteurs calculées avec la tendance (fig. 8.1.b, courbe rouge) et l'accélération (fig. 8.1.b, courbe bleue) sont respectivement égales à 0,036m et 0,035 m.

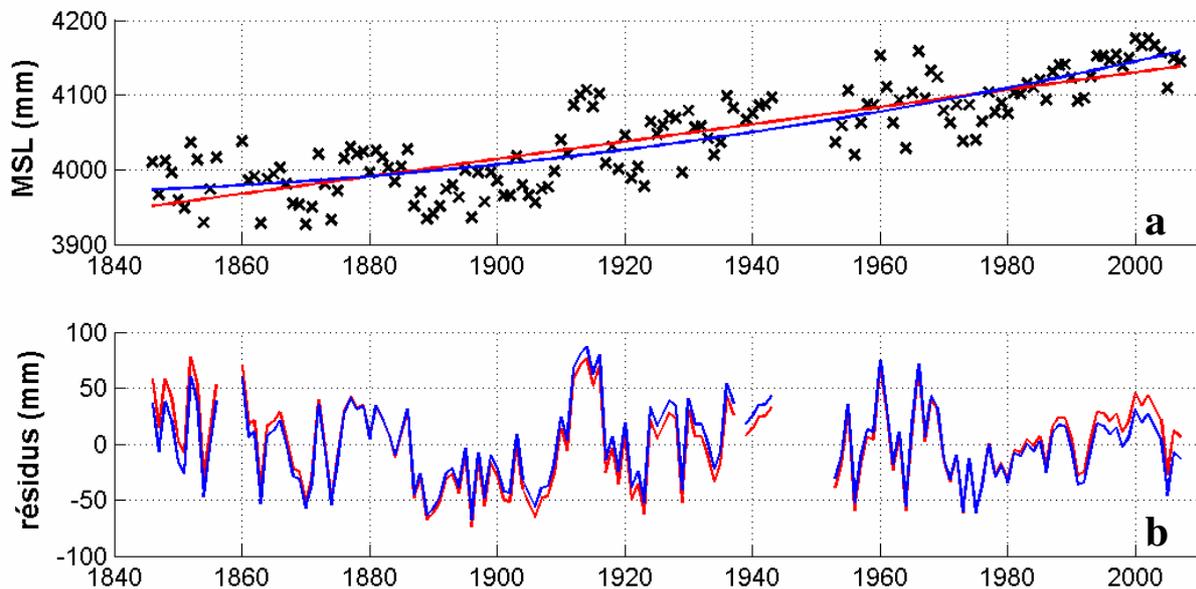


Fig. 8.1 – Les MSL à Brest entre 1846 et 2007. a : MSL observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).

Comparons maintenant ces tendances et accélération du niveau de la mer avec celles obtenues des MTL, MHW et MLW.

8.1.2.2. MTL calculés avec les observations de PM et de BM.

Les hauteurs des PM et des BM permettent de calculer le MTL, c'est-à-dire le niveau moyen de mi-marée (cf. 1.4.3.2). Pourquoi s'intéresser au MTL ? Les observations antérieures à 1846 sont des PM et des BM ; il est donc nécessaire de vérifier que les tendances et hauteurs calculées avec les MSL et les MTL sont identiques.

Malheureusement, les observations effectuées en 1711-1716 et en 1807-1835 souffrent de deux défauts : 1) Les mesures de PM et de BM faites de nuit sont minoritaires par rapport à celles faites de jour (cf. 3.2.2.2). De plus, ces observations nocturnes sont presque toujours réalisées lors des vives eaux. 2) Le nombre de données n'est pas identique entre les PM et les BM diurnes et entre les PM et les BM nocturnes. (fig. 8.2) :

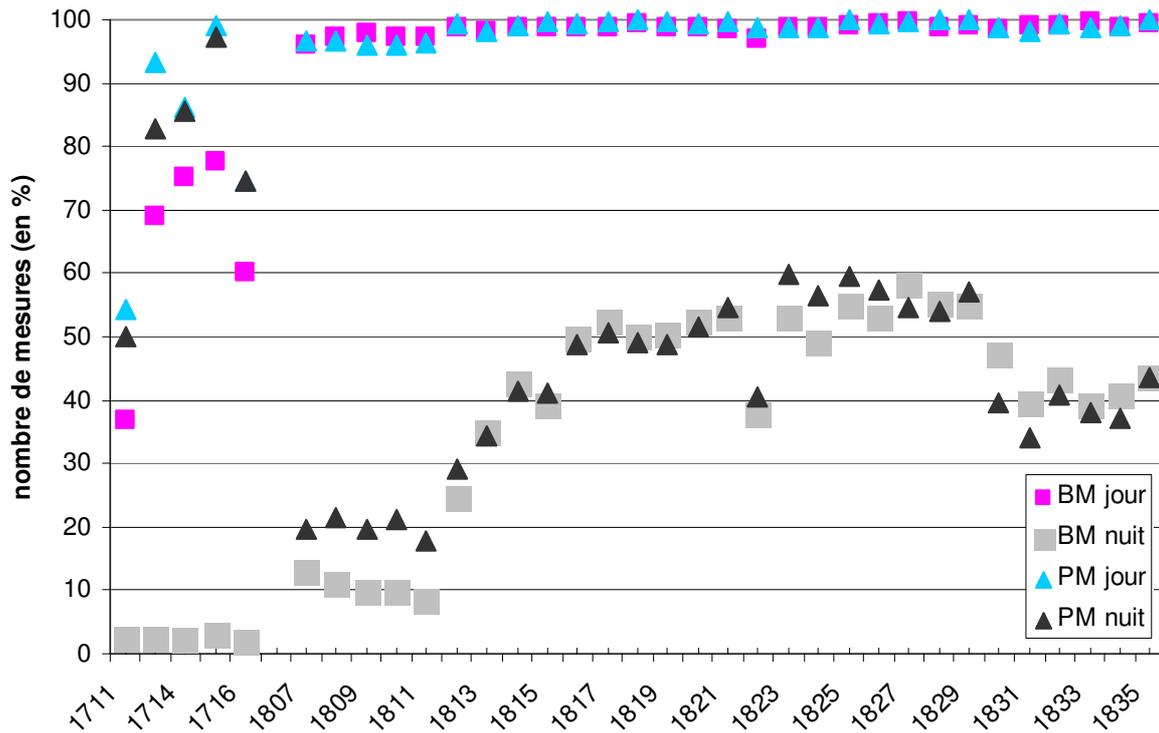


Fig. 8.2 – Pourcentage d’observations de PM diurnes, PM nocturnes, BM diurnes et BM nocturnes.

Les deux défauts sont en contradiction avec les recommandations de la COI (1985) qui préconise l’utilisation du même nombre de PM et de BM pour calculer les moyennes annuelles. Pour s’affranchir du premier défaut, deux solutions sont proposées : a) lorsque deux PM et une BM (ou une PM et deux BM) sont disponibles pour une même journée, la moyenne des 2 PM (ou 2 BM) est calculée d’abord afin d’utiliser in fine le même nombre de PM et BM. b) seule la PM diurne associée à la BM diurne est utilisée pour le calcul du MTL. La solution (b) répond également au second défaut.

Afin de vérifier si les solutions (a) et (b) n’affectent pas les tendances et accélération du niveau de la mer nous avons comparé les résultats obtenus avec les MSL :

- aux MTL utilisant les moyennes journalières des PM et les moyennes journalières des BM ($MTL_{m. jour.}$) (Solution (a)) ;
- aux MTL calculés uniquement avec les couples de PM et BM diurnes ($MTL_{diurnes}$) (Solution (b)).

De plus, pour affiner cette comparaison, seules les moyennes annuelles communes aux MSL et MTL seront exploitées ici. Les temps et hauteurs des PM et des BM sont déterminés grâce à l’interpolation par spline cubique des observations horaires (cf. 7.2.2). Les figures 8.3 et 8.4 présentent respectivement les $MTL_{m. jour.}$ et $MTL_{diurnes}$ avec les courbes de tendances et accélérations calculées (fig. 8.3.a et 8.4.a) et les résidus entre les moyennes observées et celles déduites des courbes (fig. 8.3.b et 8.4.b).

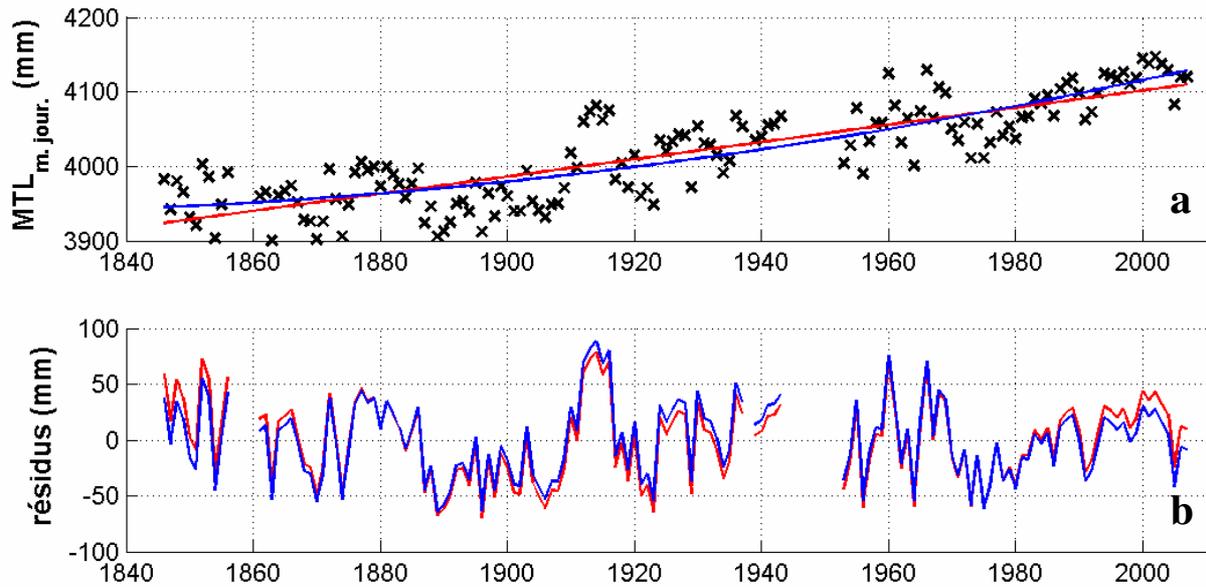


Fig. 8.3 – Les $MTL_{m.jour}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MTL_{m.jour}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).

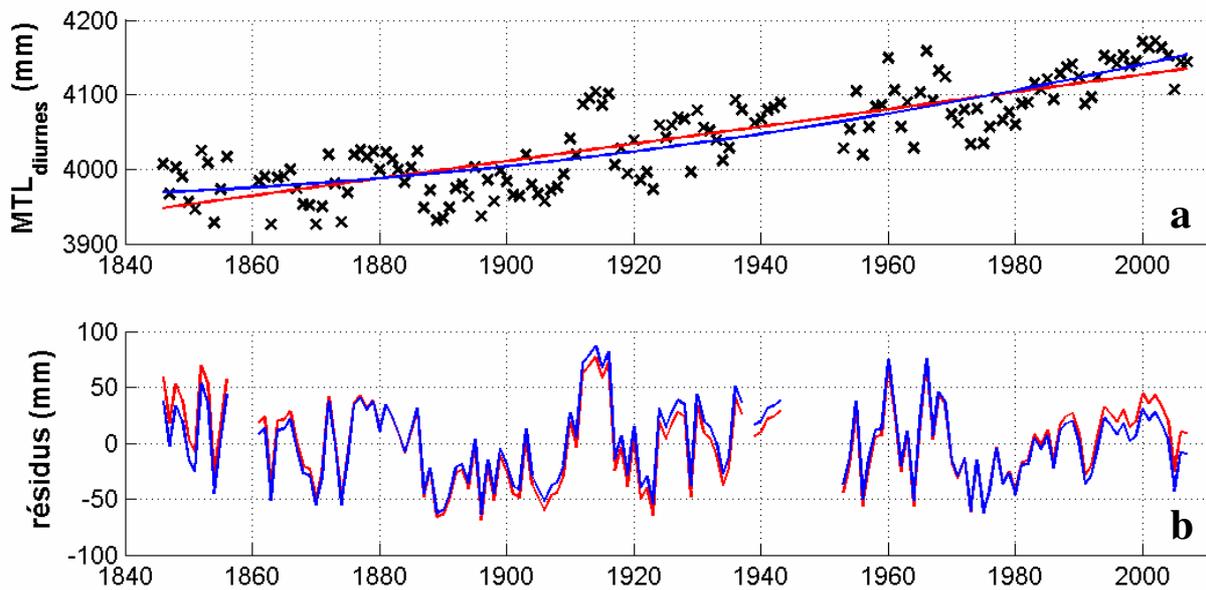


Fig. 8.4 – Les $MTL_{diurnes}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MTL_{diurnes}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).

Les tendances et accélérations obtenues pour les $MTL_{m.jour}$ et les $MTL_{diurnes}$ sont consignées dans le tableau 8.4. Les RMS des résidus entre les moyennes observées et les hauteurs calculées avec les régressions linéaires (fig. 8.3.b et 8.4.b : courbes rouges) et quadratiques (fig. 8.3.b et 8.4.b, courbes bleues) sont égales à 0,035 m respectivement. Ces RMS sont identiques à ceux obtenus avec les MSL (cf. 8.1.2.1).

Moyenne utilisée	Tendance (mm/an)	Accélération (mm/an ²)	Ecart moyen quadratique des résidus σ (m)
MSL	1,18 ± 0,06	0,0047 ± 0,0014	/
MTL _{m. jour.}	1,16 ± 0,06	0,0047 ± 0,0014	0,003
MTL _{diurnes}	1,16 ± 0,06	0,0047 ± 0,0015	0,003

Tab. 8.4. – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et MTL à Brest (1846-2007). L'écart moyen quadratique des résidus est calculé à partir des différences des niveaux moyens annuelles entre les MTL et les MSL observées.

D'après le tableau précédent, les tendances et accélérations calculées avec les MSL, les MTL_{m. jour.} et les MTL_{diurnes} sont identiques. Les valeurs des écarts-types les accompagnants le sont également. Les années d'observations incomplètes des PM et BM peuvent donc être exploitées en utilisant le type de moyenne qui vient d'être exposé en faisant attention à suivre l'une des deux procédures proposées pour tenir compte du déséquilibre dans le nombre de valeurs de PM et de BM.

8.1.2.3. Contrôle des tendances et accélération calculées avec les MHW.

Pour calculer le MTL, il faut disposer des hauteurs de PM et de BM. Or, à la fin du 18^{ème} siècle, nous disposons de 35 années d'observations de PM sans BM. Afin d'exploiter cet important lot de mesures pour l'étude des tendances et accélérations séculaires, examinons, de la même manière qu'au paragraphe précédent, si les tendances et accélérations obtenues avec les MHW sont identiques à celles trouvées avec le MSL pour la période 1846-2007.

Traditionnellement, les MHW sont déterminés en moyennant l'ensemble des hauteurs de PM disponibles pour une année (cf. 1.4.3.4). Comme nos jeux de hauteurs de PM sont incomplets (fig. 8.2), deux nouveaux MHW ont été pensés :

- les MHW_{m. jour.} (niveau moyen des PM calculé avec des moyennes journalières des PM). Cette grandeur moyenne permet de s'affranchir d'un défaut majeur sur le nombre d'observations. Pour la période 1757-1792 nous avons 2 PM par jour ce qui est la normale à Brest. En revanche, les séries de 1711-1716 et 1807-1835 souffrent d'un sous-échantillonnage : en règle générale, seuls les observations faites de nuit lors des vives-eaux sont notées. C'est de cette manière que nous avons calculé les MHW dans l'article d'*Ocean Dynamics* ! Utiliser les moyennes journalières des PM pour MHW_{m. jour.} permet de limiter les effets d'une moyenne surestimée artificiellement à cause du nombre de hauteurs de PM en vives eaux supérieurs au nombre de hauteurs de PM en mortes eaux.
- les MHW_{diurnes} (niveau moyen des PM calculé uniquement avec des hauteurs de PM lue entre 06h00 et 18h00). Cette grandeur moyenne n'est pas affectée par le mauvais échantillonnage nocturne des PM. L'autre avantage de cette grandeur moyenne par rapport à la précédente est qu'elle écarte des calculs, les observations nocturnes, plus difficiles à réaliser avec une luminosité quasi-nulle.

Pour la raison exprimée auparavant, les $MHW_{m. jour.}$ ne seront présentées ici qu'à titre informatif. Par la suite, nous appuierons notre étude avec uniquement les $MHW_{diurnes}$. De la même manière que précédemment (cf. 8.1.2.2), les tendances et accélérations déterminées avec les deux types de MHW (fig. 8.5.a et 8.6.a) sont vérifiées (fig. 8.5.b et 8.6.b) et comparées avec celles obtenues pour le MSL (tab. 8.5). Sur les figures 8.5.a et 8.6.a, on remarque que les moyennes annuelles des PM sont affectées par le cycle nodal (cf. 1.4.3.4).

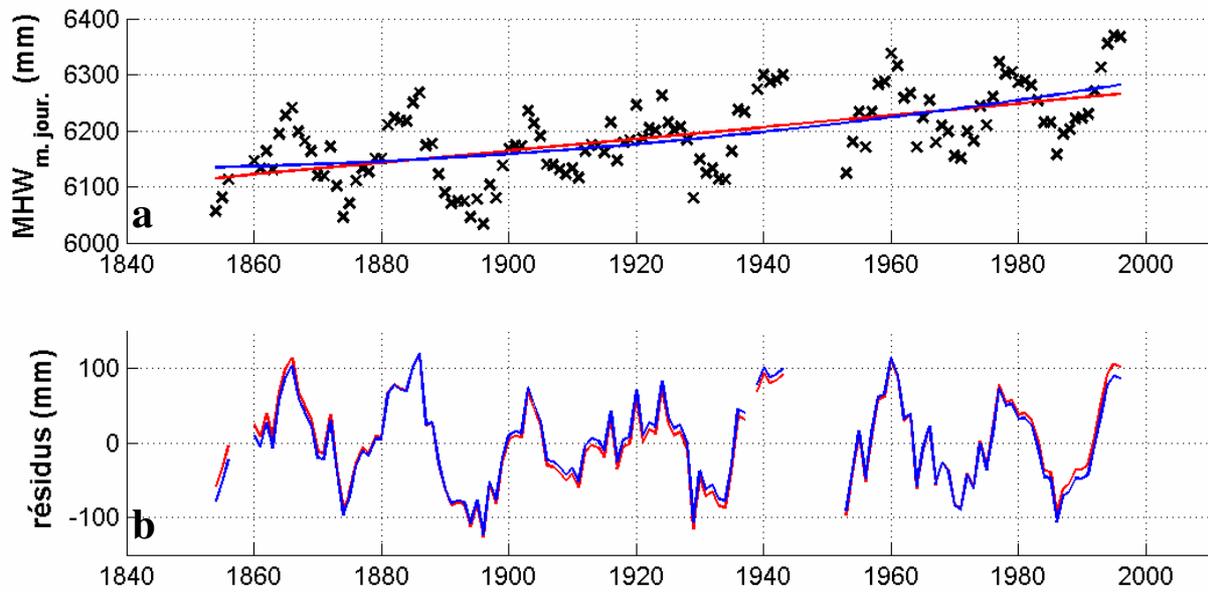


Fig. 8.5 – Les $MHW_{m. jour.}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MHW_{m. jour.}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).

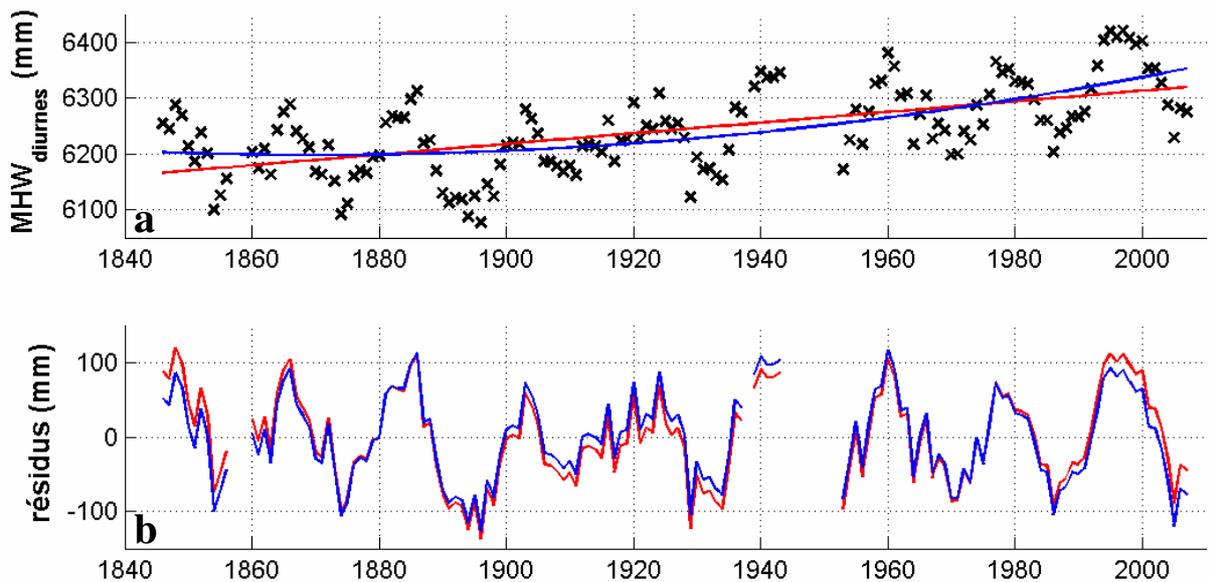


Fig. 8.6 – Les $MHW_{diurnes}$, à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MHW_{diurnes}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).

Moyenne utilisée	Tendance (mm/an)	Accélération (mm/an ²)	Ecart moyen quadratique des résidus (m)
MSL	1,18 ± 0,06	0,0047 ± 0,0014	/
MHW _{m. jour.}	0,99 ± 0,11	0,0073 ± 0,0025	0,053
MHW _{diurnes}	1,00 ± 0,11	0,0074 ± 0,0026	0,054

Tab. 8.5. – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et MHW à Brest (1846-2007). L'écart moyen quadratique des résidus est calculé à partir des différences des niveaux moyens annuelles entre les MHW et le MSL.

Les tendances et accélérations des MHW sont inférieures (respectivement de 1/6^{ème} et de 2/5^{ème}) à celles calculées avec le MSL bien qu'elles soient conformes, à l'intérieur des limites des barres d'erreurs. Les écarts-types pour les MHW sont 2 fois plus importants que pour le MSL. La cause est simple : les MHW sont affectées par les variations cycliques de 18,61 ans (cf. 1.4.3.4) présentant une amplitude comprise entre 15 et 20cm (fig. 8.6.a). Les RMS des résidus entre les moyennes observées et les hauteurs calculées avec les régressions linéaires et quadratiques sont égales à 0,053 m et 0,054 m respectivement, soit des RMS presque deux fois supérieurs à ceux obtenus avec les MSL (cf. 8.1.2.1). Les études portant sur les tendances séculaires peuvent se faire à l'aide des MHW_{m. jour.} et des MHW_{diurnes}. Woodworth (1999b) dans une étude similaire pour Liverpool compare les MSL et MHW depuis 1854. Il obtient 1,09 ± 0,13 mm/an et 0,0025 ± 0,0036 mm/an² avec les MHW ajustés et trouve 1,23 ± 0,12 mm/an et 0,0082 ± 0,0036 mm/an² avec les MSL. Les écarts des tendances entre les MSL et MHW sont similaires entre Brest et Liverpool : 18-19mm et 14mm. En revanche l'accélération diminue à Liverpool si l'on utilise les MHW au lieu des MSL alors qu'un comportement inverse est observé à Brest. Pour le 20^{ème} siècle, la tendance calculée avec les MHW_{diurnes} de Brest donne 1,14 ± 0,18 mm/an pour 1,22 ± 0,25 avec Liverpool. Durant le 19^{ème} siècle, les tendances respectives donnent 0,42 ± 0,18 et 0,39 ± 0,17 mm/an.

8.1.2.4. Contrôle des tendances et accélérations calculées avec les résidus des MHW_{diurnes}.

Afin d'éliminer l'effet des variations d'amplitudes périodiques de 18,61 ans dûe à la révolution du nœud lunaire (cf. 1.4.3.4), nous allons utiliser les résidus de marée, différence entre les observations et les prédictions. Pour chaque PM observée, sa hauteur associée prédite lui est soustraite (cf. 7.3.1).

Le graphique 8.7 et le tableau 8.6 présentent des résultats similaires aux précédents. Cette fois, les moyennes annuelles exploitées sont les résidus des MHW_{diurnes} c'est-à-dire MHW_{rés. diurnes}.

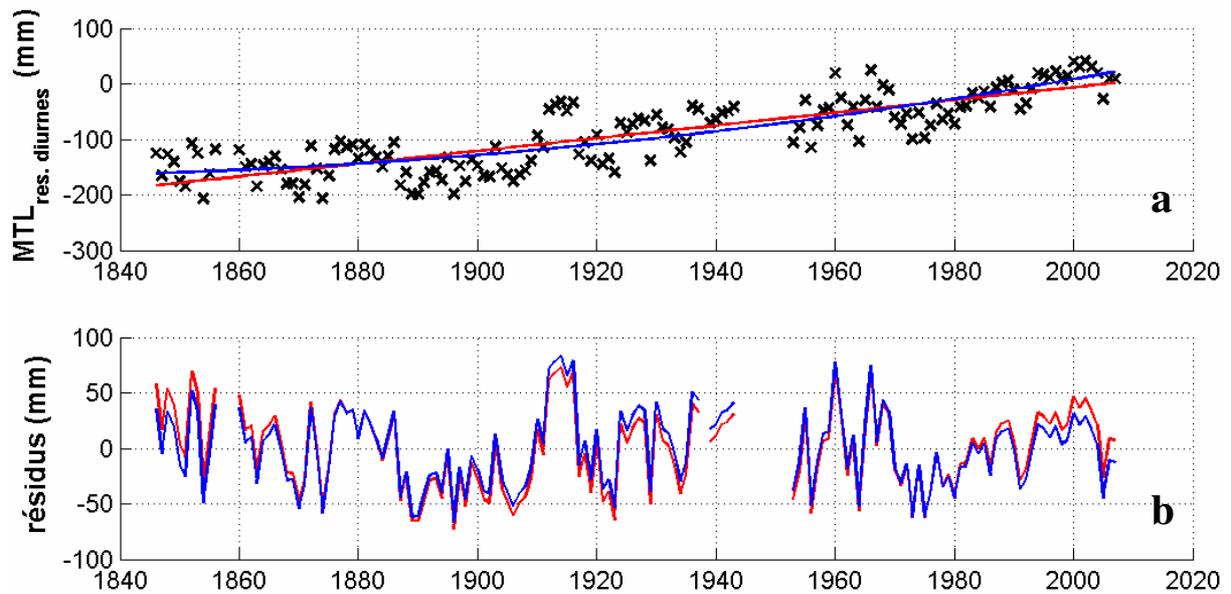


Fig. 8.7 – Les $MHW_{rés. diurnes}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MHW_{rés. diurnes}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).

Par rapport aux $MHW_{diurnes}$ et les $MHW_{m. jour.}$, la tendance calculée avec les $MHW_{rés. diurnes}$ est très légèrement supérieure aux deux autres (cf. 8.1.2.3). Quant à l'accélération, elle est ici très légèrement supérieure à celles obtenues auparavant, les erreurs associées à la valeur de l'accélération étant aussi réduites de moitié. Les écarts-types associés aux tendances et accélérations sont tant qu'à eux réduits de moitié devenant semblables à ceux déterminés avec le MSL. Les RMS des résidus entre les moyennes observées et les hauteurs calculées avec les régressions linéaires et quadratiques sont de 0,036m et 0,033m, respectivement. Ces RMS sont identiques à ceux obtenus avec les MSL (cf. 8.1.2.1) et deux fois inférieurs à ceux des MHW (cf. 8.1.2.3).

Moyenne utilisée	Tendance (mm/an)	Accélération (mm/an ²)	Ecart moyen quadratique des résidus (m)
MSL	1,18 ± 0,06	0,0047 ± 0,0014	/
$MHW_{rés. diurnes}$	1,03 ± 0,06	0,0078 ± 0,0014	0,013

Tab. 8.6 – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et les $MHW_{rés. diurnes}$ à Brest (1846-2007). L'écart moyen quadratique des résidus est calculé avec les différences des niveaux moyens annuelles entre le MHW et le MSL.

8.1.2.5. Contrôle des tendances et accélérations calculées avec les $MLW_{diurnes}$ et les $MLW_{rés. diurnes}$.

Même si les MHW représentent la plus grande densité des moyennes annuelles disponibles, le recouvrement temporel de ces dernières est identique à celui des MLW . Leur

exploitation est donc des plus pertinentes. La comparaison des MLW avec les MSL va être effectuée avec les MLW diurnes ($MLW_{diurnes}$) et les résidus des MLW ($MLW_{rés. diurnes}$) suivant les mêmes méthodes que celles utilisées dans les sections précédentes (respectivement fig. 8.8 et 8.9).

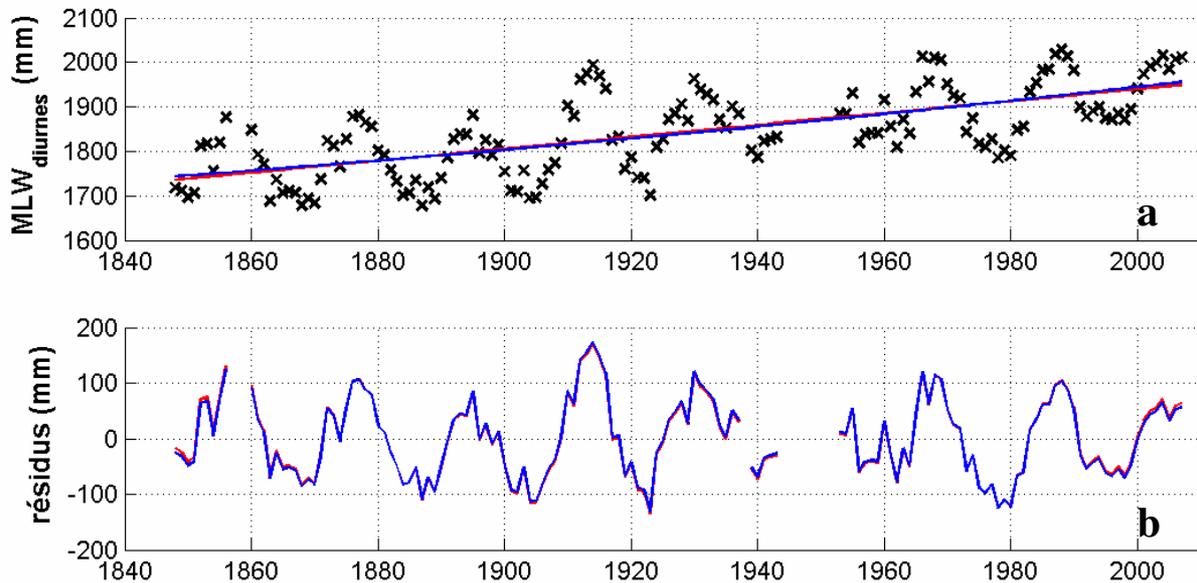


Fig. 8.8 – Les $MLW_{diurnes}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MLW_{diurnes}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).

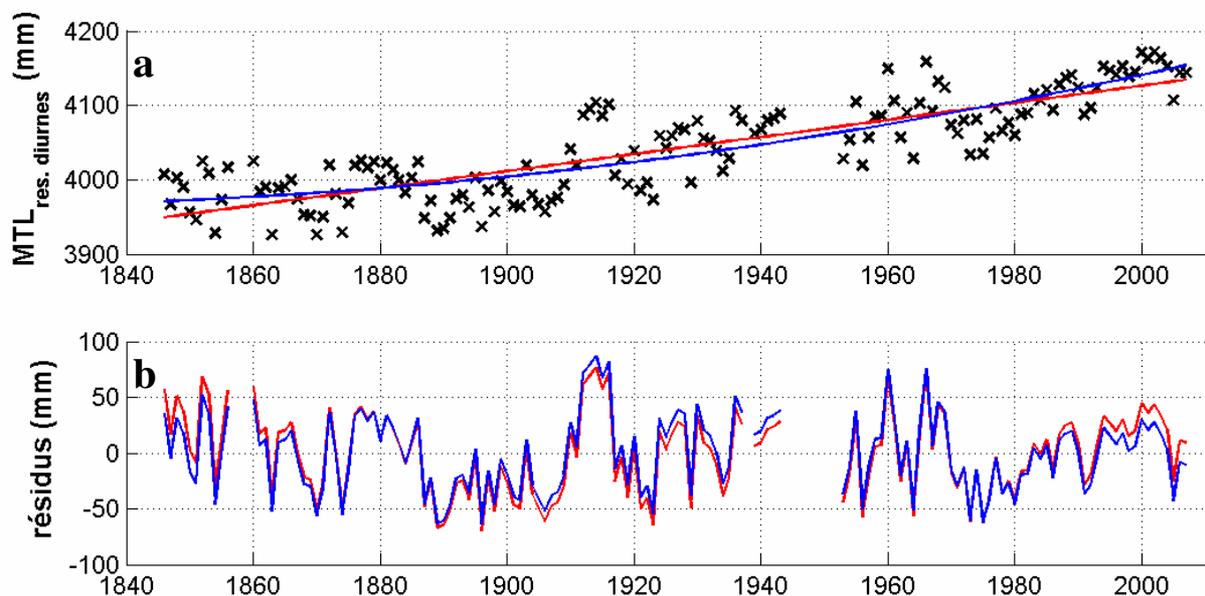


Fig. 8.9 – Les $MLW_{rés. diurnes}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $MLW_{rés. diurnes}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).

Les courbes des résidus entre les MLW et les valeurs déterminées grâce aux tendances et aux accélérations sont presque confondues (8.8.b et 8.9.b) ce qui montre qu'avec les MLW, l'accélération est à peine visible. Les valeurs de l'accélération obtenues avec les MLW confirment cette observation : $0,0018 \pm 0,0030 \text{ mm/an}^2$ ($\text{MLW}_{\text{diurnes}}$) et $0,0021 \pm 0,0016 \text{ mm/an}^2$ ($\text{MLW}_{\text{rés. diurnes}}$) (tab. 8.7). Néanmoins, aux erreurs près, les accélérations sont comparables à celles calculées avec les MSL. Les tendances déterminées, mêmes si elles sont semblables, toujours aux erreurs près, sont légèrement supérieures à celles établies avec le MSL.

Moyenne utilisée	Tendance (mm/an)	Accélération (mm/an ²)	Ecart moyen quadratique des résidus (m)
MSL	$1,18 \pm 0,06$	$0,0047 \pm 0,0014$	/
$\text{MLW}_{\text{diurnes}}$	$1,34 \pm 0,13$	$0,0018 \pm 0,0030$	0,056
$\text{MLW}_{\text{rés. diurnes}}$	$1,27 \pm 0,07$	$0,0021 \pm 0,0016$	0,037

Tab. 8.7. – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et les $\text{MLW}_{\text{diurnes}}$ et $\text{MLW}_{\text{rés. diurnes}}$ à Brest (1846-2007). L'écart moyen quadratique des résidus est calculé à partir des différences des niveaux moyens annuelles entre le MLW et le MSL.

8.1.2.6. Contrôle des tendances et accélérations calculées avec les $\text{MTL}_{\text{diurnes}}$ et des $\text{MTL}_{\text{rés. diurnes}}$.

Après avoir présenté ce qu'étaient les résidus diurnes (cf. 8.1.2.4) et avoir comparé les $\text{MHW}_{\text{rés. diurnes}}$ (cf. 8.1.2.4) et les $\text{MLW}_{\text{rés. diurnes}}$ (cf. 8.1.2.5) avec les MSL, vérifions que les tendances et accélérations calculées avec les $\text{MTL}_{\text{rés. diurnes}}$ et les MSL sont identiques (fig. 8.10 et tab. 8.8).

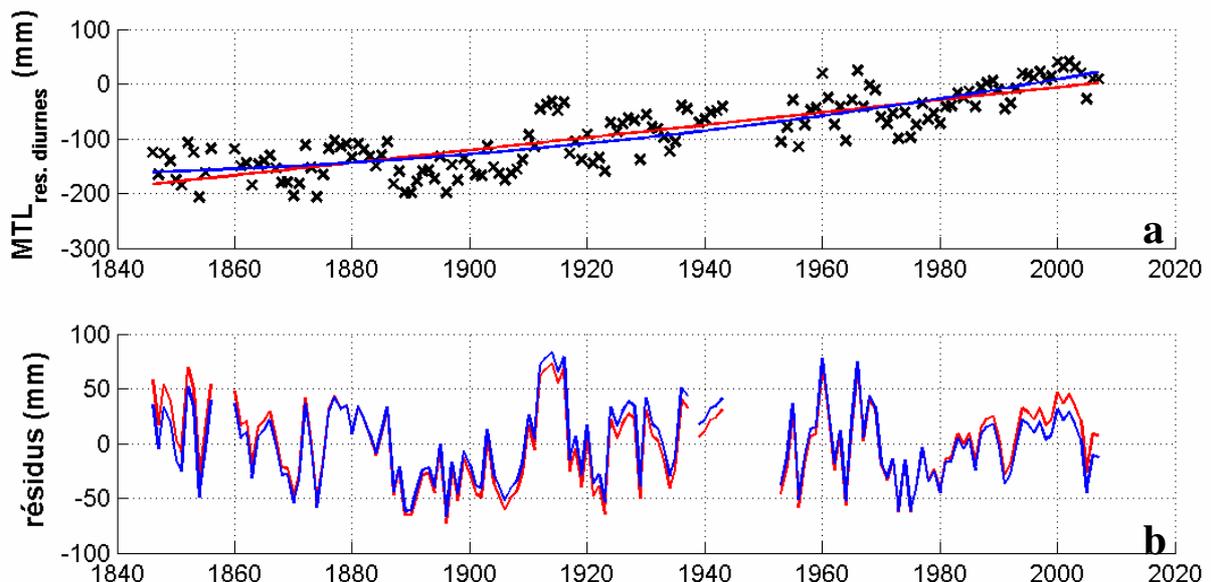


Fig. 8.10 – Les $\text{MTL}_{\text{rés. diurnes}}$ à Brest entre 1846 et 2007. a : les $\text{MTL}_{\text{rés. diurnes}}$ observées (régressions linéaire en rouge et quadratique en bleu) ; b : résidus ou écarts entre les moyennes observées et les courbes de régression (même convention de couleur).

Les tendances et accélérations calculées pour les $MTL_{rés. diurnes}$ sont identiques à celles obtenues avec les MSL (tab. 8.8). Les erreurs pour les variations sont minimales et l'écart-type des résidus entre les $MTL_{rés. diurnes}$ et les MSL est égal à 0,004m.

Moyenne utilisée	Tendance (mm/an)	Accélération (mm/an²)	Écart moyen quadratique des résidus σ (m)
MSL	1,18 ± 0,06	0,0047 ± 0,0014	/
$MTL_{rés. diurnes}$	1,15 ± 0,06	0,0050 ± 0,0014	0,004

Tab. 8.8. – Tendances et accélérations comparées entre les MSL et les $MTL_{rés. diurnes}$ à Brest (1846-2007). L'écart moyen quadratique des résidus est calculé à partir des différences des niveaux moyens annuelles entre le $MTL_{rés. diurnes}$ et le MSL.

8.1.2.7. Comparaison des tendances et accélérations calculées en pondérant les moyennes annuelles en fonction de la qualité de celles-ci.

La section 7.3.4 fait état de l'utilisation du RMS annuel des résidus en hauteurs comme possibilité d'estimer la qualité des observations d'une manière globale, année par année. Comme la détermination des tendances et accélérations s'appuie sur des moyennes annuelles, il devient tentant d'appliquer un poids à chacune d'entre elles en relation avec cet RMS. L'introduction d'une pondération permet de diminuer l'importance relative des moyennes calculées avec des observations moins fiables, au profit de celles déterminées avec des observations plus précises. Le poids utilisé par la suite est défini comme étant égal à l'inverse du RMS annuel calculé. Pour les MSL et les MTL, les RMS utilisés sont ceux présentés respectivement dans les sections 7.3.4.2 et 7.3.4.3. Les RMS respectifs utilisés pour pondérer les MHW et les MLW sont calculés de la même manière que les précédents (cf. 7.3.4.1) mais respectivement qu'avec des hauteurs de PM ou des hauteurs de BM.

Les tendances et accélérations sont calculées grâce aux moindres carrés pondérés (Ramsay et Silverman, 2005). Elles sont déterminées à partir des grandeurs moyennes rassemblées dans le tableau 8.9. Les tendances et accélérations calculées précédemment sans pondération sont également indiquées dans le tableau afin de faciliter la comparaison et avoir ainsi une idée plus précise de l'apport de ce nouveau facteur.

Grandeurs moyennes utilisées (indicateurs)	Tendance non pondérée (mm/an)	Tendance pondérée (mm.an)	Accélération non pondérée (mm/an ²)	Accélération pondérée (mm/an ²)
MSL	1,18 ± 0,06	1,18 ± 0,06	0,0047 ± 0,0014	0,0052 ± 0,0014
MHW _{diurnes}	1,00 ± 0,11	0,95 ± 0,10	0,0074 ± 0,0026	0,0081 ± 0,0024
MHW _{rés. diurnes}	1,03 ± 0,06	1,04 ± 0,06	0,0078 ± 0,0014	0,0079 ± 0,0014
MLW _{diurnes}	1,34 ± 0,13	1,36 ± 0,12	0,0018 ± 0,0030	0,0022 ± 0,0030
MLW _{rés. diurnes}	1,27 ± 0,07	1,28 ± 0,06	0,0021 ± 0,0016	0,0023 ± 0,0016
MTL _{diurnes}	1,16 ± 0,07	1,17 ± 0,06	0,0047 ± 0,0015	0,0049 ± 0,0014
MTL _{rés. diurnes}	1,16 ± 0,06	1,16 ± 0,06	0,0050 ± 0,0014	0,0049 ± 0,0014

Tab. 8.9. – Tendances et accélérations pondérées et non pondérées calculées avec les différentes moyennes de Brest (1846-2007).

La comparaison, pour chaque indicateur, des tendances et des accélérations, pondérées et non pondérées, sur la période test (1846-2007) montre qu'elle est statistiquement identique à un sigma près. Ainsi, l'utilisation des moindres carrés pondérés ne change pas significativement les résultats obtenus précédemment. En revanche, la méthode n'en demeure pas moins plus rigoureuse et plus robuste.

8.1.2.8. Bilan.

Les tendances publiées en 2006 dans l'article d'*Océan dynamics* indiquaient respectivement $1,11 \pm 0,07$ mm/an pour les MSL et $1,11 \pm 0,06$ mm/an pour les MTL. L'apport de trois nouvelles moyennes annuelles pour les années 1915, 2006 et 2007 fait augmenter la tendance le MSL à $1,18 \pm 0,06$ mm/an, statistiquement identique à un sigma près. Pour le MTL, l'augmentation, très légère de la tendance se trouve également à un sigma près de celle trouvée pour l'article. En revanche, il est plus difficile de comparer les tendances obtenues pour les nouveaux indicateurs avec celles publiées car les périodes temporelles utilisées sont différentes.

Les indicateurs conçus dans ce chapitre pour le traitement des observations séculaires de Brest sont originaux. Toutes les tendances et accélérations calculées à partir de celles-ci ont été comparées avec celles déterminées à partir des MSL, grandeur variable utilisée comme référence (cf. 1.4.3.1). L'ensemble des résultats obtenus, confrontés avec ceux déterminés avec les MSL montre aux erreurs près, les mêmes valeurs, les mêmes tendances et accélérations.

Par la suite, l'utilisation des indicateurs diurnes se révèle indispensable pour exploiter au mieux les données à notre disposition sans introduire d'artefacts affectant nos calculs. En effet, nous disposons de peu d'observations de nuit par rapport aux observations faites de jour (fig. 8.2). De plus, ces observations nocturnes n'avaient lieu que lors des vives-eaux. Enfin, en n'exploitant pas les observations de nuit, nous limitons ainsi les incertitudes de mesures liées aux difficultés de mesurer la hauteur d'eau sur une échelle de marée à la nuit à la lueur d'une faible lumière artificielle telle une lanterne par exemple.

Afin de s'affranchir du cycle nodal affectant les mesures de MHW et MLW, nous avons également testé les résidus des MHW et des MLW dont les comparaisons avec les tendances et les accélérations calculées avec les MSL sont cohérentes.

Enfin, l'utilisation de la méthode des moindres carrés pondérés permet d'avoir des résultats plus rigoureux et plus robustes sans vraiment les changer sur notre période test. Qu'en sera-t-il avec les spécificités des observations du 18^{ème} siècle ?

Les MSL, $MTL_{diurnes}$ et $MTL_{rés. diurnes}$ présentent les mêmes tendances, accélérations et écarts-types. Pourtant, ce n'est pas le cas entre le MSL et les MHW ($diurnes$ et $rés. diurnes$) ou entre le MSL et les MLW ($diurnes$ et $rés. diurnes$). Pour les MHW (respectivement les MLW), les tendances sont légèrement inférieures (resp. supérieures) à celle obtenue avec le MSL même si elles restent significativement identiques aux écarts-types près.

L'utilisation des $MHW_{diurnes}$, $MLW_{diurnes}$, $MTL_{diurnes}$, $MHW_{rés. diurnes}$, $MLW_{rés. diurnes}$ et $MTL_{rés. diurnes}$ pondérés et non pondérés semblent alors être le choix le plus judicieux pour étudier les variations séculaires du niveau de la mer à Brest.

8.1.3. Tendances et accélérations obtenues avec les hauteurs d'eau observées à Brest depuis 300 ans.

Les calculs des tendances et accélérations à Brest depuis le début du 18^{ème} siècle vont ainsi être appliqués avec ou sans pondération aux $MHW_{diurnes}$, $MLW_{diurnes}$, $MTL_{diurnes}$, $MHW_{rés. diurnes}$, $MLW_{rés. diurnes}$, $MTL_{rés. diurnes}$. (cf. 8.1.2.7).

Avant d'exploiter les jeux de données, le graphique 8.11 présente les hauteurs moyennes du niveau de la mer diurnes pour les MHW, MTL et MLW à Brest depuis 1711. Les $MHW_{diurnes}$ (a) et les $MLW_{diurnes}$ (c) sont affectés par le cycle nodal. Un minimum dans ce cycle pour les MHW correspond à un maximum pour les MLW. A l'inverse, un maximum pour les MHW se traduit par un minimum avec les MLW. Par contre, le cycle nodal n'est pas présent avec les MTL (b).

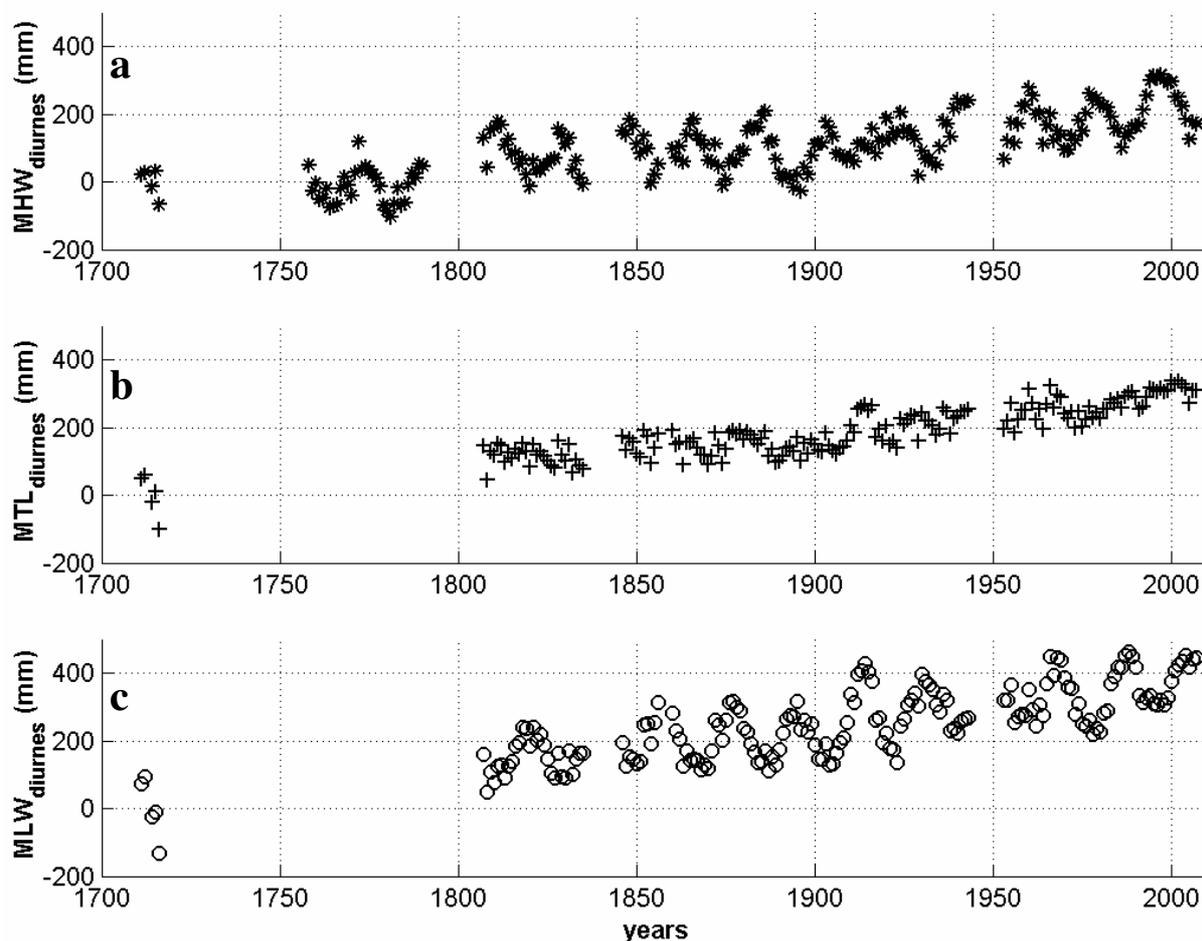


Fig. 8.11 – Moyennes annuelles des niveaux de la mer à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{diurnes}$) ; b) moyennes diurnes de la marée ($MTL_{diurnes}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{diurnes}$).

Même si l'on arrive à percevoir une hausse du niveau moyen avec les trois jeux de moyennes, il est difficile de percevoir à "l'œil nu", si une accélération existe, notamment avec les MHW ou avec les MLW affectés par les cycles nodaux.

L'utilisation des résidus annuels des moyennes de HW ($MHW_{res. diurnes}$) et de LW ($MLW_{res. diurnes}$) permet de s'affranchir des cycles nodaux sur les moyennes (figure 8.12).

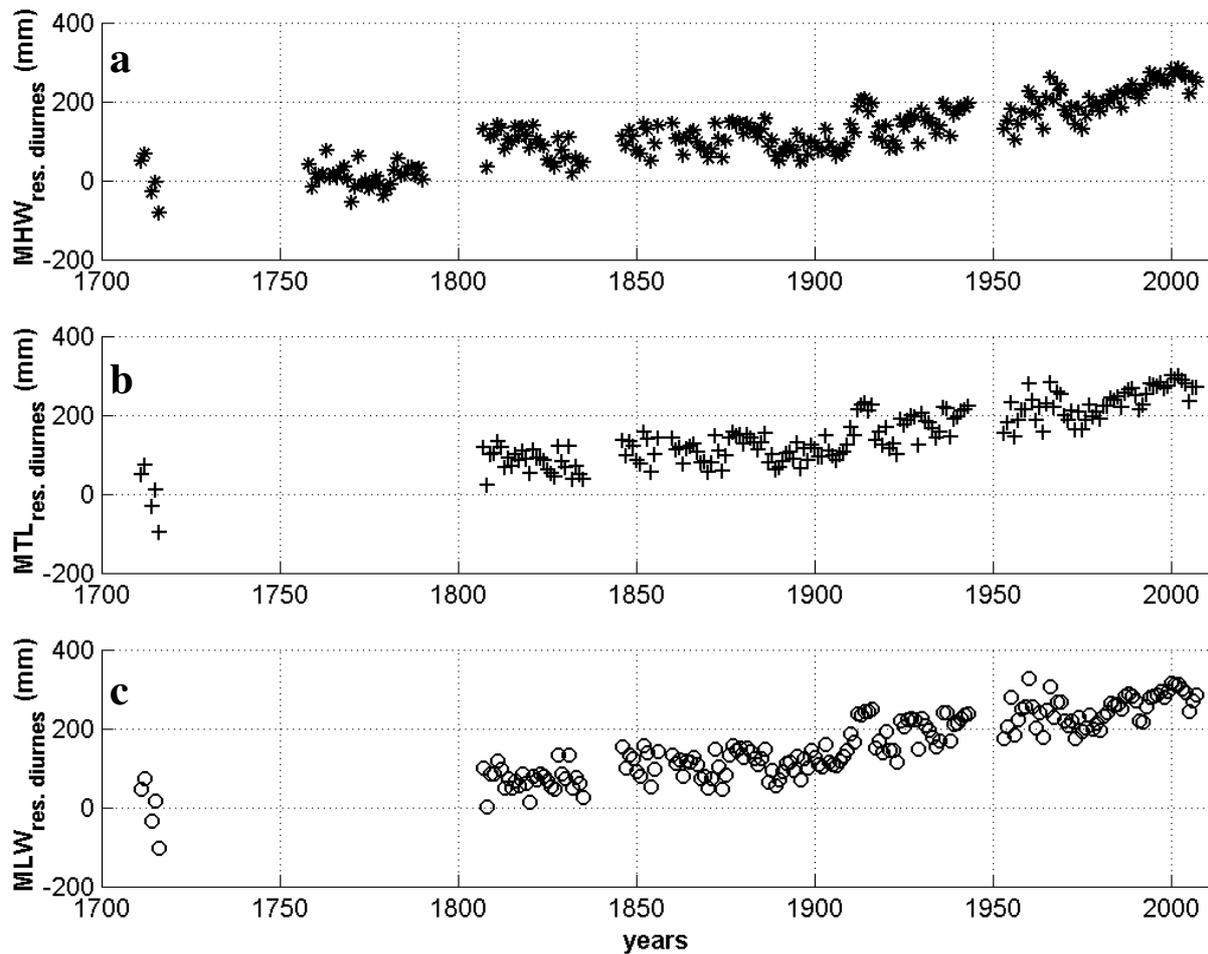


Fig. 8.12 – Moyennes annuelles des résidus à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{res. diurnes}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{res. diurnes}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{res. diurnes}$).

Sans les cycles nodaux affectant les MHW et MLW, l'appréciation de la hausse du niveau de la mer sur la figure 8.12 est nettement facilitée.

La référence verticale des graphiques contenus dans les figures 8.11 à 8.13 est ramenée aux hauteurs moyennées pour la période 1711-1716 afin d'estimer plus aisément la hausse du niveau de la mer.

8.1.3.1. Evolution régulière depuis le début du 18^{ème} siècle.

Comme les rapports de l'IPCC l'indiquent (2007, 2001 et 1995), la détermination d'une possible accélération du niveau de la mer semble délicate à mettre en évidence (cf. 8.1.1.3). Si tel est le cas, on peut considérer que la hausse du niveau de la mer est linéaire dans le temps.

Les tendances et accélérations ont été calculées avec l'ensemble des moyennes à notre disposition depuis 300 ans (tab. 8.10). Les courbes résultant des calculs ont été ajoutées aux figures 8.11, 8.12 (non pondérés) et figures 8.13, 8.14 (pondérés) afin de constater visuellement si elles se superposent au mieux avec les moyennes (8.13 et 8.14).

Moyenne utilisée	Tendance non pondérée (mm/an)	Tendance pondérée (mm/an)	Accélération non pondérée (mm/an ²)	Accélération pondérée (mm/an ²)
MHW _{diurnes}	0,86 ± 0,06	0,79 ± 0,06	0,0010 ± 0,0007	0,0014 ± 0,0007
MHW _{rés. diurnes}	0,86 ± 0,03	0,83 ± 0,04	0,0015 ± 0,0004	0,0019 ± 0,0005
MLW _{diurnes}	1,01 ± 0,04	1,17 ± 0,05	0,0013 ± 0,0005	0,0013 ± 0,0006
MLW _{rés. diurnes}	0,95 ± 0,04	0,82 ± 0,04	0,0021 ± 0,0005	0,0030 ± 0,0004
MTL _{diurnes}	1,28 ± 0,08	1,04 ± 0,04	0,0004 ± 0,0009	0,0017 ± 0,0005
MTL _{rés. diurnes}	1,08 ± 0,05	0,97 ± 0,04	0,0021 ± 0,0005	0,0020 ± 0,0005

Tab. 8.10 – Tendances et accélérations pondérées et non pondérées calculées avec les différentes moyennes de Brest depuis 1711.

Les résultats non pondérés donnent des estimations de la hausse du niveau de la mer variant de 0,86 avec les MHW, à 1,28mm/an pour les MLW_{diurnes}. Les moyennes sont cohérentes à trois sigmas près. Les tendances obtenues avec les MTL, 1,01 et 0,95mm, s'intercalent entre celles déterminées avec les MHW et les MLW. Les accélérations calculées diffèrent du simple au double, entre 0,0010 et 0,0021 mm/an². En revanche, les accélérations calculées à partir des résidus diurnes présentent les mêmes valeurs aux incertitudes près et celles déterminées avec les MTL_{rés. diurnes} et les MLW_{rés. diurnes} sont identiques. Pour ces derniers, le même nombre d'années de mesures est utilisé contrairement aux MHW_{rés. diurnes} pour lesquels sont ajoutées les moyennes annuelles de 1757 à 1792.

Les résultats pondérés estiment la hausse du niveau de la mer entre 0,83mm avec les MHW_{diurnes} jusqu'à 1,17mm pour les MLW_{diurnes}. Cette fois, même à trois sigmas près (intervalle de confiance égal à 99%), les tendances ne sont plus cohérentes entre elles. Araújo et Pugh (2008) font le même constat avec l'étude des tendances des plus basses BM annuelles (+2,2mm/an) comparées aux tendances des plus hautes PM (+1,3mm/an) à Newlyn entre 1915 et 2005. Tout comme les tendances non pondérées, celles (pondérées) obtenues avec les MTL (pondérées), 1,04 et 0,97mm, s'intercalent entre celles des MHW et des MLW. Les accélérations déterminées avec les moyennes varient aussi du simple au double : 0,0030 avec les MLW_{rés. diurnes} et 0,0013mm/an² pour les MLW_{rés. diurnes}.

Les tendances et accélérations pondérées pour chaque moyenne sont cohérentes avec celles obtenues sans pondération à l'incertitude près, sauf pour les tendances des MLW qui affectent aussi les MTL (entre 2 et 3 incertitudes).

Ainsi, même si les résultats des régressions linéaires et ajustements quadratiques donnent des résultats différents selon le type de moyenne utilisé, l'analyse des incertitudes montre que les différences ne sont pas statistiquement significatives.

Les courbes de tendance et d'accélération sont presque confondues pour les $MLW_{diurnes}$ (fig. 8.13.c) tout comme pour la période 1846-2007 (fig.8.8). Pour tous les autres graphiques, ces courbes sont distinctes, du moins durant le 18^{ème} siècle et depuis la fin du 20^{ème} siècle.

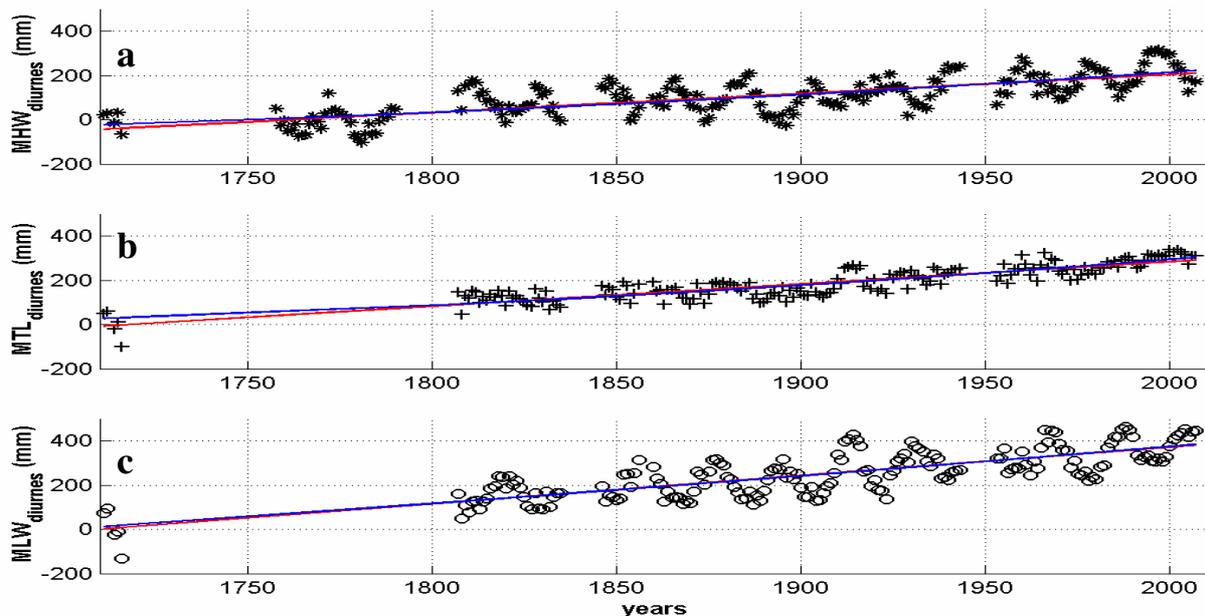


Fig. 8.13 – Moyennes annuelles des niveaux de la mer à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{diurnes}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{diurnes}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{diurnes}$). Tendances linéaires en rouge et régressions quadratiques en bleu.

Sur la figure 8.14, au contraire de la figure 8.13, les courbes de tendance et d'accélération se distinguent. Les valeurs de l'accélération, plus importantes (tab. 8.9) suivent les courbes qui s'éloignent d'une simple tendance linéaire. Pour les dernières années, l'évolution du niveau de la mer va en s'accéléralant, les courbes d'accéléralation se trouvant en dessus de celles des tendances.

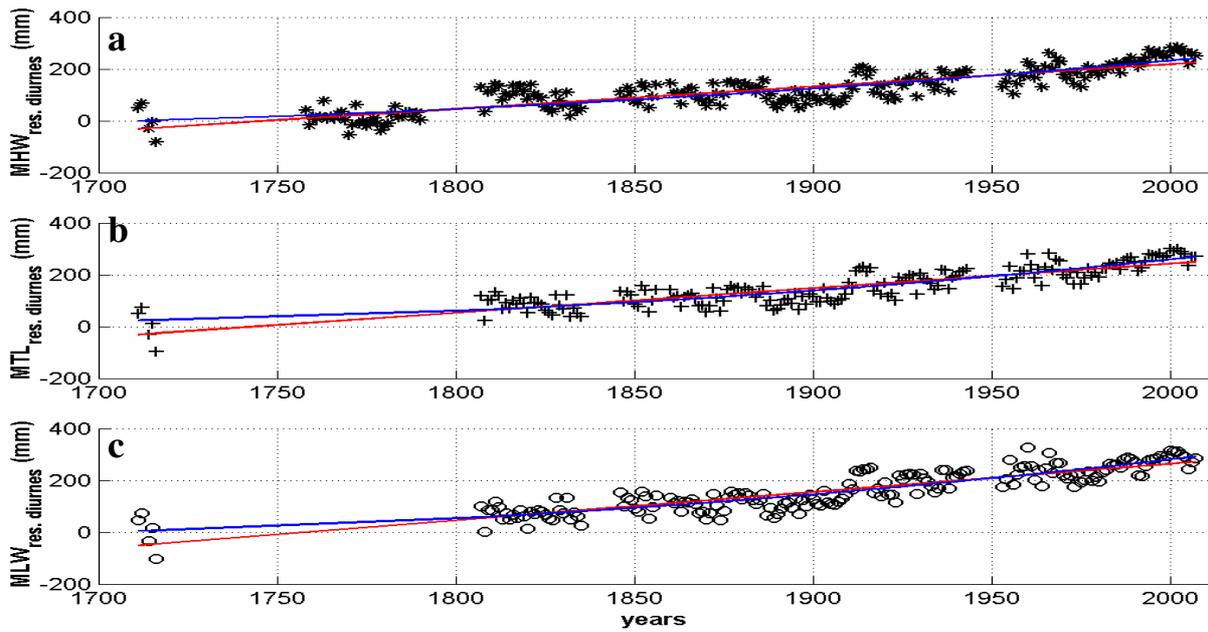


Fig. 8.14 – Moyennes annuelles des résidus à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{res. diurnes}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{res. diurnes}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{res. diurnes}$). Tendances linéaires en rouge et régression quadratique en bleu.

Les tendances et accélérations pondérées de la figure 8.15 se rapprochent par leurs ajustements à leurs équivalents non pondérés illustrés en figure 8.13.

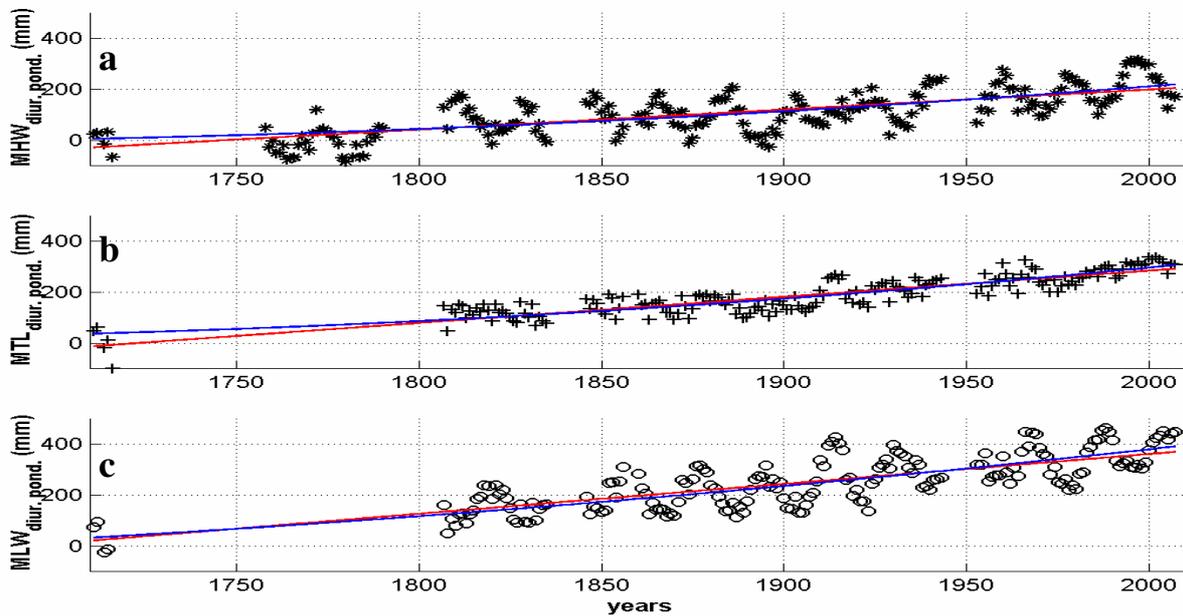


Fig. 8.15 – Moyennes annuelles des niveaux de la mer à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{diurnes pond.}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{diurnes pond.}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{diurnes pond.}$). Tendances linéaires en rouge et régressions quadratiques en bleu pondérées.

Les tendances linéaires et les régressions quadratiques visibles sur la figure 8.16 sont visuellement identiques à celles de la figure 8.14 sauf pour les MLW. Ici, la pondération introduite dans le calcul modifie la forme et donc l'estimation de la hausse et de l'accélération (tab.8.10).

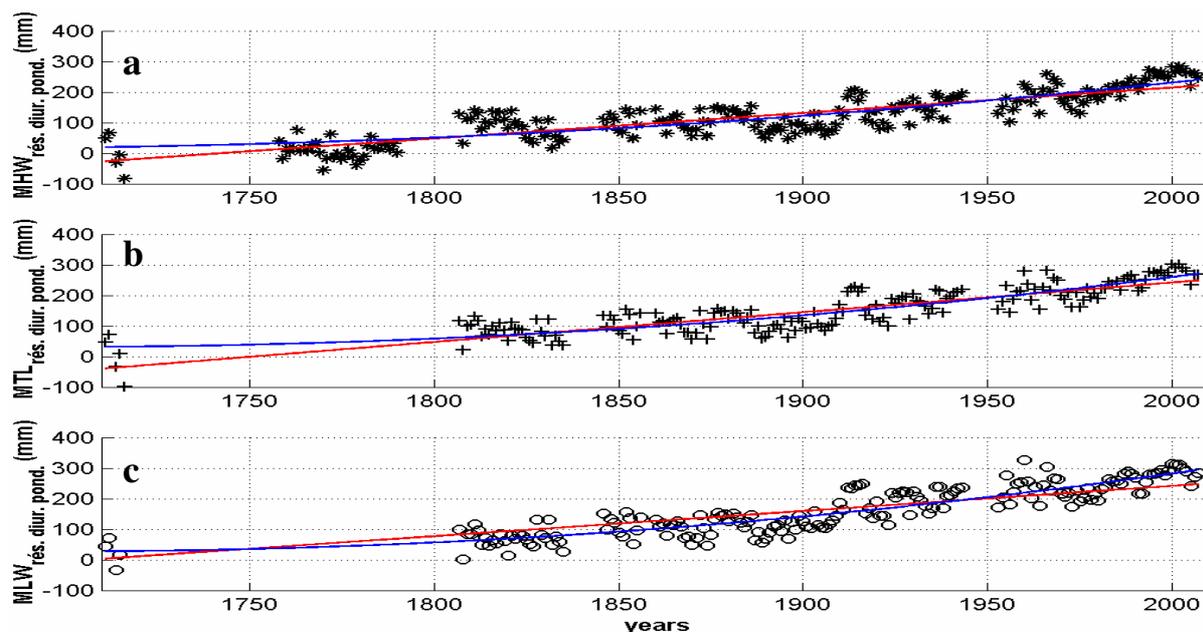


Fig. 8.16 – Moyennes annuelles des résidus à Brest depuis 1711 : a) pleines mer diurnes ($MHW_{res. diurnes pond.}$) ; b) niveaux moyens diurnes de la marée ($MTL_{res. diurnes pond.}$) ; c) basses mers diurnes ($MLW_{res. diurnes pond.}$). Tendances linéaires en rouge et régression quadratiques en bleu pondérées.

8.1.3.2. Mise à jour des tendances publiées en 2006.

Lors de la rédaction de l'article *Brest sea level record : a time series construction back to the early eighteenth century*, nous avons utilisé les MTL entre 1807 et 2004 pour calculer les tendances et accélérations. Les MTL avaient été calculées classiquement sans prendre en compte les spécificités des données à notre disposition (cf. 8.1.2.2). Trois périodes avaient été déterminées suivant la méthode détaillée par Woodworth (1990) : 1807-1890, 1890-1980, 1980-2004. Le tableau 8.11 rappelle les valeurs des tendances trouvées alors :

Période considérée	Tendance (mm/an)	RMS tendance (m)
1807-1890	$-0,09 \pm 0,15$	0,030
1890-1980	$1,30 \pm 0,15$	0,040
1980-2004	$3,00 \pm 0,50$	0,015

Tab. 8.11. – Tendances calculées par Wöppelmann *et al.* (2006b).

L'exercice consistant à calculer la tendance sur la dernière période est délicat du fait que le nombre d'années utilisées, 24, est inférieur aux 70 années recommandées en 2001 par Douglas (cf. 1.2). Pour autant, s'agissant d'une étude comparative avec les résultats trouvés par Woodworth sur Liverpool, il semble utile d'effectuer la comparaison.

La même analyse a été reconduite avec les $MTL_{diurnes}$ et les $MTL_{res. diurnes}$ entre 1807 et 2004. En revanche les années "pivots" ont été légèrement modifiées : 1807-1892, 1892-1983

et 1983-2004 afin que les courbes de tendances s'ajustent au mieux (fig. 8.17) suivant la contrainte imposée aux bornes des intervalles. Le tableau 8.12 donne les nouvelles tendances.

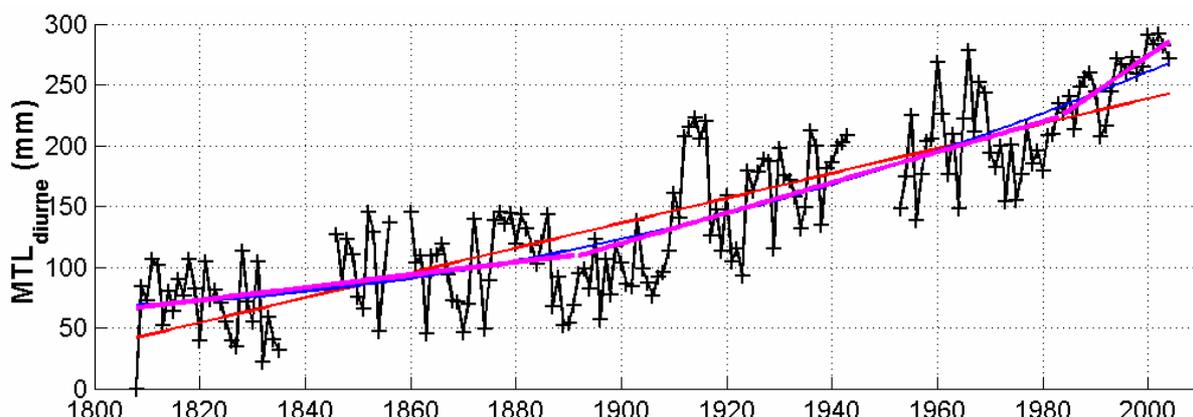


Fig. 8.17 – Moyennes annuelles des niveaux moyens diurnes de la marée (MTL_{diurne}) à Brest depuis 1807. La droite rouge correspond à la tendance linéaire et la courbe bleue prend en compte une accélération. Les droites violettes correspondent aux tendances calculées pour : 1807-1892, 1892-1983, 1983-2004.

Période considérée	Avec MTL_{diurne}		Avec $MTL_{res. diurne}$	
	Tendance (mm/an)	RMS tendance (m)	Tendance (mm/an)	RMS tendance (m)
1807-1892	$0,52 \pm 0,15$	0,033	$0,46 \pm 0,15$	0,032
1892-1983	$1,25 \pm 0,15$	0,037	$1,26 \pm 0,14$	0,038
1983-2004	$2,97 \pm 0,60$	0,017	$3,10 \pm 0,62$	0,016

Tab. 8.12. – Tendances calculées par tronçons avec les MTL_{diurne} et $MTL_{res. diurne}$ entre 1807 et 2004.

Les tendances calculées pour 1892-1983 (1890-1980) et 1983-2004 (1980-2004) sont statistiquement identiques à celles de l'article. Par contre, pour la première période de 1807 à 1892 (1807-1890), d'une tendance très légèrement négative déterminée dans l'article ($-0,09 \pm 0,15\text{mm}$) nous obtenons maintenant $\approx 0,50 \pm 0,15\text{mm}$ avec les MTL_{diurne} .

Le tableau 8.13 construit de la même manière que le tableau 8.12 présente les résultats obtenus avec les tendances pondérées. Ils sont tous identiques, à un sigma près, aux résultats se trouvant dans le tableau 8.12. Les conclusions sont donc identiques. La première période 1807-1892 a été sous évaluée dans l'article. Il existerait bien une légère hausse du niveau marin dès 1807.

Période considérée	Avec MTL_{diurne} pond.		Avec $MTL_{res. diurne}$ pond.	
	Tendance (mm/an)	RMS tendance (m)	Tendance (mm/an)	RMS tendance (m)
1807-1892	$0,49 \pm 0,15$	0,032	$0,42 \pm 0,15$	0,032
1892-1983	$1,28 \pm 0,15$	0,037	$1,28 \pm 0,14$	0,037
1983-2004	$2,81 \pm 0,53$	0,016	$2,90 \pm 0,55$	0,017

Tab. 8.13. – Tendances pondérées calculées par tronçons avec les MTL_{diurne} et $MTL_{res. diurne}$ entre 1807 et 2004.

Dans l'article, nous indiquions que l'accélération globale pour 1807-2004 était estimée à $0,0071 \pm 0,0008$ mm/an². Avec les MTL diurnes nous trouvons désormais (pour la même période) : $0,0041 \pm 0,0008$ (non pondéré) et $0,0044 \pm 0,0009$ mm/an² (pondéré) avec les MTL_{diurnes}, $0,0044 \pm 0,0008$ (non pondéré) et $0,0047 \pm 0,0009$ mm/an² (pondéré) avec les MTL_{res. diurne}, soit les mêmes valeurs à deux sigmas près (niveau de confiance de 95%). De plus, les nouvelles accélérations trouvées se rapprochent avec celles détaillées dans le tableau 8.3 pour Liverpool (0,0033), Stockholm (0,0043) et Key West (0,004mm/an²).

8.1.4. Comparaison des tendances et accélérations obtenues à Brest avec d'autres séries pluriséculaires.

Comme nous l'avons déjà indiqué, les longues séries de niveau de la mer sont rares (cf. 1.2). Il y a une dizaine d'années, Woodworth (1999a, 1999b) enrichissait la collection des moyennes pluriséculaires en complétant la série marégraphique de Liverpool avec des moyennes annuelles de PM réalisées entre 1768 et 1793. Les accélérations du niveau de la mer calculées à partir d'observations du 18^{ème} siècle sont égales à (tab. 8.3) : $0,0042 \pm 0,0005$ pour Amsterdam (1700-1925), $0,0043 \pm 0,0014$ pour Stockholm (1774-1985) et $0,0033 \pm 0,0010$ mm/an² pour Liverpool (1768-1998). Avec la série de Brest, nous complétons cette liste par une nouvelle estimation de cette accélération sur quatre siècles : $0,0010 \pm 0,0007$ mm/an² avec les $MHW_{diurnes}$, $0,0013 \pm 0,0005$ mm/an² avec les $MTL_{diurnes}$ (fig. 8.18), $0,0015 \pm 0,0004$ mm/an² avec $MHW_{rés. diurnes}$, $0,0021 \pm 0,0005$ mm/an² avec les $MTL_{rés. diurnes}$ et les $MLW_{rés. diurnes}$ (fig. 8.19).

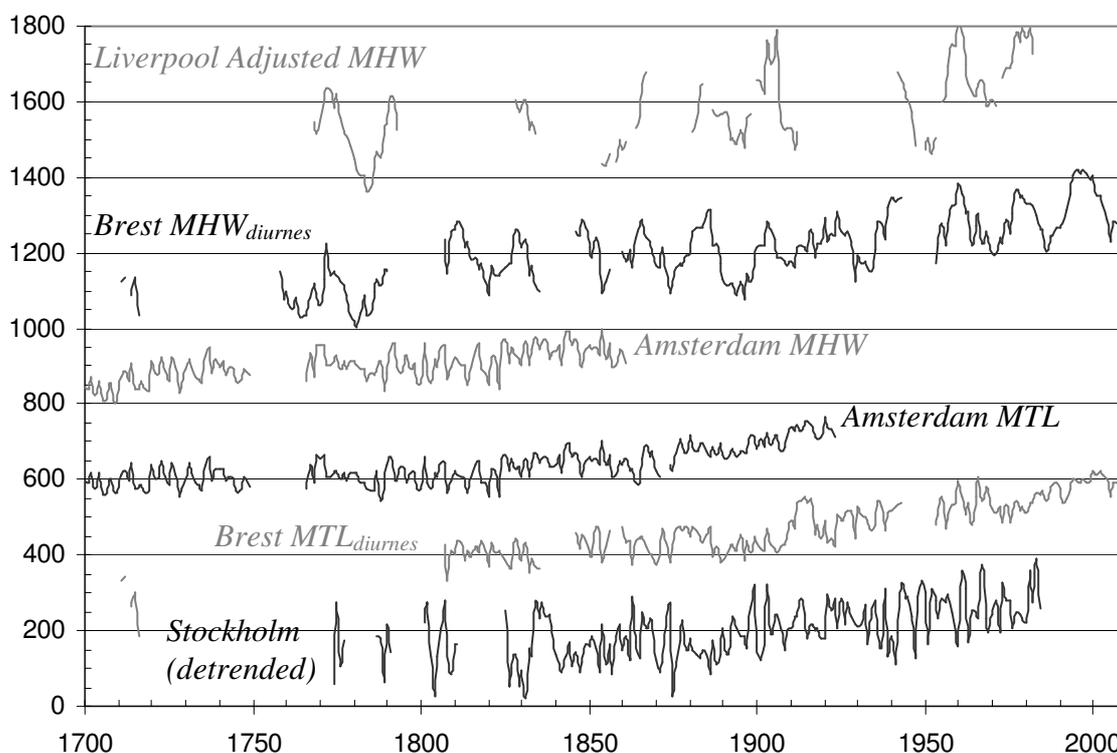


Fig. 8.18 – $MHW_{diurnes}$ et $MTL_{diurnes}$ de Brest comparés aux autres longues séries existantes du niveau de la mer. Les effets liés au rebond post-glaciaire ont été corrigés de la tendance pour Stockholm (Ekman, 1999). Les valeurs des MHW de Liverpool ont été ajustées (Woodworth, 1999).

L'accélération déterminée à Brest est cohérente avec les valeurs disponibles dans la littérature pour Stockholm et Liverpool à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 95%, ce qui n'est pas le cas pour Amsterdam, site présentant un écart équivalent entre 2 et 3 fois (95 - 99%) les limites des erreurs avec les MHW et MTL.

Jevrejeva *et al.* (2008), en s'appuyant sur 1023 stations marégraphiques ont construit une station virtuelle du niveau de la mer global (GSL pour Global Sea Level) remontant pour la première fois jusqu'en 1700 grâce aux niveaux moyens des trois stations d'Amsterdam, Stockholm et Liverpool. En effet, jusqu'à présent une GSL ne démarrait qu'à partir du 19^{ème} siècle : 1807 pour Jevrejeva *et al.* (2006), 1870 pour Church et White (2006). Les accélérations déterminées à partir des GSL sont égales à $0,0013 \pm 0,0006$ mm/a² pour Church et White (2006) et $0,001$ mm/a² pour Jevrejeva *et al.* (2008). Leurs chiffres sont cohérents avec ceux que nous trouvons pour Brest.

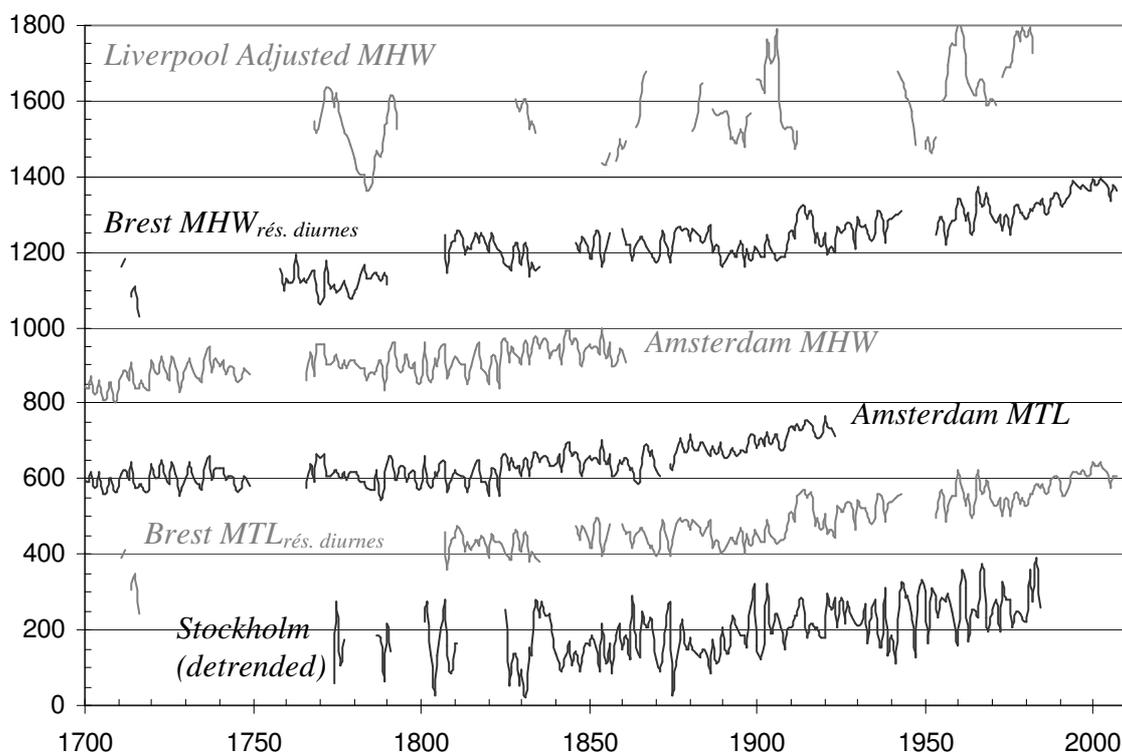


Fig. 8.19 – Résidus des MHW_{diurnes} et résidus des MTL_{diurnes} de Brest comparés aux autres longues séries existantes du niveau de la mer. Les effets liés au rebond post-glaciaire ont été corrigés de la tendance pour Stockholm (Ekman, 1999). Les valeurs des MHW de Liverpool ont été ajustées (Woodworth, 1999).

8.1.5. Estimation de la hausse du niveau moyen de la mer à Brest en 2100.

La tendance linéaire, calculée pour la période 1980-2007 avec les MTL_{diurne} est égale à $2,48 \pm 0,48$ mm/an (contre $2,97 \pm 0,60$ mm/an trouvé entre 1983 et 2004 avec les MTL_{diurne} non pondérés ; est-ce une influence de la pondération en fin de série ?). Si cette tendance restait identique au cours du siècle, la hausse du niveau de la mer s'élèverait de $0,248 \pm 0,048$ m entre 2001 et 2100. Malheureusement, comme le démontre Jevrejeva *et al.* (2006), l'utilisation des tendances calculées sur une période courte de temps est inappropriée pour effectuer une projection du niveau de la mer sur plusieurs dizaines d'années. Ils estiment la tendance au cours du 20^{ème} siècle à 1,8mm/an avec pour les périodes 1920-1945 et 1993-2000 des hausses à 2,5 mm/an. La figure 7.12 illustre ce qu'explique Jevrejeva *et al.* (2006) Il est également indispensable de prendre en considération les prédictions apportées par les modèles climatiques pour les prochaines années en particulier l'accélération stérique et l'augmentation des apports en eau douce liées à la fonte des glaciers. De plus, les causes possibles d'élévation ne sont vraisemblablement pas restées constantes au cours des 300 dernières années. Néanmoins, dans un but illustratif et d'étude de premier ordre, nous calculons la hausse possible du niveau de la mer d'ici 2100 suivant deux scénarios. Nous nous appuyons uniquement sur l'utilisation des ajustements quadratiques, termes d'accélération calculés précédemment sans prendre en compte et l'accélération stérique et l'augmentation des apports en eau douce. Voici les deux scénarios considérés :

- la moyenne des accélérations obtenues avec les $MTL_{diurnes}$ et les $MTL_{res. diurnes}$. (cf. 8.1.3.2.) soit $0,00425 \pm 0,0008$ mm/an² (fig. 8.20).
- la moyenne des accélérations avec les $MHW_{diurnes}$ et les $MHW_{res. diurnes}$. (cf. 8.1.3.2.) soit $0,0013 \pm 0,0007$ mm/an² (fig. 8.21).

Les figures 8.20 et 8.21, s'appuyant sur ces accélérations montrent la possible évolution du niveau moyen de la mer à Brest de l'année 2001 jusqu'en 2100. Pour le premier scénario, appuyé sur 160 années, la hausse moyenne du niveau de la mer sera de 20,8cm, cette valeur variant de 16,9 à 24,7cm à un sigma près ou de 13,0 à 28,7cm à deux sigmas près.

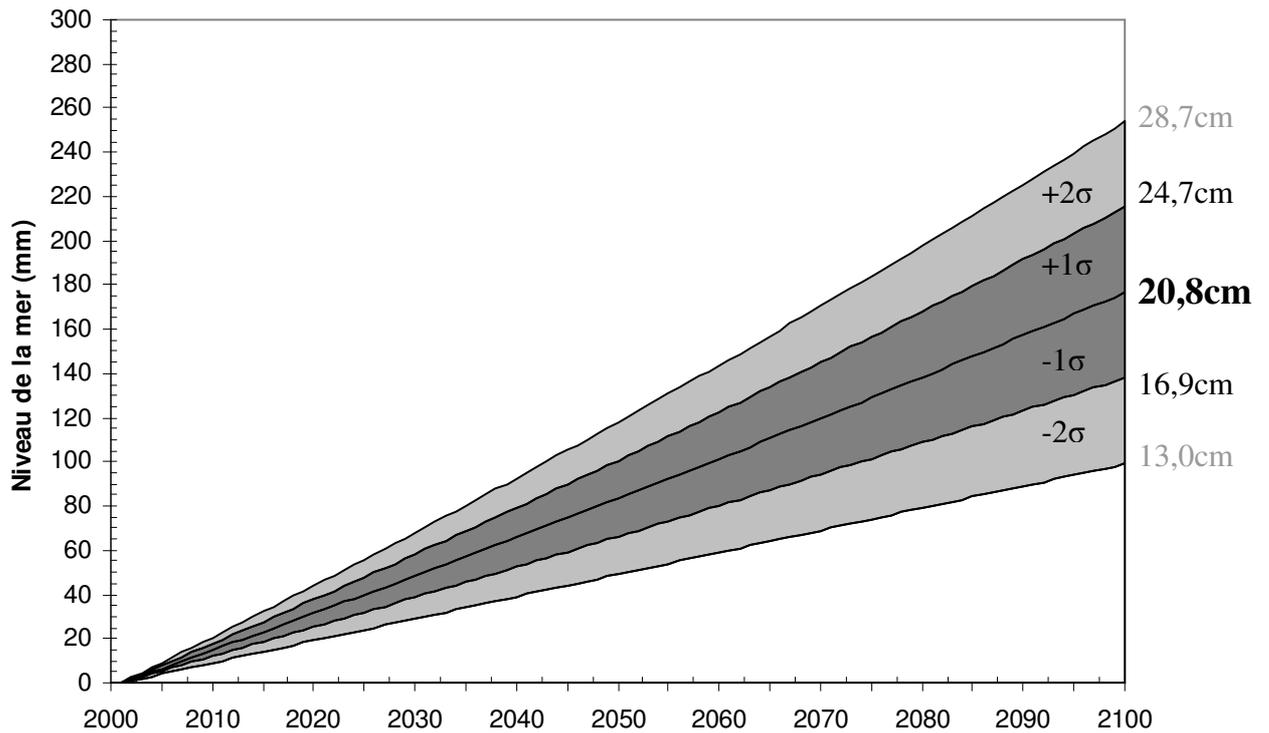


Fig. 8.20 – Hausse du niveau de la mer prédite pour le 21^{ème} siècle à partir des accélérations calculées avec les $MTL_{diurnes}$ et les $MTL_{res. diurnes}$ entre 1807 et 2004. Les chiffres à droite correspondent à la hausse du niveau de la mer entre 2001 et 2100 avec en gris les valeurs à \pm deux incertitudes, en noir à \pm une incertitude et en gras, à la valeur exacte de l'accélération.

Le second scénario, déterminé sur une période de 300 années d'observation estime la hausse moyenne du niveau de la mer à 8,7cm en 2100. A un sigma près (intervalle de confiance de 68%), la hauteur varie, de 4,0 à 13,7cm. Cette valeur fluctue de 0,5 à 18,2cm à deux sigmas près.

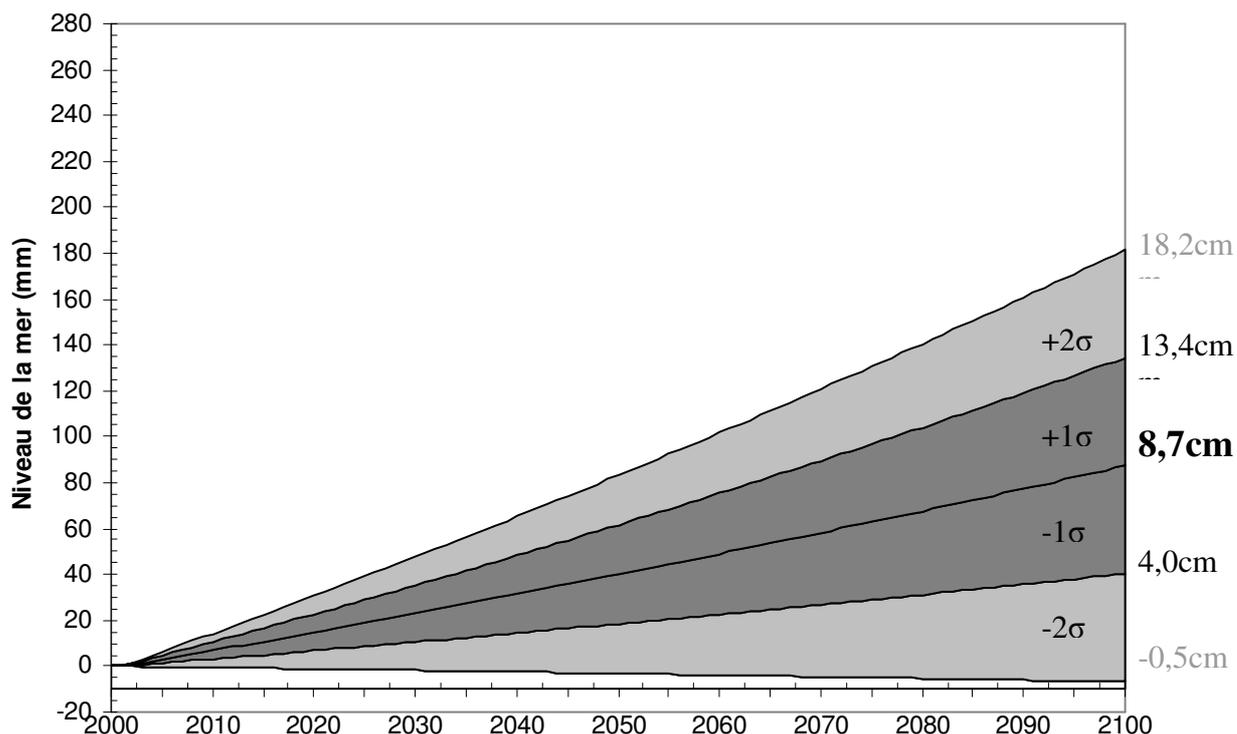


Fig. 8.21 – Hausse du niveau de la mer prédit pour le 21^{ème} siècle à partir des accélérations calculées avec les MHW_{diurnes} et les MHW_{res. diurnes} entre 1711 et 2007. Les chiffres à droite correspondent à la hausse du niveau de la mer entre 2001 et 2100 avec en gris les valeurs à \pm deux incertitudes, en noir à \pm une incertitude et en gras à la valeur exacte de l'accélération.

L'IPCC (2007), donne comme prévision une hausse comprise entre 13 et 58cm. Cette hausse a été affinée et réduite par rapport aux précédentes prévisions proposées dans les rapports de 2001 et de 1995 (tab. 8.1). La large fourchette de prévision est liée aux différents modèles utilisés pour estimer l'accélération stérique et l'évolution de la fonte des glaciers.

Le scénario 1 donne une hausse parfaitement cohérente avec les prévisions de l'IPCC tandis que le scénario 2 propose une évolution du niveau de la mer inférieure sauf si l'on se place dans le cas d'une hausse à plus deux sigmas d'incertitude (intervalle de confiance de 95%). Il semble en revanche peu envisageable de constater une diminution du niveau de la mer comme peut nous laisser imaginer la prédiction à moins deux sigmas de la figure 8.21.

A partir d'observations pluri-journalières du niveau de la mer à Brest, nous sommes ainsi parvenus à déterminer de nombreuses tendances, mais avec une cohérence assez limitée avec les prédictions de l'IPCC. En effet, les scénarios précédents s'appuient uniquement sur les 300 années d'observations disponibles pour déterminer la hausse du niveau de la mer d'ici 2100 sans considérer l'accélération stérique et la fonte des glaciers. Au contraire, l'IPCC utilise ces modèles pour estimer la hausse du niveau de la mer en s'appuyant sur un très grand nombre d'observatoires marégraphiques mais aussi sur des scénarios d'émission en gaz à effet de serre.

8.2. Evolution des composantes de la marée.

Disposer d'une longue série d'observations du niveau de la mer permet aussi de suivre l'évolution des composantes de la marée. L'évolution de l'onde de marée semi-diurne M_2 , dominante à Brest, a fait l'objet d'un article (ref. 8.2.1). Quelques informations complémentaires, principalement l'ajout des observations réalisées dans les années 1915, 2006 et 2007 montrent encore la bonne cohérence de l'ensemble.

8.2.1. CRAS paru en 2006.

L'article : *Evolution de l'onde semi-diurne M_2 de la marée à Brest de 1846 à 2005*, soumis et accepté en 2006, a permis de présenter le travail d'enquête, de sauvetage et de contrôle qualité des mesures anciennes du niveau de la mer entrepris dans le cadre de cette thèse. Il a également servi de source d'information pour prévenir la communauté de sa disponibilité sur le serveur de SONEL¹ mais pas seulement. Il est un exemple de valorisation d'observations horaires issues d'archives complétant l'existant disponible sous format numérique.

En effet, nous revenons sur la question de l'atténuation séculaire de l'onde M_2 soulevée en 1972 par Cartwright. Ce dernier, s'appuyant sur les observations des années 1711-1716, 1864-1884, 1898-1914, 1916-1936 et 1960 concluait à une atténuation significative de l'amplitude de l'onde de marée M_2 et au contraire à une augmentation de sa phase (fig. 8.22).

¹ URL : <http://www.sonel.org/> (consulté le 5 octobre 2008).

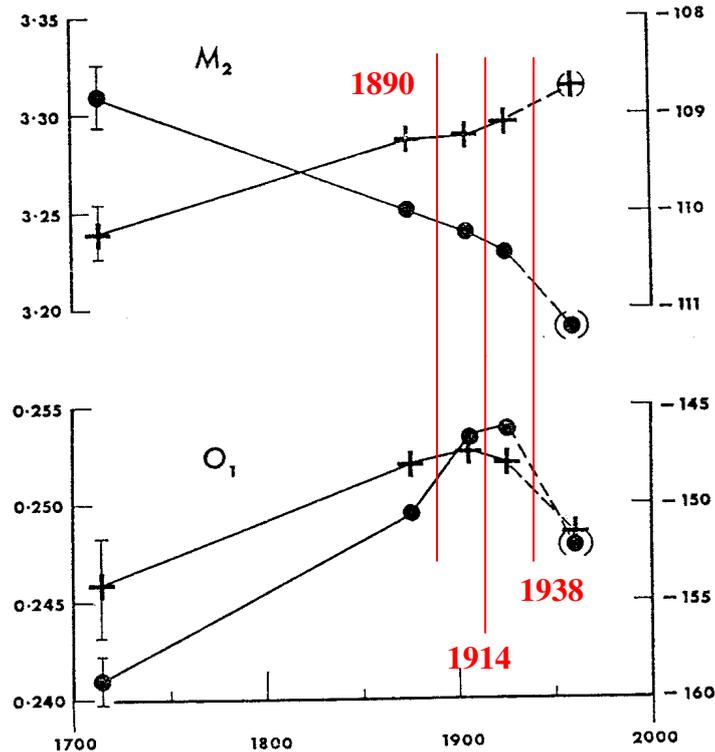


Fig. 8.22 – Evolution des amplitudes (points noirs, échelle des ordonnées à gauche, exprimée en m) et des phases (croix, échelle des ordonnées à droite, exprimée en degré) pour les ondes M₂ et O₁ à Brest. D’après Cartwright, 1972 (les traits verticaux, rajoutés à la figure initiale sont les dates de transformation de la rade-abri de Brest donné par l’auteur).

Pour expliquer les évolutions en amplitude et en phase des ondes M₂ et O₁, Cartwright (1972) se base sur des modifications anthropiques affectant la rade de Brest. Les jetées et digues sont construites pour former la rade-abri (cf. 6.1.5), créant un obstacle hydrodynamique à la propagation de la marée. Il détermine des dates approximatives de construction des digues et jetées à l’aide de différentes cartes. Il constate qu’en 1890, seulement une petite partie de la jetée existait (digue Sud, cf. 6.1.5). En 1914, l’ensemble était quasiment achevé. Enfin en 1938 il note qu’un passage dans la digue Sud était maintenant obstrué (fig. 8.22).

L’apport en observations supplémentaires pour les années 1846-1863, 1885-1897, 1937-1944, 1953-1959, 1961-2004 (les années 1915, 2006 et 2007 n’étaient pas encore disponible à la date de la publication) a fait évoluer les conclusions de Cartwright. L’amplitude annuelle de l’onde M₂ diminue bien avant 1890 mais augmente depuis 1960.



Océanographie

Évolution de l'onde semi-diurne M2 de la marée à Brest de 1846 à 2005

Nicolas Pouvreau^a, Belén Martin Miguez^b, Bernard Simon^b, Guy Wöppelmann^{a,*}

^a Centre littoral de géophysique, université de la Rochelle, av. Michel-Crépeau, 17042 La Rochelle, France

^b Service hydrographique et océanographique de la Marine, 13, rue du Chatellier, BP 30316, 29603 Brest, France

Reçu le 25 janvier 2006 ; accepté après révision le 4 juillet 2006

Disponible sur Internet le 21 août 2006

Présenté par Anny Cazenave

Résumé

Cet article présente notre travail d'enquête, de sauvetage et de contrôle qualité autour des mesures anciennes du niveau de la mer à Brest, que nous avons découvertes récemment dans les archives historiques. Leur analyse, conjuguée à celle des observations accumulées depuis 1960, nous a permis de compléter l'étude menée en 1972 par Cartwright, qui concluait à une atténuation significative et régulière de l'amplitude de l'onde de marée semi-diurne M2 de 1% par siècle. Nos résultats montrent une augmentation de cette amplitude depuis 1960, ainsi qu'une diminution avant 1880; ils suggèrent davantage un phénomène cyclique à longue période plutôt qu'une tendance séculaire. *Pour citer cet article* : N. Pouvreau et al., C. R. Geoscience 338 (2006). © 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Evolution of the tidal semi-diurnal constituent M2 at Brest from 1846 to 2005. The work of searching, recovering and quality control of ancient sea-level measurements at Brest is presented. This work enables us to complete a study carried out by Cartwright in 1972, which showed a decrease in the tidal M2 semi-diurnal amplitude of 1% per century. After including these ancient data, as well as the last four decades of observations in the analysis, our results show an increase of the amplitude of M2 after 1960 and a decrease before 1880, suggesting a long-period oscillation rather than a steady secular trend. *To cite this article*: N. Pouvreau et al., C. R. Geoscience 338 (2006).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Marée ; Marégraphes ; Variations du niveau marin ; Brest ; France

Keywords : Tides ; Tide gauges ; Sea-level variations ; Brest ; France

Abridged English version

Introduction

In 2000, the unexpected discovery of a set of sea-level measurements carried out in Brest between 1778 and 1792 led us to undertake the search for ancient

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : gwoppelm@univ-lr.fr (G. Wöppelmann).

unpublished data in the archiving centres all around France. We succeeded in completing the Brest time-series with the very earliest observations (1756–1778) as well as in finding the first tide-gauge measurements recorded between 1846 and 1860. The search was followed by a thorough, time-consuming process of recovering, digitising and controlling the quality of the sea-level data. Afterwards, we were able to approach the question of the long-term evolution of the mean sea level throughout ca 300 years [15].

These ancient data also shed new light over the variations of the amplitude of the M2 tidal constituent in Brest, an issue dealt with by Cartwright in 1972. In his study, he indicated a 1% per century decrease in the semi-diurnal amplitude and discussed the possible effects of the construction of a harbour; however, the relationship was dubious and the author himself discarded the hypothesis [2]. Subsequent efforts by other authors have not permitted to explain the origin of this variation [1,12], while some have even questioned the secular diminution of the M2 amplitude [10]. In the present study, we integrate all the data available with the aim of verifying the evolution of the M2 tidal constituent and its characteristics. Then, we present the data and the corrections that we had to apply (Section 2); we detail the analysis performed to study the evolution of M2 in Brest (Section 3) and, last, we discuss the results obtained to determine whether the variation can be oceanic or due to local changes (Section 4).

Compilation and processing of tide-gauge measurements

The first tide gauge was installed in Brest in December 1845 [4] and was used there until 1944, when it was destroyed as a result of the bombing of the city at the end of World War II. It was not until 2005 that we had access to the first tide-gauge recordings. Spanning from 1846–1860, these ancient, unpublished data were added to the more recent dataset covering the period 1949 to 1952, also unpublished until now. After digitisation to obtain hourly values, we undertook a quality control of the whole time series covering the period 1846–2005. The approach is based on the examination of the residuals between tidal predictions and observations [15]. It leads to finding and correcting timing errors, changes in the time reference system, changes in the tide-gauge zero and errors in the transcriptions of observations. Though laborious and time-consuming, the quality control process has proven worthwhile, since it has provided the longest quality-assessed time series of sea level in France. Furthermore, it showed that sev-

eral years of data (1937, 1939–1943) which had been supplied to the Permanent Service of Mean Sea Level in the past [13], mistakenly included an undue correction for atmospheric pressure.

Computation of the M2 tidal amplitude at Brest

We performed the harmonic analysis of the Brest hourly sea-level data and obtained year-by-year values for the amplitude of the semi-diurnal M2 tidal constituent. We used two different sets of programs: the first one is MAS, written by B. Simon for the SHOM, the second one is T_TIDE [7]. Years that presented less than six months of valid data, namely 1857, 1859, 1938, 1944 and 1952, were not included in the analysis. The root mean square (RMS) of the differences between the amplitudes obtained from both sets of programs is 0.0001 ± 0.0030 m. Fig. 1 shows the evolution of the amplitude of the M2 tidal constituent at Brest. Our results confirm the decreasing trend observed by Cartwright [2], but only between 1885 and 1960. From 1960 on, our results question the idea of a steady secular attenuation in the M2 amplitude. Moreover, data between 1846 and 1885 also show an increase in the amplitude of M2.

Discussion

The shape of the curve in Fig. 1 suggests a long-period oscillation rather than a steady secular decreasing trend. Should this be the case, we may try to estimate its period through a non-linear adjustment as in Fig. 2. This would yield a period of $T = 141 \pm 5$ years with an amplitude of 0.011 ± 0.001 m.

Even if the cause of this oscillation remains unknown for the time being, it is worth trying to already establish whether it might be global or local. For this purpose, we chose three stations out of the few ones with long enough records, and we analysed the evolution of the amplitude of M2 as we did in Brest. These stations are Newlyn (UK), Honolulu (USA) and Cristobal (Panama), whose data can be found on the web server of the University of Hawaii: <http://www.soest.hawaii.edu/UHSLC/>.

If the process underlying the oscillation in the M2 amplitude were not local but affected a greater region, we would also expect to see it in other time series. This is the case only for Newlyn (UK), which is 200 km away from Brest. The M2 amplitude there follows a pattern similar to that at Brest for the period 1915–2000. The RMS of the differences between the Newlyn amplitudes

of M2 and the predictions of the sinusoidal function obtained by fitting the Brest amplitudes is 0.01 m (after removal of the mean value in both cases). This RMS is identical to the one computed from a linear adjustment of the Newlyn data, indicating that both models are statistically equivalent.

Conclusions and prospects

In 2003, as a result of our commitment to the project SONEL (<http://www.sonel.org>), which aims at developing the infrastructure of a French coastal sea-level monitoring system, we have made freely available all hourly Brest tide gauge data discovered so far. Since then, more data have been rescued, in particular those corresponding to the earliest tide gauge measurements (1846–1860). Those recently discovered data have been submitted to a thorough process of quality control and subsequent appropriate corrections. We have them already available on demand, pending their free accessibility on the SONEL data server.

Our study clearly discards the idea of a steady secular decrease of the M2 amplitude at Brest and rather suggests a long-period oscillation. Though this is much appealing, it cannot be demonstrated yet, as we cannot securely define its periodicity, which would be close to the length of the present time series. We hope that the further rescue of ancient high-/low-level observations (1807–1846) will help us to clarify the issue. For this purpose, new problems will have to be faced, as the sampling conditions for these data are incompatible with the classical harmonic analysis applied to hourly values. Provided these problems are solved, we hope to include the early-18th-century data in a future analysis.

1. Introduction

La découverte inattendue, en 2000, d'observations du niveau de la mer effectuées à l'échelle de marée à Brest entre 1778 et 1792, nous a conduits à entreprendre une recherche systématique des différents centres historiques d'archivage en France. Cette recherche s'est avérée fructueuse, puisque nous avons complété la série mentionnée ci-dessus des observations de 1756 à 1778; nous avons retrouvé les toutes premières observations du marégraphe de Brest, de 1846 à 1860, et nous avons commencé à valoriser l'ensemble, en étudiant la question très actuelle de l'évolution séculaire du niveau moyen de la mer sur près de 300 ans, ceci après un long travail d'enquête, de sauvetage, de numérisation et de contrôle de qualité des données [15].

Dans cette courte note, nous revenons sur la question de l'évolution séculaire de l'onde semi-diurne M2 de la marée océanique à Brest. En 1972, Cartwright [2] concluait à une atténuation significative et régulière de l'amplitude de cette onde, de l'ordre de 1% par siècle. Ses efforts pour expliquer l'origine de cette atténuation portèrent notamment sur l'effet potentiel de la construction des digues de la rade-abri de Brest (1895–1912), un argument que Courtier avait avancé en 1934 pour expliquer la mauvaise qualité des prédictions de la formule de Laplace–Chazallon. Simon montra cependant, en 1982, que cette formule était bien en cause, et non la modification de la marée à l'observatoire de la Penfeld à Brest [10]. Les calculs poussés de Cartwright [2] amèneraient également ce dernier à écarter cette hypothèse. L'origine de la diminution séculaire de l'onde M2 demeurerait inconnue.

L'étude de Cartwright [2] s'appuyait sur les observations des années 1864–1884, 1898–1914, 1916–1936, complétées de l'année 1960 et des années 1711 à 1716, qui servirent à Laplace pour valider sa théorie dynamique de la marée en 1790. Dans son étude de 1982, Simon signale que les observations accumulées depuis 1960 contredisent l'idée d'une diminution séculaire de l'amplitude de la marée à Brest. Mais Araujo et al. [1] reviennent sur l'idée de la diminution séculaire de l'onde M2, même si la valeur n'est plus que de 0,4%. Leur étude s'appuie sur l'analyse des observations marégraphiques disponibles en 2000, c'est-à-dire antérieures à nos découvertes, mais aussi au contrôle de qualité systématique que nous avons mené sur l'ensemble des données et aux corrections qui s'en sont suivies, rendues souvent possibles parce que nous sommes remontés jusqu'aux registres originaux.

Le sauvetage des mesures anciennes, la révision des données connues et les années d'observation accumulées depuis les études mentionnées ci-dessus sont autant d'éléments nouveaux, potentiellement utiles à la communauté intéressée par l'exploitation des observations d'une station quasiment unique dans le monde. Cette série est particulièrement intéressante par sa couverture temporelle dans un contexte de changement climatique [11]. Il était, par ailleurs, intéressant d'intégrer ces nouvelles données dans une analyse d'ensemble de la question particulière de l'évolution de l'onde M2 dans le signal marégraphique à Brest pour réévaluer les résultats publiés à ce jour et apporter de nouveaux éléments qui permettraient de mieux comprendre cette évolution. La Section 2 présente les données et les corrections que nous avons appliquées. Nous détaillons ensuite dans la Section 3 les traitements et les résultats que nous obtenons sur l'onde M2 à Brest. Enfin, la Section 4 discute

Tableau 1
Synthèse des observations horaires de marégraphie à Brest

Table 1
Synthesis of hourly tide gauge observations at Brest

Période d'observation	Appareil	Support des valeurs	Mesures inédites	Mesures utilisées dans cette étude
04/01/1846–30/05/1857	Marégraphe Chazallon	Registre	×	×
23/11/1859–20/01/1860	Marégraphe Chazallon	Registre	×	×
01/05/1860–31/12/1914	Marégraphe Chazallon	Registre		×
01/01/1915–31/12/1915	Marégraphe Chazallon	Marégramme	×	
01/01/1916–31/07/1937	Marégraphe Chazallon	Registre	×	×
01/08/1937–01/11/1937	Marégraphe Chazallon	Registre	×	×
01/01/1939–01/05/1944	Marégraphe Chazallon	Registre		×
22/06/1949–05/11/1952	Marégraphe FUESS 10518	Marégramme	×	
29/09/1952–31/12/1952	Marégraphe OTT 3268	Registre	×	×
01/01/1953–février 1977	Marégraphe OTT 3268	Marégramme		×
février 1977–31/12/1992	A OTT Kempton 20030	Marégramme		×
01/01/1992–aujourd'hui	MCN	Numérique		×

les résultats obtenus et, à défaut de trouver une explication satisfaisante, tente de déterminer si l'effet est local, ou bien s'il est également présent dans d'autres séries temporelles du niveau marin.

2. Compilation et traitement des mesures marégraphiques

De 1839 à 1842, Rémy Chazallon (1802–1872) met au point un appareil capable d'enregistrer de manière continue et automatique le niveau de la mer. Il sera récompensé d'une médaille d'argent par la « Société d'encouragement » et donnera à cet appareil le nom de « marégraphe » [4]. Il s'agit d'un instrument mécanique équipé d'un flotteur, dont le déplacement vertical suit le niveau de la mer [14]. Ce déplacement du flotteur est mécaniquement réduit par un système de poulies et d'engrenages, avant d'être inscrit sur un rouleau de papier calé autour d'un cylindre mû par un mouvement de rotation uniforme. Toulon sera le premier site équipé d'un marégraphe en France, en 1842; Brest le sera en décembre 1845. Fait pratiquement unique, le marégraphe de Brest fonctionne depuis cette date, avec une interruption en 1944, correspondant à sa destruction par les bombardements de la seconde guerre mondiale. De plus, grâce aux repères de marée, le marégraphe a pu être reconstruit dès juin 1949, en assurant la continuité de la référence des hauteurs jusqu'à nos jours. Ce point n'est toutefois pas critique dans l'étude présente sur l'onde de marée, mais le lecteur intéressé pourra se reporter à la référence [15], dans laquelle la question est traitée sur près de 300 ans de mesures.

Outre les toutes premières observations du marégraphe de Brest, très complètes de 1846 à 1857, partielles de 1859 à 1860, nous avons également retrouvé les observations de 1949 à 1952, ainsi que quelques lots plus modestes. Le Tableau 1 résume les caractéristiques de ces observations, en soulignant celles qui sont inédites.

Le travail de numérisation des observations inédites achevé, nous avons contrôlé l'ensemble des observations horaires de 1846 à 2005. L'approche employée pour détecter les erreurs ou les défauts repose sur l'examen détaillé des résidus obtenus de l'analyse harmonique des observations de hauteur d'eau horaires; l'approche est décrite dans la référence [15]. Lorsque l'explication est trouvée, souvent en revenant à la source des registres originaux, les erreurs sont corrigées. Toutefois, Wöppelmann et al. [15] ne rentrent pas dans les détails de ces corrections, dont la liste synthétique suit :

- correction des observations de 1846 à 1897 pour passer du temps solaire vrai de Brest au temps universel;
- correction des observations de 1897 à 1914 pour passer du temps solaire moyen de Brest au temps universel;
- correction des observations du 22 au 30 novembre 1908 pour passer du temps civil au temps universel;
- correction de l'erreur de décalage en temps portée sur les fiches de contrôle et sur les marégrammes pour les observations de 1956, 1961 et 1963;
- correction des décalages d'horloge entre le marégraphe de secours et le marégraphe principal

lorsque ce dernier est tombé en panne (21–23 mai et 13 au 20 août 1956) ;

- correction des retards en temps liés au rattrapage de jeu lors du changement de rouleau de papier des observations du 30 mai au 9 juin 1983 (difficiles à déceler, il pourrait en subsister entre 1975 et 1991) ;
- calage des observations de 1846 à 1860 et de 1897 à 1914 au zéro hydrographique de Brest, redéfini le 1^{er} janvier 1996, en retranchant 50 cm à toutes les hauteurs ;
- correction des fautes de transcription proches des pleines et des basses mers, qui ressortent très nettement de l'examen des résidus de l'analyse harmonique.

Deux éléments méritent d'être soulignés. Le premier est la curiosité de l'usage du temps solaire vrai (local) de 1846 à 1897 avec un marégraphe. L'opérateur réglait tous les jours l'horloge du marégraphe, qui est par construction uniforme. Le deuxième est que nous avons désormais des éléments techniques qui permettraient d'expliquer la meilleure qualité des observations de 1846 à 1944, qualité seulement retrouvée avec l'installation d'un marégraphe numérique à ultrasons en 1992 [15]. Le facteur de réduction des déplacements verticaux du flotteur était de 10 [3], alors qu'il est typiquement de 30 ou de 50 dans les observatoires des côtes présentant un fort marnage. Le rouleau de papier sur lequel s'inscrivait la courbe de niveau de la mer était alors large de 1 m [9]. Cela permettait une meilleure lecture des courbes enregistrées sur le papier, et par suite une numérisation plus fine et juste. L'autre explication de la qualité de ces mesures est l'emploi à temps plein d'un opérateur ; après la seconde guerre mondiale, la fréquence des visites est devenue hebdomadaire, à l'occasion du changement du rouleau de papier (marégramme).

Enfin, notre travail a également permis d'informer le service permanent du niveau moyen de la mer, le PSMSL [13], que les valeurs des niveaux moyens de la mer mensuels et annuels des années 1937 et 1939 à 1943, qui leur furent communiquées dans le passé, sont incorrectes, dans la mesure où elles sont, par erreur, corrigées de la pression atmosphérique.

3. Calcul de l'amplitude de l'onde M2 à Brest

L'analyse harmonique des observations horaires de la hauteur d'eau instantanée à Brest permet de calculer les composantes de la marée, en particulier l'amplitude de l'onde semi-diurne M2, année par année. Pour ce faire, nous avons utilisé l'outil MAS développé

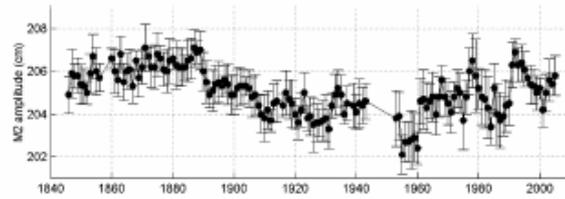


Fig. 1. Évolution de l'amplitude de l'onde de marée M2 à Brest (les barres d'erreur correspondent à \pm un écart-type).

Fig. 1. Evolution of the M2 tidal constituent amplitude at Brest (the error bars correspond to \pm one standard deviation).

par B. Simon au SHOM. Par souci de contrôle, nous avons comparé les résultats avec le logiciel T_TIDE [7]. Les différences dans l'amplitude de l'onde M2, obtenues avec l'un ou l'autre des outils d'analyse de la marée, sont très faibles : l'écart moyen quadratique des différences d'amplitude de l'onde M2 à Brest est de $0,0001 \pm 0,0030$ m. L'écart-type sur l'amplitude de l'onde M2 est de l'ordre de 0,009 m, soit 0,4% de l'onde en question. Nous n'avons retenu dans notre analyse que les années qui présentaient plus de six mois d'observation par an. Seules les années 1857, 1859, 1938, 1994 et 1952 sont écartées avec ce critère de sélection, suffisant pour isoler avec précision l'onde M2 à Brest.

La Fig. 1 confirme la tendance à la diminution observée par Cartwright en 1972, mais seulement entre 1885 et 1960. Depuis 1960, nos résultats indiquent que la tendance s'est inversée. Par ailleurs, une augmentation est également visible entre 1846 et 1885, remettant en cause l'idée d'une atténuation régulière et séculaire de l'amplitude de M2 depuis 1711.

4. Discussion

L'allure de la courbe de la Fig. 1 suggère plutôt un phénomène cyclique à longue période qu'une tendance séculaire à l'atténuation. Mais il est toutefois difficile de réellement conclure à un phénomène périodique, même si la tentation est grande d'en estimer la période, comme sur la Fig. 2. Elle serait alors de l'ordre de 141 ± 5 ans, avec une amplitude de $0,011 \pm 0,001$ m, résultat obtenu en effectuant un ajustement non linéaire de l'amplitude, de la période et de la phase d'une fonction sinusoïdale en appliquant l'algorithme de Levenberg–Marquardt. Le développement harmonique du potentiel générateur de la marée ne montre aucune composante qui puisse expliquer ce phénomène. L'hypothèse d'un effet non linéaire a été étudiée, mais s'est révélée infructueuse. Aucune combinaison valide du point de vue astronomique ne peut expliquer une modulation de M2 à cette période.

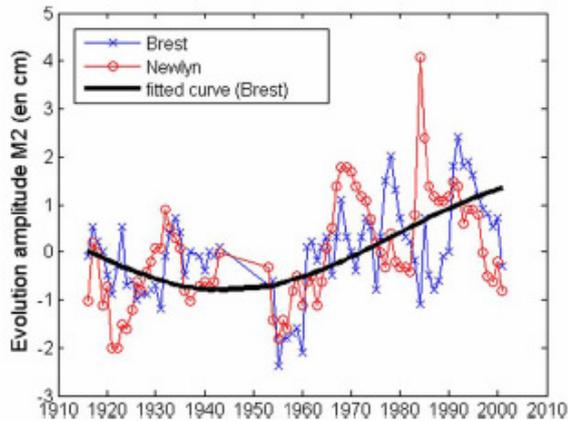


Fig. 2. Évolution comparée de l'amplitude de l'onde de marée M2 à Newlyn (Royaume-Uni) et à Brest (France). Les valeurs moyennes des amplitudes sont retirées. La courbe sinusoïdale provient de l'ajustement non linéaire des valeurs de Brest seules.

Fig. 2. Comparative evolution of the M2 tidal constituent amplitude at Newlyn (UK) and at Brest (France). The average values of the amplitudes are removed. The sinusoidal curve results from the nonlinear curve fitting of the Brest data only.

Si l'origine de la variation de l'onde M2 à Brest demeure encore une énigme, il est intéressant d'essayer d'établir si l'effet est local ou étendu à d'autres observatoires. Les études que nous avons trouvées dans la littérature portent essentiellement sur des tendances [1,2,12]. Les séries temporelles longues de marégraphie sont rares, et encore plus celles dont les données horaires sont accessibles, malgré les efforts louables du service européen du niveau de la mer ESEAS [8]. Nous avons néanmoins pu récupérer les observations horaires des marégraphes de Newlyn (Royaume-Uni), de Cristobal (Panama) et d'Honolulu (États-Unis), dans l'un des centres du programme mondial d'observation du niveau de la mer GLOSS [5], sur le serveur (<http://www.soest.hawaii.edu/UHSLC/>) de l'université d'Hawaii. Ces stations présentaient les caractéristiques nécessaires à notre étude : des séries de valeurs horaires, disponibles, sous forme numérique, sur une longue période. Seule la station de Newlyn, distante de quelque 200 km de Brest, présente des variations en accord avec Brest. L'ajustement par moindres carrés d'une tendance sur la période commune de 1916 à 2001 donne une augmentation de l'amplitude de l'onde M2 de $0,015 \pm 0,004$ m/siècle pour Brest et de $0,021 \pm 0,004$ m/siècle pour Newlyn, avec des écarts moyens quadratiques des résidus issus de l'ajustement de 0,009 m et de 0,010 m, respectivement. Toutefois, il est intéressant de noter que le calcul des écarts moyens quadratiques entre la courbe sinusoïdale ajustée ci-dessus sur les seuls résultats de

Brest entre 1846 et 2005 et les observations de Newlyn, auxquelles on a au préalable retiré la valeur moyenne, donne le même résultat de 0,01 m. Statistiquement, les deux modèles, linéaire et courbe sinusoïdale, sont aussi légitimes à Newlyn.

5. Conclusions et perspective

Les deux objectifs de cette note étaient : (i) de présenter le travail d'enquête, de sauvetage et de contrôle qualité des mesures anciennes du niveau de la mer à Brest, données que nous avons découvertes récemment dans les archives historiques, et (ii) de revoir la question de l'atténuation séculaire de l'onde de marée M2 à la lueur de ces nouvelles données. Notre engagement dans l'infrastructure d'observatoire de recherche SONEL (*Système d'observation du niveau des eaux littorales*) nous a déjà conduits à diffuser librement les observations horaires du marégraphe de Brest en 2003. Celles-ci portaient sur les périodes 1860–1944 et 1953–2003. Depuis, de nouvelles données ont été découvertes, en particulier les toutes premières observations marégraphiques de 1846 à 1860. Une révision d'ensemble de la qualité des observations a été accomplie en parallèle, souvent avec des corrections rendues possibles par étude des registres originaux. Par cette note scientifique, nous informons la communauté d'un long travail accompli pour le sauvetage d'observations historiques du niveau de la mer, à fort intérêt scientifique dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de leur disponibilité sur demande, dans l'attente de leur mise à disposition prochaine sur le serveur de SONEL (<http://www.sonel.org>). Nous espérons ainsi perpétuer la démarche avant-gardiste de Joseph Jérôme de Lalande (1732–1807), de publication et de diffusion des observations effectuées par l'Académie royale des sciences au début du XVIII^e siècle. Lalande soulignait alors assez sarcastiquement que les observations qu'une personne utilise pour défendre sa thèse peuvent parfois servir une autre personne pour défendre une thèse contraire [6].

En effet, si notre étude a permis d'écarter l'idée d'une atténuation séculaire de l'amplitude de l'onde M2 à Brest, elle ne permet ni de conclure à une variation cyclique, ni d'estimer avec confiance une période à peine plus courte que la durée du signal. Les mesures de 1756 à 1792 ne peuvent contribuer à cette démarche, car seules les pleines mers firent l'objet d'observation. En revanche, nous espérons que les observations de 1807 à 1846 complèteront utilement nos données actuelles, mais la tâche n'est pas immédiate. Ces observations ne se prêtent pas facilement à une analyse harmonique classique. Nos outils doivent être adaptés

à cet échantillonnage particulier, gouverné par l'occurrence des pleines et des basses mers, mais, surtout, leur exploitation doit se faire avec prudence. En particulier, nous avons récemment mis en évidence des effets pervers d'échantillonnage entre le jour et la nuit, entre les mortes-eaux et les vives-eaux, effets dont la prise en compte est indispensable pour réduire le bruit naturellement plus élevé dans les observations à l'échelle de marée que dans celles par marégraphes. Lorsque ces effets seront maîtrisés, nous pourrons alors même envisager d'exploiter les données de 1711 à 1716.

Remerciements

Cette recherche est financée en partie par le conseil général de la Charente-Maritime (bourse doctorale) et par le Groupe de recherches en géodésie spatiale. Les observations horaires des marégraphes de Newlyn (Royaume-Uni), de Cristobal (Panama) et de Honolulu (États-Unis) proviennent du centre de données de l'université d'Hawaii (UHSLC), dont nous saluons le travail inestimable de collecte, de contrôle et de diffusion, ainsi que le soutien des organismes qui l'alimentent régulièrement en observations. Les auteurs tiennent à remercier Jean-Claude Mercier, directeur du CLDG, pour ses commentaires très instructifs et ses encouragements dans la publication de ces travaux.

Références

- [1] I. Araujo, D. Pugh, M. Collins, Trends in components of sea level around the English Channel, in: *The Changing Coast, Eurocoast, Portugal*, ISBN 972-8558-09-0, 2002, pp. 107–114.
- [2] D.E. Cartwright, Secular changes in oceanic tides at Brest (1711–1936), *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 30 (1972) 433–449.
- [3] A. Courtier, Données numériques concernant les marées des côtes de France, publication SHOM n° 14-1016.
- [4] R. Chazallon, Lettre du 6 décembre 1859 au ministre de la Marine, Archives de l'établissement principal du SHOM, Brest, 1859.
- [5] IOC, Global Sea Level Observing System (GLOSS) – Implementation plan, Intergovernmental Oceanographic Commission, Technical Series, No. 50, 1997.
- [6] J.J. Lalande, Mémoire sur le flux et le reflux de la mer, et spécialement sur les marées des équinoxes, *Hist. (Mém.), Acad. R. Sci. Paris* 85 (1772) 297–324.
- [7] R. Pawłowicz, B. Beardsley, S. Lentz, Classical tidal harmonic analysis error estimates in MATLAB using T_TIDE, *Comput. Geosci.* 28 (2002) 929–937.
- [8] H.-P. Plag, The European Sea-Level Service (ESEAS), Assessment of the first three years, Paper presented at the 9th Session of the IOC Group of Experts on the Global Sea Level Observing System (GLOSS), Paris, France, 24–25 February 2005.
- [9] M. Rollet de l'Isle, Observation, étude et prédiction des marées, publication SHOM n° 13-155, 1905.
- [10] B. Simon, Prédiction de la marée à Brest, *Ann. Hydrogr.*, 5^e Ser. 10 (757) (1982) 33–50.
- [11] R.A. Warrick, C. Le Provost, M.F. Meier, J. Oerlemans, P.L. Woodworth, Changes in sea level, in: J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell (Eds.), *The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996, pp. 359–405.
- [12] P.L. Woodworth, S.M. Shaw, D.L. Blackman, Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline, *Geophys. J. Int.* 104 (1991) 593–609.
- [13] P.L. Woodworth, R. Player, The Permanent Service for Mean Sea Level: an update to the 21st century, *J. Coast. Res.* 19 (2003) 287–295.
- [14] G. Wöppelmann, P. Pirazzoli, Tide gauges, in: M.L. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Sciences*, Springer-Verlag, 2005, pp. 984–986.
- [15] G. Wöppelmann, N. Pouvreau, B. Simon, Brest sea-level record: a time series construction back to the early 18th century, *Ocean Dyn.*, in press.

8.2.2. Information complémentaire sur l'article.

La figure 8.23, reprend les amplitudes de l'onde de marée M_2 à Brest avec depuis la publication en 2006, trois nouvelles amplitudes annuelles en 1915, 2006 et 2007 (rectangle bleu sur la figure).

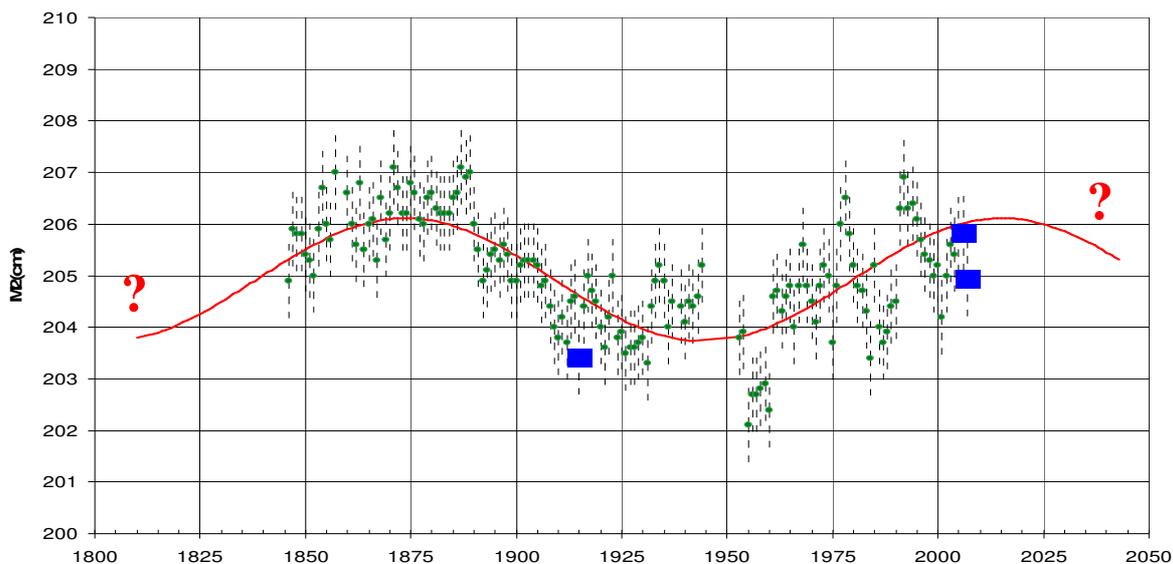


Fig. 8.23 – Evolution de l'amplitude de l'onde de marée M_2 à Brest (les carrés correspondent aux nouvelles amplitudes non disponibles lors de la rédaction de l'article pour les années 1915, 2006 et 2007). Les barres d'erreurs correspondent à $\pm 1\sigma$. La courbe sinusoidale provient de l'ajustement non linéaire des valeurs de Brest.

Dans la partie 5 de l'article relatif aux conclusions et perspectives, nous indiquions vouloir utiliser les observations de PM et de BM acquises entre 1711-1716 et 1807-1835. Malheureusement, le temps à manquer pour approfondir davantage la question que je ne manquerais pas de développer ultérieurement.

Conclusion

La connaissance des variations du niveau moyen de la mer représente une contribution importante à la compréhension du changement climatique. L'intérêt est mondial comme l'illustre le nombre de références dénombrés par le moteur de recherche Google pour les mots clefs suivants : 57 800 000 pages Internet pour "Change in sea level" et 1 350 000 références avec "variation du niveau de la mer". Si ce phénomène revêt une telle importance, c'est en raison de ses conséquences. D'ici 2080, l'élévation du niveau de la mer pourrait causer la perte de 22% des zones côtières humides actuelles (Nicholls *et al.*, 1999). Egalement, chaque année, entre 3 millions et 300 millions d'êtres humains seront confrontés aux inondations liées à ce phénomène (Nicholls et Lowe, 2006a ; Nicholls et Tol, 2006b).

L'expérience acquise pour le traitement et l'analyse des observations du niveau marin à Brest montre qu'il est indispensable, pour expliquer certains phénomènes, de connaître précisément les recommandations et les modes opératoires d'alors mais aussi l'évolution de l'environnement proche de l'observatoire. Par exemple, nombre d'études travaillant sur le changement climatique s'appuient sur la série du niveau de la mer d'Amsterdam, la plus ancienne et l'une des plus denses des 18^{ème} et 19^{ème} siècles. Cette série, digitalisée en 1945 par Van Veen (1945, 1954) pour étudier les effets de subsidence, puis reprise en 1954 pour appréhender les épisodes d'inondation, est aujourd'hui régulièrement utilisée pour illustrer la hausse relative du niveau de la mer (cf. par ex. : Woodworth, 1999b ; IPCC, 2001 ; etc). Or, nulle part dans les articles de Van Veen (1945, 1954), il n'est fait état de l'étude des méthodes ayant permis l'obtention des mesures ni l'estimation des incertitudes associées à ces observations.

Lorsque j'ai débuté ma thèse, les questions suivantes étaient jusqu'alors sans réponses :

- Quel est le patrimoine historique d'observations du niveau de la mer en France ?

Malgré les difficultés liées à la conservation des archives dans différents centres, le patrimoine mis à jour est considérable. L'observatoire de Paris, le Centre d'Accueil et de Recherche des Archives Nationales, le Service Historique de la Défense – Marine de Rochefort, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine sont les principaux organismes nationaux ayant des observations du niveau de la mer. Mais cette liste doit être également complétée par tous les centres locaux comme les archives départementales et les archives municipales qui renferment aussi de telles mesures. L'annexe A de la thèse compile l'ensemble des découvertes : observations en métropole comme ailleurs dans le monde depuis la fin du 17^{ème} siècle.

- Les mesures du niveau de la mer réalisées aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles sont-elles fiables ?

La première partie de la thèse (chapitres 2 à 5) montre l'évolution des méthodes d'observation du niveau marin en France de la fin du 17^{ème} siècle. M'appuyant sur les écrits de l'époque reproduits dans le texte, l'examen des extraits a permis d'apprécier la qualité des mesures en fonction des usages de l'époque ou de ceux choisis par les observateurs. Finalement, la qualité des données est intimement liée à la rigueur et au

sérieux de l'observateur. Malgré tout, les observations lues sur une échelle de marée, appareil utilisé au 18^{ème} et dans la première moitié du 19^{ème} siècle, sont entachées d'erreurs plus importantes que les mesures réalisées à l'aide d'un marégraphe, à l'intérieur d'un puits de tranquillisation.

- Comment rattacher en hauteur les observations réalisées à Brest entre 1711 et 1716 avec celles réalisées depuis 200 ans ?

Les mesures du niveau de la mer à Brest entre 1711 et 1716 sont connues des savants et des scientifiques depuis leur réalisation. Cassini II, Lalande et Laplace sont les principaux savants à les avoir utilisées. Plus récemment Cartwright (1972), sans avoir besoin de rattacher le zéro des mesures avec celles plus contemporaines, en a fait une exploitation. Pour tous ces chercheurs, le rattachement avec les mesures actuelles semblait impossible. Courtier (1934) pensait même que l'observatoire se trouvait quelque part au niveau du Rocher *la rose*. Or, l'étude des documents écrits, notamment sur les sites d'observation, montre que les mesures étaient réalisées aux abords des formes de radoub. A partir de cette hypothèse, des recherches sur le bassin de Brest (bassin Tourville aujourd'hui) ont été entreprises nous permettant de rattacher le zéro de l'échelle de marée utilisé entre 1711 et 1716 avec les mesures faites depuis 1846 à l'aide d'un marégraphe mécanique.

Les interrogations précédentes m'ont servi de fil conducteur, appelant au fur et à mesure de mes découvertes et de mes avancés d'autres questions :

- Quelle est la qualité des différents jeux de mesures à Brest ?

En fonction des outils utilisés pour observer le niveau de la mer (échelle de marée, marégraphe mécanique ou marégraphe numérique), la précision des mesures est plus ou moins importante. L'estimation de cette précision est quantifiée grâce aux calculs des RMS des résidus en hauteurs (cf. 7.3.4.2 et 7.3.4.3). Les observations réalisées grâce à l'échelle de marée s'avèrent bien entendu moins précises que celles obtenues à l'aide des marégraphes. L'ère des marégraphes montre trois facettes : Durant la première période, entre 1846 et 1944, un observateur des marées est assujéti à l'observatoire en ayant la charge du bon fonctionnement de l'appareil. La précision des mesures est de l'ordre de 2cm. La deuxième période de 1953 à 1992 montre une grande hétérogénéité dans la précision en fonction des services ayant eu la charge des appareils de mesures. En moyenne, la précision des mesures est alors de l'ordre de 5cm. La dernière période correspondant à celle des MCN atteint les meilleurs niveaux de précision de l'instrument (cf. 7.3.4.2).

- Comment a évolué le référentiel temporel au cours des quatre derniers siècles ?

Cette question s'est naturellement posée lors du contrôle de la qualité des mesures. En effet, pour chaque hauteur est associé le temps de la mesure. Or l'expression du temps n'a pas toujours été la même au cours des siècles passés. Grâce aux textes accompagnant les mesures il a été possible de réaliser l'inventaire des référentiels de temps adoptés en France et de les comparer avec ceux effectivement appliqués pour les mesures (cf. 7.2.4). Les TSV, TSM et TU ont été utilisés, abandonnés ou repris suivant les méthodes ou les besoins de l'époque (cf. 5.3.4.4).

- La correction de -17minutes appliquée entre 1711 et 1714 est-elle la bonne ?

L'origine de cette correction vient du mauvais réglage de la méridienne utilisée pour les mesures du temps (cf. 3.2.3 ; Cassini, 1714b). La comparaison des résidus en temps entre les observations corrigées et les prédictions pour la période 1711-1714 montre pourtant un écart périodique annuel d'environ ± 10 minutes (cf. 7.1, fig. 4 de l'article dans *Ocean Dynamics*) Comme la disposition de la Terre par rapport au Soleil est unique d'un jour à l'autre de l'année, la valeur de la correction l'est également. Après de nombreux tests, je suis parvenu à déterminer, grâce aux équations régissant les lois de la gnomonique, l'expression adéquate de la correction bien différente de la simple correction constante au cours du temps (cf. 7.1 et 7.2.3).

- Quels marégraphes ont été utilisés à Brest depuis 1846 ? Quelles sont les caractéristiques de ces appareils ?

Depuis 1846, plusieurs marégraphes ont mesuré le niveau de la mer à Brest. Etrangement, aucun inventaire n'existait jusqu'à présent sur les marégraphes utilisés. A partir de diverses sources, un premier référencement des appareils montre la succession des MCM (cf. tab. 6.8) et des MCN (cf. tab. 6.9). Malheureusement, entre 1952 et 2002, l'imprécision des dates d'utilisation des appareils, rendent difficile leur utilisation, notamment sur une éventuelle relation entre la précision des mesures et le type de marégraphe alors utilisé.

- Est-ce Laplace qui est à l'origine du zéro hydrographique à Brest ?

Le 1^{er} janvier 1996, le SHOM mettait fin à la singularité du zéro hydrographique de Brest. En effet, depuis 1816 ce zéro était à environ 50cm en dessous du niveau des plus basses mer. Pour Courtier (1934), ce choix de Beautemps-Beaupré était probablement guidé par le fait que le zéro de l'échelle avait été choisi par Laplace. Or mes travaux montre que cela ne correspond pas aux faits historiques que j'ai compilés et examinés. En effet, le choix de Beautemps-Beaupré a été de conserver un zéro utilisé depuis de nombreuses années dans le port, ne souhaitant pas modifier les usages d'alors. Il conserva donc comme zéro hydrographique la référence de la base du radier du bassin de Brest (cf. 7.2.5.4).

- Comment construire une série cohérente de niveau de la mer à partir de jeux de mesures de différentes natures ?

Outre les questions de référentiels (de temps et de hauteur), au cours des quatre derniers siècles les observations du niveau de la mer n'ont pas été identiques : PM et BM, PM et observations horaires. Une série cohérente requiert l'observation rigoureuse de la même grandeur. Les hauteurs horaires sont converties en PM et BM grâce à une méthode d'interpolation par spline cubique (cf. 7.2.2).

- Comment palier les lacunes d'observation du niveau de la mer pour les jeux de données acquis pour 1711-1716, 1757-1792, 1807-1811, 1810-1835 ?

Les hauteurs lues à l'échelle de marée le sont grâce à l'intervention humaine. Or, être environ toutes les 6h00 à proximité de l'échelle de marée notamment la nuit se révélait difficile pour de nombreuses raisons : autorisation d'entrer dans un port militaire de nuit, difficulté à lire les hauteurs sur l'échelle en pleine nuit, surtout les BM...etc Afin

de contourner les effets des lacunes d'observation de nuit, seules les hauteurs de jour des PM et BM sont utilisées (cf. 7.2.2, 8.1.2.2, 8.1.2.3).

- Comment s'affranchir du cycle nodal sur les MHW et MLW ?

Le cycle nodal (18,61ans) due à la révolution du nœud lunaire affecte les hauteurs des PM et des BM. Les prédictions des PM et des BM prennent en considération ce cycle. Ainsi pour s'affranchir des effets du cycle nodal sur les hauteurs des PM et des BM, il suffit de soustraire à chaque observation sa valeur prédite (cf. 1.4.3.4, 8.1.2.4). As-tu expliqué ceci ailleurs ? C'est une conclusion ! Sinon, rédiger avec un style de perspectives et idées à explorer...

Finalement, toutes les questions ci-dessus ayant trouvées des réponses, nous avons pu calculer de combien, le niveau moyen de la mer est monté à Brest depuis 300 ans. En nous appuyant sur les hauteurs des PM, nous avons trouvé $0,86 \pm 0,03 \text{ mm/an}$, $1,08 \pm 0,05 \text{ mm/an}$ avec les MTL et $0,95 \pm 0,04 \text{ mm/an}$ avec les BM entre 1711 et 2007. L'accélération est quant à elle de l'ordre de $0,0020 \text{ mm/an}^2$. Les tendances et accélérations trouvées pour Brest, lorsqu'on les compare à d'autres longues séries du niveau de la mer existantes (Liverpool, Stockholm, Amsterdam) sont cohérentes aux erreurs formelles près. La richesse de la série de Brest vient autant de sa longueur exceptionnelle : 300 années que de son recouvrement : 225 années. Avant que je ne débute travail, les données numériques disponibles pour la période des PM et des BM s'étalant entre 1711 et 2007 (respectivement pour la période des observations horaires compris entre 1846 et 2007) représentaient 45,35% (respect. 83,18%). Aujourd'hui, la série est complétée à hauteur de 64,80% (respectivement 92,48%) !

La fin d'une thèse donne souvent lieu à un foisonnement d'interrogations qui n'ont pas eu le temps de trouver des réponses. Voici celles qui restent aujourd'hui en suspens et qui n'appellent qu'à être examinées et étudiées :

- Existe-il d'autres observations inédites du niveau de la mer réalisées à Brest ?
- Comment corriger les mesures horaires du niveau de la mer des années 1950-1980 sans (ou peu de) métadonnées les accompagnants ? Faudra-t-il dans l'avenir, que chaque série du niveau de la mer soit accompagnée d'une fiche explicative exhaustive sur différents paramètres à définir ?
- Les observations de MHW, MLW et MTL réalisées à Amsterdam entre les 18^{ème} et 20^{ème} siècles peuvent-elles servir de série de références pour contrôler (par la méthode des concordances) les rattachements des échelles de marée utilisées pour les observations au 18^{ème} siècle avec le zéro hydrographique défini en 1816 par Beautemps-Beaupré ?
- L'éventuel phénomène cyclique constaté avec l'évolution d'amplitude de l'onde M_2 sera-t-il confirmé avec l'utilisation des MHW et MLW ? Si le phénomène est vérifié, quelle est la physique qui se cache derrière ? Est-ce que cette évolution est visible sur d'autres séries marégraphiques ? Si oui, la période et l'amplitude seront-elles identiques à ceux trouvées à Brest ?

- L'utilisation de notre méthode de pondération pour le calcul des tendances et accélération du niveau de la mer est-elle reproductible ailleurs ? les valeurs obtenues seront-elles cohérentes entre plusieurs sites ? Quelles sont les tendances du niveau de la mer prises mois par mois ?
- Est-ce que l'utilisation des résidus de PM diurnes peut devenir un standard pour l'analyse des longues séries du niveau de la mer ? Les séries de Liverpool, de Stockholm, d'Amsterdam sont-elles affectées par les mêmes types de problèmes que ceux rencontrés Brest ? Si oui, ont-ils été pris en compte ?
- Les mesures du niveau de la mer à Brest sont-elles affectées par le NAO ? Quels peuvent être les effets de l'application du baromètre inverse sur les hauteurs du NMM à Brest ? Que faire des observations météorologiques accompagnant les mesures du niveau de la mer ? Quels sont les impacts sur l'étude des tendances et accélération du niveau de la mer ?
- Les niveaux extrêmes sont-ils plus ou moins nombreux aujourd'hui qu'il y a 300 ans ? Les surcotes et les décotes sont-elles plus importantes de nos jours ? Si oui de combien ?

Annexes

Annexe A : Inventaire des observations du niveau de la mer depuis la fin du 17^{ème} siècle se trouvant en France.

A.1. Introduction.

Devant la richesse des archives françaises, un inventaire — le plus exhaustif possible —, des hauteurs du niveau de la mer a été réalisé à l'issue de la phase de recherche et d'identification des observations du niveau de la mer. Les données les plus anciennes sont celles réalisées à Brest en 1679 et les observations les plus récentes sont des marégrammes compris dans la période transitoire des marégraphes mécaniques vers les – marégraphes acoustiques (au début des années 1990). Les observatoires se trouvent aussi bien en France qu'à l'étranger, principalement dans les pays ayant eu des liens étroits avec l'hexagone. La totalité des mesures sont localisées dans des centres d'archivages français.

Cette annexe se décompose en deux parties :

- la première partie résume pour chaque port le nombre de jeux de mesures, la durée totale des observations, le nombre d'années effectives ainsi que deux années : la plus ancienne et la plus récente bornant la période d'observation entière.

- le second volet présente dans le détail, site par site, pour chaque jeu de mesures le type de support sur lesquelles se trouvent les données, les caractéristiques des observations, des informations diverses et la localisation précise des mesures (lieu de conservation et cote du document).

De nombreux centres d'archivages français furent explorés. Voici ci-dessous la liste de ces centres avec entre crochets, leur abréviation, utilisée dans les tableaux A.3 à A15 :

- Archives de l'Institut Géographique Nationale, service géodésie [IGN] ;
- Archives de l'Académie des Sciences [AAS] ;
- Archives de la Bibliothèque de Marseille [AB Marseille] ;
- Archives de la Médiathèque de La Rochelle [AMd La Rochelle] ;
- Archives départementales des Bouches-du-Rhône [AD13] ;
- Archives départementales de Charente-Maritime [AD17] ;
- Archives départementales du Finistère [AD29] ;
- Archives départementales de Gironde [AD33] ;
- Archives départementales de l'Hérault [AD34] ;
- Archives départementales d'Ille-et-Vilaine [AD35] ;
- Archives du Bureau des Longitudes [ABL] ;
- Archives municipales de Brest [AM Brest] ;
- Archives municipales de La Rochelle [AM La Rochelle] ;
- Archives municipales de Rochefort [AM Rochefort] ;
- Archives municipales de Toulon [AM Toulon] ;
- Bibliothèque de l'Institut de France [BIF] ;

- Bibliothèque nationale de France [BNF] ;
- Bibliothèque du Muséum d'Histoire Naturelle de La Rochelle [BMHN La Rochelle] ;
- Bibliothèque de l'Observatoire de Paris [O Paris] ;
- Bibliothèque de l'Observatoire de Marseille [O Marseille] ;
- Bibliothèque de l'école Nationale des Ponts et Chaussés [ENPC] ;
- Centre d'Accueil et de Recherche des Archives Nationales de Paris [AN] ;
- Centre des Archives du Monde du Travail [CAMT]
- Direction Départementale de l'Équipement – Unité Littorale de Charente-Maritime [DDE-L CM] ;
- Direction Départementale de l'Équipement – Unité Littorale du Finistère [DDE-L F] ;
- Service Historique de la Défense – département de la Marine au Château de Vincennes [SHD V] ;
- Service Historique de la Défense – département de la Marine à Brest [SHD B] ;
- Service Historique de la Défense – département de la Marine à Rochefort [SHD R] ;
- Service Historique de la Défense – département de la Marine à Toulon [SHD T] ;
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine [SHOM] ;
- Service Historique de l'Armée de Terre au Château de Vincennes [SHD –AT Vincennes] ;

Seules les archives du CAMT et de l'IGN n'ont pas été directement dépouillées sur site. Pour ces derniers, des inventaires réalisés et fournis par M. Bonnetain (IGN, communication personnelle) ont permis d'étoffer les inventaires suivants. Le rapport réalisé par Simon (1985) n'a pas été pris en compte ici car les mesures rassemblées dans cette étude datent pour la plupart de la fin du 20^{ème} siècle. Il s'agit d'observations déjà numérisées disponibles au SHOM.

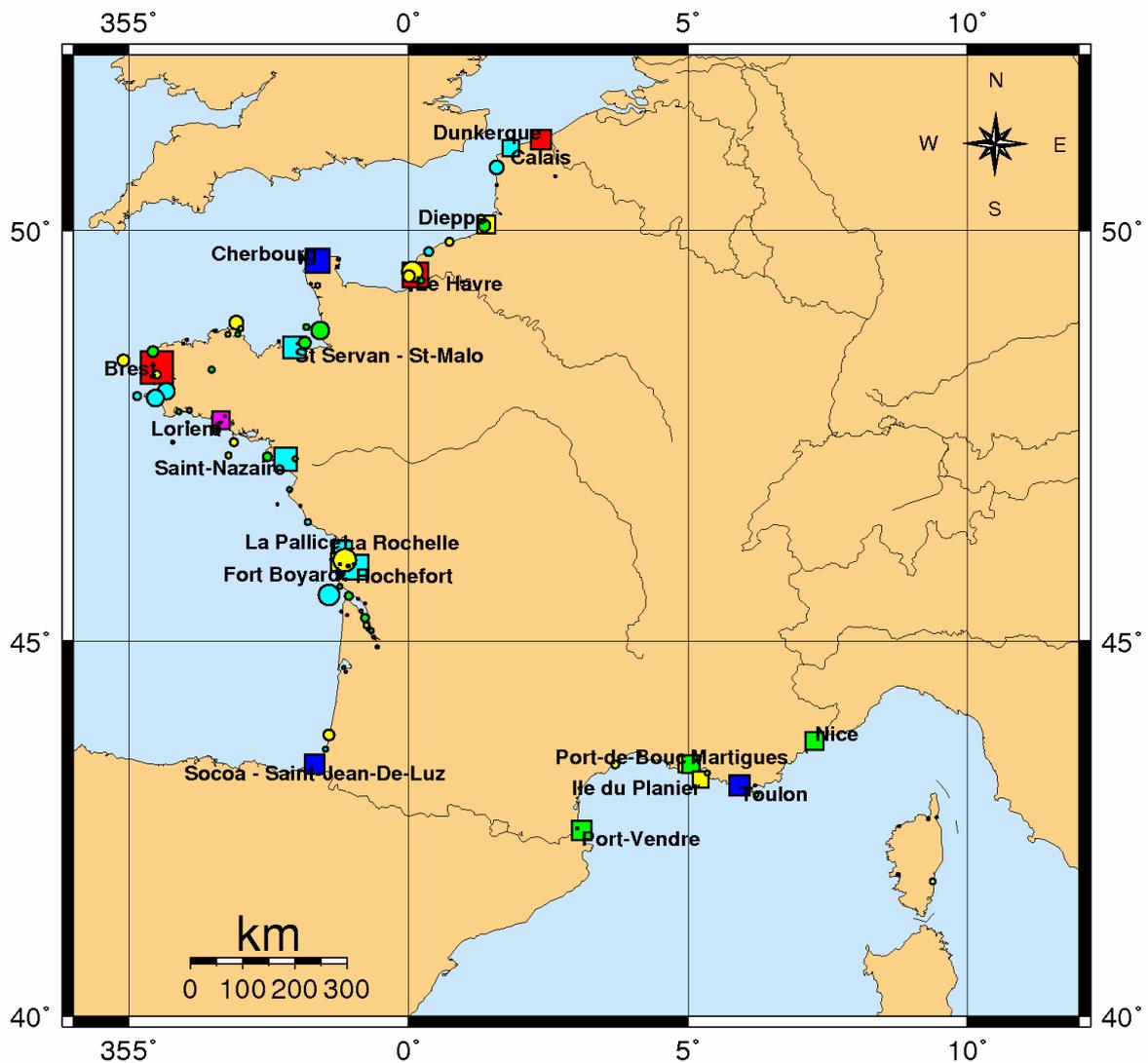
A.2. Synthèse des données.

Cet inventaire synthétique se présente sous deux volets : un premier ensemble avec les mesures du niveau de la mer réalisées en France métropolitaine puis une seconde partie avec les observations accomplies dans le reste du monde.

Pour chaque partie, une carte géographique et un tableau permettent de visualiser au mieux l'ensemble des informations recueillies.

A.2.1. Pour la France métropolitaine.

L'ensemble des mers et océan bordant la France ont fait l'objet de mesures de leur hauteur le long du littoral. La totalité de ces observatoires mesurant ce niveau de la mer le long des côtes en France métropolitaine se trouve sur la figure suivante. Chaque site est identifiable sur la carte grâce à deux critères : la couleur qui indique la durée totale des observations et la taille des symboles qui est proportionnel au nombre d'années effectives. Lorsque le symbole est un cercle, la période effective est inférieure ou égale à 15 ans. Pour un carré la période effective est supérieure à 15 ans. La légende de la carte donne l'équivalent de la table des couleurs en nombre d'années ainsi que certaines tailles de cercles et carrés pour les durées. Seul les sites ayant une période couverte supérieure à 15 ans (symbole carré) sont directement nommés sur la carte.



Localisation des mesures historiques du niveau de la mer					
◆ 000-050	◆ 051-100	◆ 101-150	◆ 151-200	◆ 201-250	◆ sup. à 250
<i>Couleurs déterminant la durée totale des observations (en années)</i>					
○ 03ans	○ 06ans	○ 09ans	○ 12ans	○ 15ans	
<i>Taille des cercles proportionnelle au nombre d'années effectives (jusqu'à 15ans)</i>					
□ 025ans	□ 075ans	□ 125ans	□ 175ans	□ 225ans	
<i>Taille des carrés proportionnelle au nombre d'années effectives (supérieur à 15ans)</i>					

Fig. A.1. – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine.

Le tableau ci-dessous rassemble toutes les informations présentes sur la carte précédente avec en plus :

- Le numéro de la station GLOSS pour les ports en faisant partis ;
- L'année d'observation la plus ancienne ;
- L'année la plus récente ;
- Le nombre de jeux de mesures ;

- Le nombre de missions d'observations réalisées entre les deux dates ;
- La date d'installation du premier MCN, pour les ports appartenant au réseau RONIM.

Cet inventaire ne concerne ici que des registres, ou/et des marégrammes antérieurs à l'ère des marégraphes numériques, soit 1992 avec le premier MCN installé au Conquet.

Site d'observation	Année Initiale	Année Finale	durée totale (ans)	Nombre d'années effectives	Nombre de jeux de mesures	Date d'installation du 1 ^{er} MCN
Dunkerque	1701	1985	285	52	13	09/1996
Merville	1834	1834	1	1	1	
Calais	1836	1940	105	22	4	10/1998
Boulogne-Sur-mer	1835	1936	102	9	11	12/2000
Le touquet	1878	1878	1	1	1	
Dieppe	1834	1876	43	37	7	
Le Tréport	1839	1896	58	8	1	
Pointe du Hoc	1869	1869	1	1	1	
Saint-Valery-en-Caux	1837	1878	42	5	1	
Fecamp	1841	1950	110	6	4	
Cap de la Heve	1856	1869	14	14	1	
Le Havre	1701	1982	282	101	11	08/1993
Octeville	1913	1913	1	1	1	
Quillebeuf	1852	1860	9	8	1	
Honfleur	1869	1960	92	4	4	
Arromanches	1949	1951	3	3	2	
Barfleur	1876	1933	58	2	2	
Saint Vaast la Hougue	1949	1951	3	2	2	
Cherbourg	1789	1979	191	97	20	03/1994
Jobourg	1921	1922	2	2	1	
Les Huquets de Jobourg	1952	1952	1	1	1	
Goury	1921	1922	2	2	1	
Barneville-Carteret	1902	1902	1	1	2	
Ile Chausey	1831	1924	94	4	2	
Granville	1829	1922	94	12	5	
Cancale	1835	1924	90	8	2	
Rochebonne	1960	1960	1	1	1	
St Servan - St-Malo	1829	1950	122	78	10	05/2004
Cap Fréhel (35)	1925	1925	1	1	1	
Lanros (22)	1902	1902	1	1	1	
Paimpol	1835	1902	68	3	2	
Heaux de Brehat	1889	1932	44	9	2	
Abords de Brehat	1930	1935	6	3	3	
Perros-guirec	1955	1956	2	2	1	
Tréguier	1954	1956	3	3	1	
Morlaix	1837	1931	95	4	2	
Roscoff	1954	1954	1	1	2	06/2004
Aberwrach	1835	1932	98	7	4	
Ouessant	1816	1840	25	8	4	
Sein	1816	1935	120	5	5	

Site d'observation	Année Initiale	Année Finale	durée totale (ans)	Nombre d'années effectives	Nombre de jeux de mesures	Date d'installation du 1 ^{er} MCN
Molène	1818	1818	1	1	1	
<i>Le conquet</i>	?	?	?	?	1	11/1992
<i>Brest n°GLOSS : 242</i>	<i>1679</i>	<i>1993</i>	<i>314</i>	<i>175</i>	<i>16</i>	<i>02/1993</i>
Roscanvel	1948	1948	1	1	1	
Camaret-sur-Mer	1816	1816	1	1	1	
Douarnenez	1817	1954	138	11	5	
Audierne	1835	1960	126	11	4	
Ile Longue	1954	1967	14	5	2	
Penmarch	1902	1904	3	2	3	
Ile Tudy	1835	1840	6	6	1	
Benodet	1819	1903	85	3	2	
<i>Concarneau</i>	<i>1819</i>	<i>1905</i>	<i>87</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>07/1999</i>
Hennebont	1902	1902	1	1	1	
Penfret	1903	1903	1	1	1	
Lorient	1716	1951	236	36	15	
Port-Louis	1819	1819	1	1	1	
Groix	1938	1939	2	2	2	
Quiberon	1923	1927	5	5	2	
Belle-ile-en-mer	1908	1939	32	4	3	
Port Joinville	1967	1967	1	1	1	
Le Croisic	1906	1967	62	6	3	
Paimboeuf	1835	1893	59	3	1	
<i>Saint-Nazaire</i>	<i>1867</i>	<i>1977</i>	<i>111</i>	<i>82</i>	<i>6</i>	<i>01/2007</i>
Fromentine	1866	1956	91	3	2	
Saint Gilles Croix de Vie	1967	1967	1	1	1	
<i>Les sables d'Olonne</i>	<i>1824</i>	<i>1967</i>	<i>144</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>06/1999</i>
<i>La Pallice</i>	<i>1865</i>	<i>1976</i>	<i>112</i>	<i>33</i>	<i>6</i>	<i>04/1997</i>
La Rochelle	1775	1893	118	35	5	
Ile d'Aix	1824	1964	141	3	3	
Fort Enet	1859	1873	15	15	3	
Fort Boyard	1873	1909	37	37	3	
Rochefort	1811	1918	108	107	4	
Port des Barques	1859	1860	2	2	1	
Vergeroux	1824	1824	1	1	1	
Pointe du Chapus	1878	1878	1	1	1	
La Cayenne	1878	1878	1	1	1	
La Coubre	1874	1924	51	3	3	
Saint Denis d'Oléron	1882	1882	1	1	1	
La Perrotine	1882	1882	1	1	1	
Château d'Oléron	1878	1882	5	2	2	
La Perroche	1882	1882	1	1	1	
Au Brie Maumusson	1813	1813	1	1	1	
Royan	1812	1812	1	1	9	
Talmont	1878	1878	1	1	2	
Mortagne	1868	1868	1	1	3	
Port de Beychevelle	1892	1892	1	1	1	

Site d'observation	Année Initiale	Année Finale	durée totale (ans)	Nombre d'années effectives	Nombre de jeux de mesures	Date d'installation du 1 ^{er} MCN
Blaye	1825	1892	68	3	3	
La Grave	1874	1892	19	2	2	
Bordeaux	1825	1874	50	2	2	
Bec d'Ambez	1813	1825	13	2	2	
Pauillac	1867	1892	26	4	4	
Port de la Maréchale	1812	1892	81	5	5	
Port de By	1874	1892	19	2	2	
<i>Pointe de Grave</i>	<i>1868</i>	<i>1961</i>	<i>94</i>	<i>5</i>	<i>2</i>	<i>04/2000</i>
<i>Port Bloc - le Verdon</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>1</i>	<i>04/2000</i>
Cordouan	1812	1924	113	14	10	
<i>Arcachon - Eyrac</i>	<i>1892</i>	<i>1967</i>	<i>76</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>06/2000</i>
Le Pilat-Plage	1964	1964	1	1	1	
Boucau - Bayonne	1899	1919	21	7	2	
<i>Saint-Jean-De-Luz</i>	<i>1826</i>	<i>1979</i>	<i>154</i>	<i>26</i>	<i>3</i>	<i>05/2004</i>
<i>Socoa - Saint-Jean-De-Luz</i>	<i>1875</i>	<i>1967</i>	<i>93</i>	<i>47</i>	<i>4</i>	<i>05/2004</i>
<i>Bayonne</i>	<i>1826</i>	<i>1963</i>	<i>138</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>06/1999</i>
Banyuls-Sur-Mer	1963	1963	1	1	1	
Port-Vendres	1895	1975	81	49	4	
Sete	1975	1979	5	5	1	
Le Grau du Roi	1961	1961	1	1	1	
Port-de-Bouc	1956	1975	20	20	1	
Martigues	1895	1983	89	30	3	
Etang de Berre	1966	1966	1	1	1	
Ile du Planier	1964	1980	17	17	1	
<i>Marseille n°GLOSS : 205</i>	<i>1849</i>	<i>1851</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>06/1998</i>
<i>Toulon</i>	<i>1777</i>	<i>1975</i>	<i>199</i>	<i>55</i>	<i>6</i>	<i>03/1998</i>
Port Pothuau	1954	1954	1	1	1	
Porquerolles	1896	1898	3	3	1	
Villefranche-sur-Mer	?	?	?	?	1	
<i>Nice</i>	<i>1896</i>	<i>1990</i>	<i>95</i>	<i>39</i>	<i>2</i>	<i>03/1998</i>
Porto-Vecchio	1884	1890	7	4	2	
Bastia	1957	1957	1	1	1	
Saint-Florent	1888	1891	4	2	2	
Calvi	1977	1977	1	1	1	
<i>Ajaccio</i>	<i>1821</i>	<i>1978</i>	<i>158</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>06/2000</i>

Tab. A.1. - Inventaire des observations du niveau de la mer en France métropolitaine.

Les ports notés en gras et en italique correspondent aux marégraphes du réseau RONIM. Sur les 22 marégraphes de RONIM installés sur les côtes métropolitaines, seul le port du Crouesty (56) ne présente pas d'observations "anciennes". Les noms des stations soulignés font tant qu'à elles parties du réseau GLOSS. En France métropolitaine, seul deux sites appartiennent au réseau GLOSS : Brest et Marseille.

A.2.2. Pour les autres pays.

La France métropolitaine n'est pas l'unique pays où des observations du niveau de la mer furent réalisées par les hydrographes français. A travers le monde mais principalement dans les anciennes colonies françaises se trouvent de nombreux sites de mesures. Sur la carte suivante se retrouve les mêmes informations que la figure A.1. Attention néanmoins : les différentes couleurs représentent d'autres ensembles de périodes effectives et les tailles de cercles sont proportionnelles à d'autres périodes couvertes. La légende de la carte le précise.

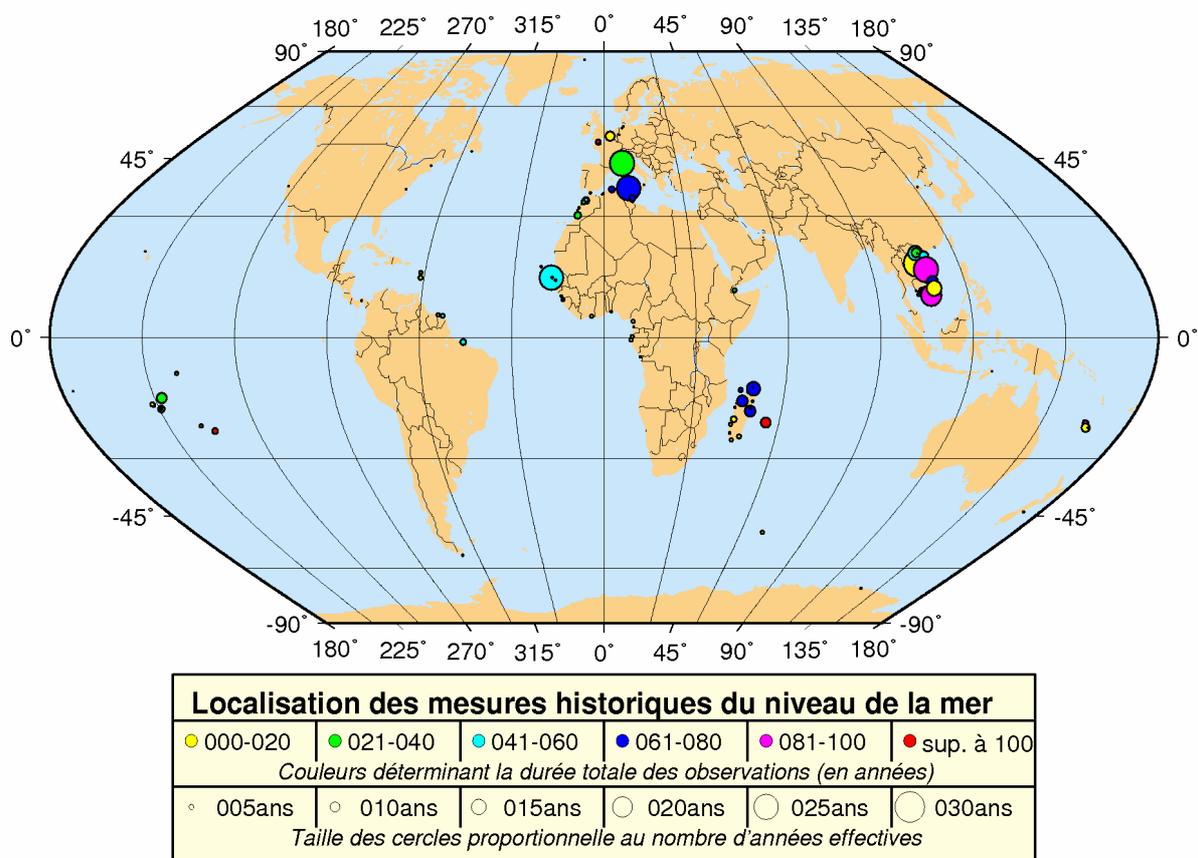


Fig. A.2. – Localisation des observations du niveau de la mer dans le monde or France métropolitaine.

Chaque station indiquée sur la carte A.2 se retrouve dans le tableau suivant. Il est semblable au tableau A.1 à deux éléments près :

- Les sites sont classés par secteurs géographiques avec dans l'ordre l'Europe, l'Afrique, l'Asie, les îles du Pacifique, l'Amérique du Sud, l'Amérique du Nord et les Terres Australes et Antarctiques Françaises ;
- La dernière colonne n'indique plus la date d'installation du MCN appartenant au réseau RONIM mais le cas échéant, le numéro de la station GLOSS.

Site d'observation	Année Initiale	Année Finale	Durée totale (ans)	Nombre d'années effectives	Nombre de jeux de mesures	N° station GLOSS
Continent européen						
Jersey (île anglo-normande)	1832	1950	119	3	2	
Guernsey (île anglo-normande)	1832	1950	119	5	3	
Les Minquiers (île anglo-normande)	1888	1888	1	1	1	
Anvers (Belgique)	1799	1803	5	2	2	
Ostende (Belgique)	1800	1804	5	5	5	
Nieuwpoort (Belgique)	1801	1808	8	9	3	
Estuaire Elbe (Allemagne)	1811	1811	1	1	3	
Escaut occidental (Pays-Bas)	1811	1811	1	1	2	
Flessingue (Pays-Bas)	1799	1808	10	5	7	
Cuxhaven (Allemagne)	1812	1812	1	1	2	284
Spitzberg (Norvège)	1892	1892	1	1	1	
Gibraltar (Royaume-Uni)	1854	1855	2	2	1	248
Monaco (monaco)	1956	1980	25	25	1	
Messina (Italie)	1858	1858	1	1	1	
Continent africain						
Arzew (Algérie)	1958	1958	1	1	1	
Oran (Algérie)	1931	1931	1	1	1	
Alger (Algérie)	1843	1921	79	6	3	
Bejaia [Bougie] (Algérie)	1958	1958	1	1	1	
Bizerte (Tunisie)	1890	1955	66	24	2	
Gabes (Tunisie)	1885	1885	1	1	1	
Sfax (Tunisie)	1884	1949	66	6	4	
Canal d'Adjim (Tunisie)	1933	1933	1	1	1	
Kenitra (Maroc)	?	?	?	?	?	
Rabat (Maroc)	1913	1939	27	7	2	
Mehdia (Maroc)	1913	1954	42	4	5	
Pont Blondin (Maroc)	1954	1954	1	1	1	
Casablanca (Maroc)	1920	1954	35	4	5	
El Jadida [Mazagan] (Maroc)	1952	1952	1	1	2	
Safi (Maroc)	1950	1954	5	2	3	
Essaouira [Mogador] (Maroc)	1920	1920	1	1	2	
Agadir (Maroc)	1920	1956	37	7	8	
Baie du Levrier (Mauritanie)	1905	1906	2	2	1	
Mbour (Sénégal)	1948	1948	1	1	1	
Dakar (Sénégal)	1889	1937	49	24	4	253
Rufisque (Sénégal)	1930	1931	2	2	1	
Kaolack (Sénégal)	1930	1931	2	2	1	
Boffa (Guinée)	1942	1943	2	2	1	
Conakry (Guinée)	1900	1950	51	3	4	255
Dureka (Guinée)	1942	1943	2	2	1	
Vridi [Abidjan] (Côte d'Ivoire)	1951	1953	3	3	3	257
Cotonou (Benin)	1951	1952	2	2	1	
Libreville (Gabon)	1949	1963	15	3	2	

Site d'observation	Année Initiale	Année Finale	Durée totale (ans)	Nombre d'années effectives	Nombre de jeux de mesures	N° station GLOSS
Sangatanga (Gabon)	1963	1963	1	1	1	
Cap-Lopez (Gabon)	1910	1912	3	3	1	
Douala (Cameroun)	1938	1955	18	3	3	
Kribi (Cameroun)	1915	1915	1	1	1	
Pointe-Noire (République du Congo)	1911	1918	8	2	2	261
Djibouti (Djibouti)	1897	1928	32	4	4	002
Antongil (Madagascar)	1936	1937	2	2	1	
Tamatave (Madagascar)	1900	1962	63	11	4	
Nosy-bé (Madagascar)	1900	1908	9	4	3	015
Fort-Dauphin (Madagascar)	1936	1952	17	4	2	271
Soalara (Madagascar)	1948	1949	2	2	1	
Tulear (Madagascar)	1951	1952	2	2	1	
Morombé (Madagascar)	1960	1962	3	3	1	
Milamatsaha (Madagascar)	1899	1899	1	1	1	
Majunga (Madagascar)	1900	1962	63	11	9	
Diego-Suarez (Madagascar)	1888	1962	75	13	7	
Beravina (Madagascar)	1901	1903	3	2	2	
Morondava (Madagascar)	1948	1955	8	6	3	
Mosoala (Madagascar)	1960	1962	3	3	1	
Baie du Courrier (Madagascar)	1907	1907	1	1	1	
Foulpointe (Madagascar)	1948	1949	2	2	1	
Fénérive (Madagascar)	1951	1952	2	2	1	
La Réunion	1840	1948	109	10	2	
Mayotte	1900	1963	64	4	3	
Contient asiatique						
Kompong (Cambodge)	1937	1939	3	3	1	
Phnom Penh (Cambodge)	1860	1868	9	5	1	
Ilot Cone (Cambodge)	1930	1930	1	1	1	
Ream (cambodge)	1927	1951	25	3	2	
Ha tien (Vietnam)	1868	1905	38	3	2	
Vinh (Vietnam)	1936	1937	2	2	1	
Can Tho (Vietnam)	1869	1869	1	1	1	
Cua-Hoi (Vietnam)	1926	1944	19	19	2	
Province du Than Hoa (Vietnam)	1930	1930	1	1	1	
My Tho (Vietnam)	1862	1866	5	2	1	
Ho Chi Minh [Saigon] (Vietnam)	1861	1925	65	13	3	
Bien Hoa (Vietnam)	1861	1862	2	2	1	
Can Gio (Vietnam)	1861	1898	38	9	3	
Poulo Condore (Vietnam)	1862	1923	62	5	2	
Hon Dau (Vietnam)	1931	1937	7	7	1	
Haiphong (Vietnam)	1874	1929	56	14	3	
Cua Cam (Vietnam)	1873	1874	2	2	1	

Site d'observation	Année Initiale	Année Finale	Durée totale (ans)	Nombre d'années effectives	Nombre de jeux de mesures	N° station GLOSS
Vung Tau [cap-Saint-Jacques] (Vietnam)	1862	1950	89	21	7	
Hong Gai (Vietnam)	1903	1937	35	9	2	
Cam Ranh (Vietnam)	1906	1950	45	9	6	
Fai Tsi Long (Vietnam)	1930	1930	1	1	1	
Annam (Vietnam)	1935	1936	2	2	1	
Tourane (Vietnam)	1858	1944	87	25	5	
Phan Rang (Vietnam)	1930	1930	1	1	1	
Nha Trang (Vietnam)	1898	1913	16	5	2	
QuiNhon (Vietnam)	1879	1938	60	12	3	075
Cau-Da (Vietnam)	1930	1944	15	15	1	
Pakoi (Chine)	1901	1901	1	1	1	
Yen-t'Ai [Tche-Fou] (Chine)	1860	1860	1	1	1	
Salara (Timor-Oriental)	1903	1903	1	1	1	
Iles du Pacifique						
Akaroa (Nouvelle-Zélande)	1843	1844	2	2	2	
Iles Gambier (Polynésie Française)	1856	1968	113	6	3	
Mururoa (Polynésie Française)	1962	1968	7	3	2	
Iles Marquises (Polynésie Française)	1956	1958	3	3	1	
Tuamotu (Polynésie Française)	1949	1968	20	10	5	
Tahiti (Polynésie Française)	1936	1968	33	7	4	
Papeete (Polynésie Française)	1911	1936	26	3	2	140
Moorea (Polynésie Française)	1956	1957	2	2	1	
Raiatea (Polynésie Française)	1956	1969	14	3	2	
Tahaa (Polynésie Française)	1956	1957	2	2	1	
Bora-Bora (Polynésie Française)	1956	1967	12	4	2	
Paagoumene (Nouvelle Calédonie)	1936	1936	1	1	1	
? (Nouvelle Calédonie)	1872	1965	94	6	3	
Thio (Nouvelle Calédonie)	1906	1907	2	2	1	
Nouméa (Nouvelle Calédonie)	1930	1937	8	8	2	
Goro (Polynésie Française)	1938	1938	1	1	1	
Ile Wallis (Territoire Wallis et Futuna)	1936	1936	1	1	1	
Honolulu (Hawaii, USA)	1851	1851	1	1	1	108
Continent américain						
Naos (Panama)	1882	1882	1	1	1	
Cap Horn (Chili)	1882	1883	2	2	1	
Ile du Salut (Guyane)	1896	1937	42	4	3	
Cayenne (Guyane)	1880	1937	58	6	3	
Saint-Laurent-Du-Maroni (Guyane)	1935	1937	3	3	2	

Site d'observation	Année Initiale	Année Finale	Durée totale (ans)	Nombre d'années effectives	Nombre de jeux de mesures	N° station GLOSS
? (Guadeloupe)	1867	1869	3	3	1	
<i>Fort de France (Martinique)</i>	<i>1912</i>	<i>1939</i>	<i>28</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	
Saint-Pierre (Martinique)	1939	1942	4	4	1	
Colon (Panama)	1882	1882	1	1	1	
Old-Point-Comfort (USA)	1853	1853	1	1	1	
Fort Constitution (USA)	1853	1853	1	1	1	
<u>San-Fransisco</u> (USA)	1853	1853	1	1	1	158
Port Saint-Pierre (Saint-Pierre et Miquelon)	1940	1940	1	1	1	
Terres Australes et Antarctiques Françaises						
<u>Kerguelen</u>	1949	1956	8	3	2	023
Pointe géologie (Terre Adélie)	1957	1957	1	1	1	
Terre Adélie	1961	1962	2	2	1	

Tab. A.2. - Inventaire des observations du niveau de la mer dans le monde or France métropolitaine.

Les ports marqués en gras et en italique correspondent aux marégraphes du réseau RONIM actuellement en fonctionnement. Sur les 5 marégraphes de RONIM installés hors des cotes de la métropole, seul le port de Pointe-à-Pitre et l'île royale ne présentent pas d'observations "anciennes". Les noms des sites soulignés forment une partie du réseau GLOSS. Les observations faites aux Terres Australes et Antarctiques Françaises peuvent tant qu'à elles être mise en relation avec le réseau ROSAME.

A.3. Recensement exhaustif des hauteurs d'eau.

Cet inventaire complète les informations données dans l'annexe A-1. Pour chaque site est indiqué pour chacun des jeux de mesures, la période d'observations, le type de support (registre, marégramme, support inconnu), des informations diverses et pour finir, la localisation et la cote du document. Comme précédemment, l'inventaire est scindé en deux : Le premier volet traite des sites se trouvant en France métropolitaine et la seconde partie, des ports pour le reste du monde.

A.3.1. Pour la France métropolitaine.

Les informations étant nombreuses, la France métropolitaine est divisé en trois pôles : mer du Nord et La Manche, océan Atlantique et la mer Méditerranée. A chaque zone, une carte avec les différents observatoires est associée à un tableau récapitulant les informations expliquées précédemment.

1) France métropolitaine : Mer du Nord et la Manche

Ce premier point rassemble tous les observatoires positionnés le long de la mer du Nord et de la Manche. Six observatoires ressortent sur cette façade : Dunkerque, Calais, Dieppe, Le Havre, Cherbourg et Saint-Servan – Saint-Malo (Fig. A.3). Au Havre, de nombreux dragages et approfondissement de l'estuaire de la Seine ont eu lieu depuis 1700. L'étude de cette série semble donc plus compliquée que pour les autres.

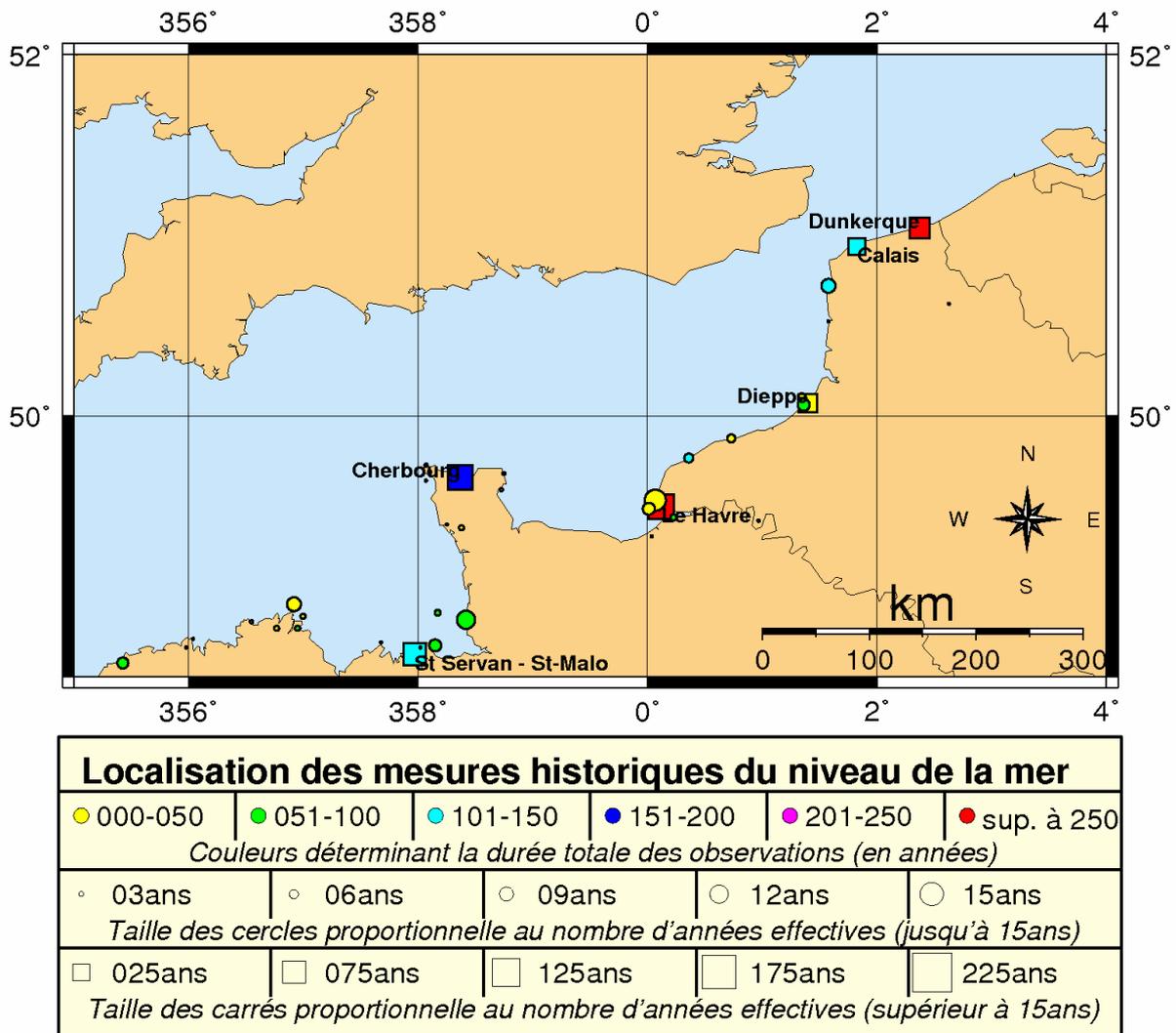


Fig. A.3. – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine le long de la mer du Nord et de la Manche (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 25 années de données).

L'ensemble des informations pour les jeux de mesures de cette région est rassemblé dans le tableau A.3 :

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	SI R : détails sur les mesures		
Bancs des Flandres (59)	1932-1933			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3354 SHOM - 7JJ3355
	1954			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 387
Dunkerque (59)	1701-1702			heures et hauteurs PM	infos météorologiques	O Paris - B5.9
	1802			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0023
	1835			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0654bis SHD R - 7JJ0666 SHD R - 7JJ0667 SHD R - 7JJ0668 SHD R - 7JJ0669
	1865-1875			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1879			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1476
	1900-1901	x				SHOM
	1910			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2492bis
	1911			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2555
	1946			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 005
	1946			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 099
	1947			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 010
	1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 754
	1957-1985			hauteurs horaires	Propriétaire : Port Autonome	IGN - Caisse1345
Merville (59)	1834		x			SHOM
Calais (62)	1836		x			SHOM
	1911			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2555
	1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 387
	1932-1940			?	Marégraphe ou Médimarémètre ?	IGN - Caisse1348
Boulogne-Sur-mer (62)	1835			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0647 SHD R - 7JJ0648 SHD R - 7JJ0649 SHD R - 7JJ0650 SHD R - 7JJ0651 SHD R - 7JJ0652 SHD R - 7JJ0653
	1835		x			SHOM
	1855			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0985
	1876			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1409
	1909			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2450
	1911			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2555
	1930			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3219
	1934			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3512
	1935	x		hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3545
	1935			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3553
	1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3790 SHOM - 7JJ3801 SHOM - 7JJ3802 SHOM - 7JJ3803 SHOM - 7JJ3803bis
Le touquet (62)	1878			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1453

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
Dieppe (76)	1834 1838-1839 1852 1875 1878 1880-1882			heures et hauteurs des PM		SHOM
	1878			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ1450 SHD - R 7JJ1451
	1937	x				SHOM
	1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3946
	1950-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 353
	1958-1978			Planimétrie (1/40ème)	Marégraphe BRILLIE	IGN - Caisse1345
	1975-1976			?	?	IGN - Caisse1345 IGN - Caisse1348
Le Tréport (76)	1839, 1878 1882-1884 1889-1890 1896			heures et hauteurs des PM		SHOM
Pointe du Hoc (76)	1869		x			SHOM
Saint-Valery-en-Caux (76)	1837-1839 1871 1878			heures et hauteurs des PM		SHOM
Fecamp (76)	1841-1850		x			SHOM
	1834		x			SHOM
	1908			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2416
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 111
Cap de la Heve (76)	1856-1869		x			SHOM
Le Havre (76)	1701-1702			heures et hauteurs PM diurnes	infos météorologiques	O Paris - B5.9
	1875			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1377
	1850-1864 1869-1920			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1883			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1693 SHD R - 7JJ1694
	1883-1884 1889-1894			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1900-1920	x				SHOM
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 111
	1950-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 353
1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 754	
Le Havre Sémaphore (76)	1956-1976			hauteurs horaires	Marégraphe (1/10ème)	IGN - Caisse1347
Le Havre Dragages (76)	1974-1982			hauteurs horaires	Marégraphe (1/10ème)	IGN - Caisse1347
Octeville (76)	1913			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2595

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
Quillebeuf (27)	1852 1854-1860		x			SHOM
Honfleur (14)	1869		x			SHOM
	1875			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1376
	1914			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2654
	1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 884
Arromanches (14)	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 112
	1951			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 242
Barfleur (50)	1876		x			SHOM
	1933	x				SHOM
Saint Vaast la Hougue (50)	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 113
	1951			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 242
Cotentin (50)	1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3737 SHOM - 7JJ3738
	1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3908 SHOM - 7JJ3909
	1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4056
	1938-1939			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4196
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 144
Cherbourg (50)	1789-1791			heures et hauteurs des PM et BM		AN - 3JJ/398 n°27
	1833			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0590 SHD R - 7JJ0591 SHD R - 7JJ0592 SHD R - 7JJ0593 SHD R - 7JJ0594 SHD R - 7JJ0595 SHD R - 7JJ0596
	1833			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0617 SHD R - 7JJ0618 SHD R - 7JJ0619 SHD R - 7JJ0620 SHD R - 7JJ0621 SHD R - 7JJ0622 SHD R - 7JJ0623
	1832 1835-1836 1839-1840 1860-1883			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1881			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1537
	1844-1884			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1900-1914	x				SHOM
	1921-1922			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2742
	1930			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3194
	1932			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3322
	1947-1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 013
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 111
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 146
	1951			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 206
	1951			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 242
	1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 299
1953-1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 439	

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
	1955-1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 508
	1955-1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 626
	1956-1979			Planimètrage (1/40ème)	Marégraphe BRILLIE	IGN - Caisse1348
Jobourg (50)	1921-1922			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2743
Les Huquets de Jobourg (50)	1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 302
Goury (50)	1921-1922			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2743
Barneville-Carteret (50)	1902		x			SHOM
	1902	x				SHOM
Ile Chausey (50)	1831-1832		x			SHOM
	1923-1924			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2811
Granville (50)	1829			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0469 SHD R - 7JJ0470 SHD R - 7JJ0471 SHD R - 7JJ0472 SHD R - 7JJ0473 SHD R - 7JJ0474
	1831			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0469 SHD R - 7JJ0525 SHD R - 7JJ0526 SHD R - 7JJ0527 SHD R - 7JJ0528
	1835-1840		x			SHOM
	1832		x			SHOM
	1921-1922			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2742
Cancalle (35)	1835-1840		x			SHOM
	1923-1924			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ28812
Rochebonne (35)	1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 884
St Servan - St-Malo (35)	1829 1835-1841		x			SHOM
	1835-1836 1843-1844			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure		AD 35 - 4S5005
	1851-1898 1905-1917			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1861-1872 1874-1897 1905-1912			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1850-1917	x				SHOM
	1923-1924			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2810
	1923-1924			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2813
	1934			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3522
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 146
?	x		?	?	IGN - Caisse1345	
Cap Fréhel (35)	1925			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2981
Lanros (22)	1902	x				SHOM
Baie de Saint Briec (22)	1926			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3040 SHOM - 7JJ3041
	1927			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3088

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
	1928			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3111 SHOM - 7JJ3112
	1929			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3150
Paimpol (22)	1835-1899 1902		x			SHOM
	1902	x				SHOM
Heaux de Brehat (22)	1889-1896			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1932			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3314
Abords de Brehat (22)	1930			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3215 SHOM - 7JJ3216
	1931			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3284
	1935			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3666
Perros-guirec (22)	1955-1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 626
Tréguier (22)	1954-1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 531
Morlaix (29)	1837			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ0699 SHD - R 7JJ0700 SHD - R 7JJ0701 SHD - R 7JJ0702
	1929-1931			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ4301 SHD - R 7JJ4302 SHD - R 7JJ4303 SHD - R 7JJ4304
Roscoff (29)	1954		x			SHOM
	?			?	?	IGN - Caisse1346
Aberwrach (29)	1835-1838		x			SHOM
	1835-1838		x	hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ1227
	1930-1932		x	hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ3251
	1930-1932		x	hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3320

Tab. A.3. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer le long des cotes de la mer du Nord et de la Manche en France métropolitaine (Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

Les lieux indiqués en gras et en italique sur le tableau A.3 disposent d'au moins 22 années de mesures. Ils correspondent aux observatoires les plus intéressants pour l'étude séculaire du niveau de la mer. De plus, 5 de ces sites sont des observatoires permanents du réseau RONIM. Seul Dieppe en est exclu. Plusieurs jeux de données issues de l'IGN sont acquis grâce à l'utilisation d'un Planimètre.

2) France métropolitaine : Océan Atlantique

Le long de la façade Atlantique, 7 observatoires présentent plus de 25 années de mesures : Brest, Lorient, Saint-Nazaire, La Pallice, La Rochelle, Fort-Boyard, Rochefort et Socoa – Saint-Jean-De-Luz (Fig. A.4). A Saint-Nazaire tout comme à Rochefort, de nombreux dragages et approfondissement -respectivement de l'estuaire de la Loire et du lit de la Charente- furent réalisés. De plus dans de tels milieux, les marégraphes sont également influencés par le débit des fleuves. L'étude de ces séries semble donc plus délicate pour l'étude séculaire du niveau de la mer.

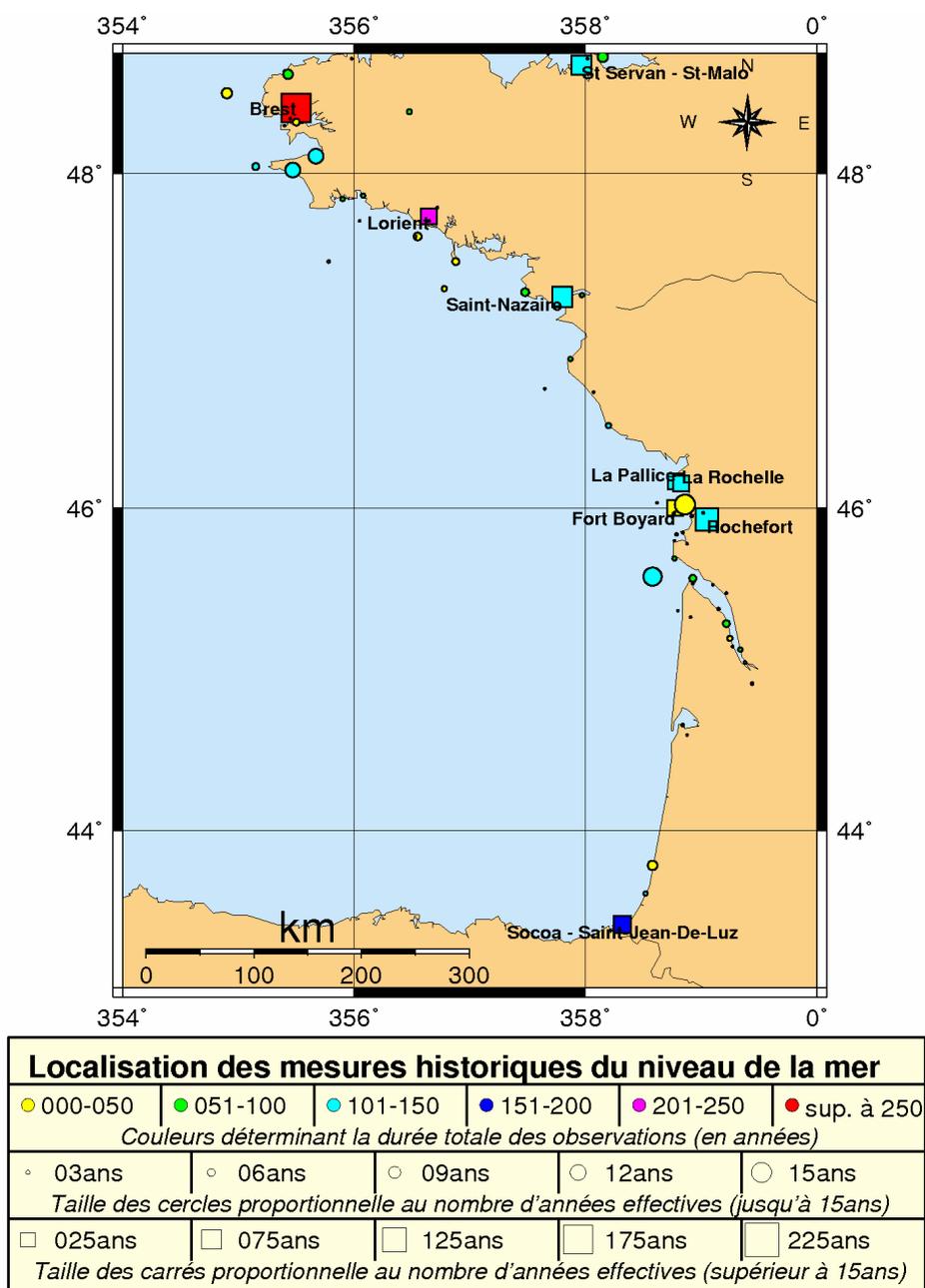


Fig. A.4. – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine le long de la cote Atlantique (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 25 années de données).

De nombreux autres observatoires aux suivis moins réguliers existent également. Le détail de toutes les séries de mesures pour le littoral Atlantique est rassemblé dans le tableau suivant :

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
Cote Ouest de France	1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 844
	1965-1966			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 845 SHOM - S.H.2. 846
Ouessant (29)	1816			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0143
	1817		x	hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0160
	1818		x	hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0205
	1835-1838 1840		x			SHOM
Sein (29)	1816			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0142
	1817			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0161
	1818			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0205
	1902			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2194
	1932			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3321
Molène (29)	1818			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0205
Le conquet (29)	?			?	?	IGN - Caisse1346
Brest (29) GLOSS n°242	1679			heures des PM		Picard J., de La Hire P. (1729a)
	1692			heures des PM		O Paris - B5.9
	1693			heures et hauteurs des PM		AN MAR - 3JJ/151
	1711-1716			heures et hauteurs des PM et BM	infos météorologiques	O Paris - D2.42
	1756-1757			hauteurs des PM diurne	infos météorologiques	AAS - Pochette 1781/01/31
	1757-1778			hauteurs des PM	infos météorologiques	AAS - Pochette 1781/01/31
	1778-1792			hauteurs des PM	infos météorologiques	O Paris - D2.42
	1807-1835			heures et hauteurs des PM et BM	infos météorologiques	Anon. (1843). Observations des marées faites à la mâture et au bassin dans le port de Brest 1807-1835. Bureau des Longitudes, Paris.
	1816			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0140
	1817			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0159
	1819-1832			heures et hauteurs des PM et BM	infos météorologiques	AN - MAR3JJ/153
	1836-1837			heures et hauteurs des PM et BM	infos météorologiques	SHOM
	1877			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ1429
	1846-1857 1860-1914 1916-1937 1939-1944			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1846-1857 1860-1861 1866-1901 1904-1935 1938-1939 1942-1943			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1900-1936 1940-1944	x				SHOM
	1834-1844				infos météorologiques	SHOM
	1959-1960 ?			hauteurs tous les ¼ d'heure ?	infos météorologiques ?	SHOM - S.H.2. 685 IGN - Caisse1346
	1949-2003	x				SHOM
	Roscanvel (29)	1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 043
Camaret-sur-	1816			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ0141

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
Mer (29)						
Douarnenez (29)	1817			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ0159
	1818			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ0205
	1835-1840		x			SHOM
	1902			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2193
	1953-1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 439
Audierne (29)	1835-1840		x			SHOM
	1902			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2195
	1953-1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 439
	1959-1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 685
Ile Longue (29)	1954-1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 531
	1966-1967			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 874
Penmarch (29)	1902		x			SHOM
	1902	x				SHOM
	1904			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2288
Ile Tudy (29)	1835-1840		x			SHOM
Benodet (29)	1819 [18-28/06] 1902		x			SHOM
	1903			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2230
Concarneau (29)	1819			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0225
	1819			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0226
	1903			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2230
	1905			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2294
Hennebont (56)	1902			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2195
Penfret (56)	1903			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2231
Lorient (56)	1716-1719			heures et hauteurs des PM et BM	infos météorologiques	O Paris - D2.42
	1778			heures et hauteurs des PM et BM diurnes		SHD V - SH55 SHD V - SH56 SHD V - SH57
	1820			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0247
	1820			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0263
	1820			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0264
	1855			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0981
	1839-1858				infos météorologiques	SHOM
	1895			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1978
	1903			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2231
	1903			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2854
	1930			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3185
	1932-1933			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3337
	1933-1935			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3469
	1935-1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3716
1951			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 242	
Port-Louis (56)	1819		x			SHOM
Groix (56)	1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4041
	1938-1939			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4205
Quiberon (56)	1923-1925			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2854
	1923-1927			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2873 SHOM - 7JJ2874 SHOM - 7JJ2875
Belle-île-en-mer (56)	1908-1909			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2314
	1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4041
	1938-1939			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4205

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
Port Joinville (56)	1967			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 864
Le Croisic (44)	1906-1908			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2312
	1957-1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 626
	1967			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 864
Paimboeuf (44)	1835-1836 1893		x			SHOM
Saint-Nazaire (44)	1863-1920			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1863-1877 1881-1920			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1900 1902-1920	x				SHOM
	1925			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2986
	1956-1978			Planimètrage (1/20ème)	Marégraphe BRILLIE	IGN - Caisse1346
	1973-1977	x			Marégraphe BRILLIE	IGN - Caisse1348
Fromentine (85)	1866			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1209
	1955-1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 626
Saint Gilles Croix de Vie (85)	1967			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 864
Les sables d'Olonne (85)	1824			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0363
	1891		x			SHOM
	1921			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2726
	1967			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 864
? Ile de Ré (17)	1963			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 775
La Pallice (17)	1885-1890			heures et hauteurs des PM diurnes	infos météorologiques	AD17 - DDE5659
	1890-1892			heures et hauteurs des PM et BM diurnes	infos météorologiques	AD17 - DDE5659
	1899			heures et hauteurs des PM et BM diurnes		SHOM
	1951			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 242
	1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 884
	1956-1965				Marégraphe RICHARD	IGN - Caisse1347
	1966-1976				Marégraphe St-CHAMOND-GRANAT	IGN - Caisse1347
La Rochelle (17)	1775-1776			hauteurs diurnes des PM	infos météorologiques	AAS - Pochette 1778/03/28 AMd La Rochelle - MS783 pp.147-162.
	1824			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0364
	1863-1874			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1863-1869 1872-1874			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1887-1893			heures et hauteurs des PM et BM diurnes	infos météorologiques	AD17 - DDE5659
	Ile d'Aix (17)	1824			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0362
1960				hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 884
1964				hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 840
Fort Enet (17)	1859-1873			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1859-1873			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1867	x				SHOM
Fort Boyard (17)	1873-1909			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1873-1879 1882-1883 1885-1889 1891-1909			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
	1876, 1878 1881, 1883 1886, 1897 1900-1902 1904-1905 1907-1908	x				SHOM
Rochefort (17)	1811-1814 1835-1858		x			SHOM
	1859-1918			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1860-1914			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1859-1880 1885, 1890 1895 1900-1918	x				SHOM
Port des Barques (17)	1859-1860		x			SHOM
Vergeroux (17)	1824			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1364
Pointe du Chapus (17)	1878			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1434
La Cayenne (17)	1878			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1434
La Coubre (17)	1874			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1333
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1913
	1924			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2919
? Ile d'Oléron (17)	1878			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1434
	1963			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 775
	1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 840
Saint Denis d'Oléron (17)	1882			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1563
La Perrotine (17)	1882			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1563
Château d'Oléron (17)	1878			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1434
	1882			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1563
La Perroche (17)	1882			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1563
Coureaux d'Oléron (17)	1946			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 005
Au Brie Maumusson (17)	1813			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0114
Royan (17)	1812			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0113
	1813			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0114
	1825			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0408
	1868			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1254
	1874			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1333
	1882			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1563
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1913
	1912			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2585
Talmont (17)	1878			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1334
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1913
Mortagne (17)	1868			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1254
	1878			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1334
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1913
Gironde (33)	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 110
Port de Beychevelle (33)	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1915
Blaye (33)	1825			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0406

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
	1874	x		hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1335
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1915
La Grave (33)	1874	x		hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1337
	1892	x		hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1914
Bordeaux (33)	1825			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0404
	1874			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1335
Bec d'Ambez (33)	1813			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0114
	1825			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0405
Pauillac (33)	1867			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1168
	1868			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1255
	1874			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1338
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1915
Port de la Maréchale (33)	1812			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0113
	1813			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0114
	1868			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1255
	1874			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1338
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1915
Port de By (33)	1874			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1338
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1915
Pointe de Grave (33)	1868			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1253
	1958-1961			Planimétrage (1/20ème)	Château à compression	IGN - Caisse1347
Port Bloc - le Verdon (33)	?			?	?	IGN - Caisse1347
Cordouan (33)	1812			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0113
	1825			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0407
	1853			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1868			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1253
	1874			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1336
	1882			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1563
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1913
	1912			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2585
	1912-1917	x				SHOM
Bassin Arcachon (33)	1924			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2919
	1825			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0405
Arcachon - Eyrac (33)	1928-1931			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3137
	1892			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
Le Pilat-Plage (64)	1967			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 864
	1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 840
Boucau - Bayonne (64)	1899-1904		x			SHOM
	1919			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2657
Saint-Jean-De-Luz (64)	1826			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0418
	1882			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1551
	1956-1979			Planimétrage (1/10ème)	Marégraphe BRILLIE	IGN - Caisse1345
Socoa - Saint-Jean-De-Luz (64)	1875-1920			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1875-1920			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1900-1917	x				SHOM
	1967			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 864
Bayonne (64)						SHD R - 7JJ0434 SHD R - 7JJ0435 SHD R - 7JJ0436 SHD R - 7JJ0437
	1826			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0437
	1919			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2657

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
	1963			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 771 SHOM - S.H.2. 774
	?				Marégraphe	IGN - Caisse1347

Tab. A.4. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer le long du littoral Atlantique français (Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

Brest, Lorient, Saint-Nazaire, La Pallice, La Rochelle, Fort-Boyard, Rochefort et Socoa – Saint-Jean-De-Luz sont indiqués en gras et en italique sur le tableau précédent. Ils correspondent aux observatoires ayant au moins 33 années de mesures. Les ports de Brest, Lorient, Saint-Nazaire, La Pallice, et Socoa – Saint-Jean-De-Luz sont équipés d'un MCN appartenant au réseau RONIM. Les observations réalisées à La Rochelle et La Pallice sont complémentaires tout comme celles de l'île d'Aix, Fort-Boyard et Fort Enet et celles de Saint-Jean-De-Luz avec Socoa – Saint-Jean-De-Luz. Les trois ensembles de sites sont distants de quelques kilomètres au maximum permettant alors d'envisager une étude sur l'évolution séculaire du niveau de la mer en prenant soin de vérifier si l'hydrodynamisme est proche d'un site à l'autre.

3) France métropolitaine : Mer méditerranée

La cote méditerranéenne française présente également un certain nombre de sites ayant connu des mesures du niveau de la mer (Fig. 1.5). Hormis Toulon où des observations existent depuis la fin du 18^{ème} siècle, peu de données antérieures à la fin du 19^{ème} siècle existent. Six observatoires présentent plus de 20 années de mesures : Port-Vendres, Port-de-Bouc, Martigues, Ile du Planier, Toulon et Nice.

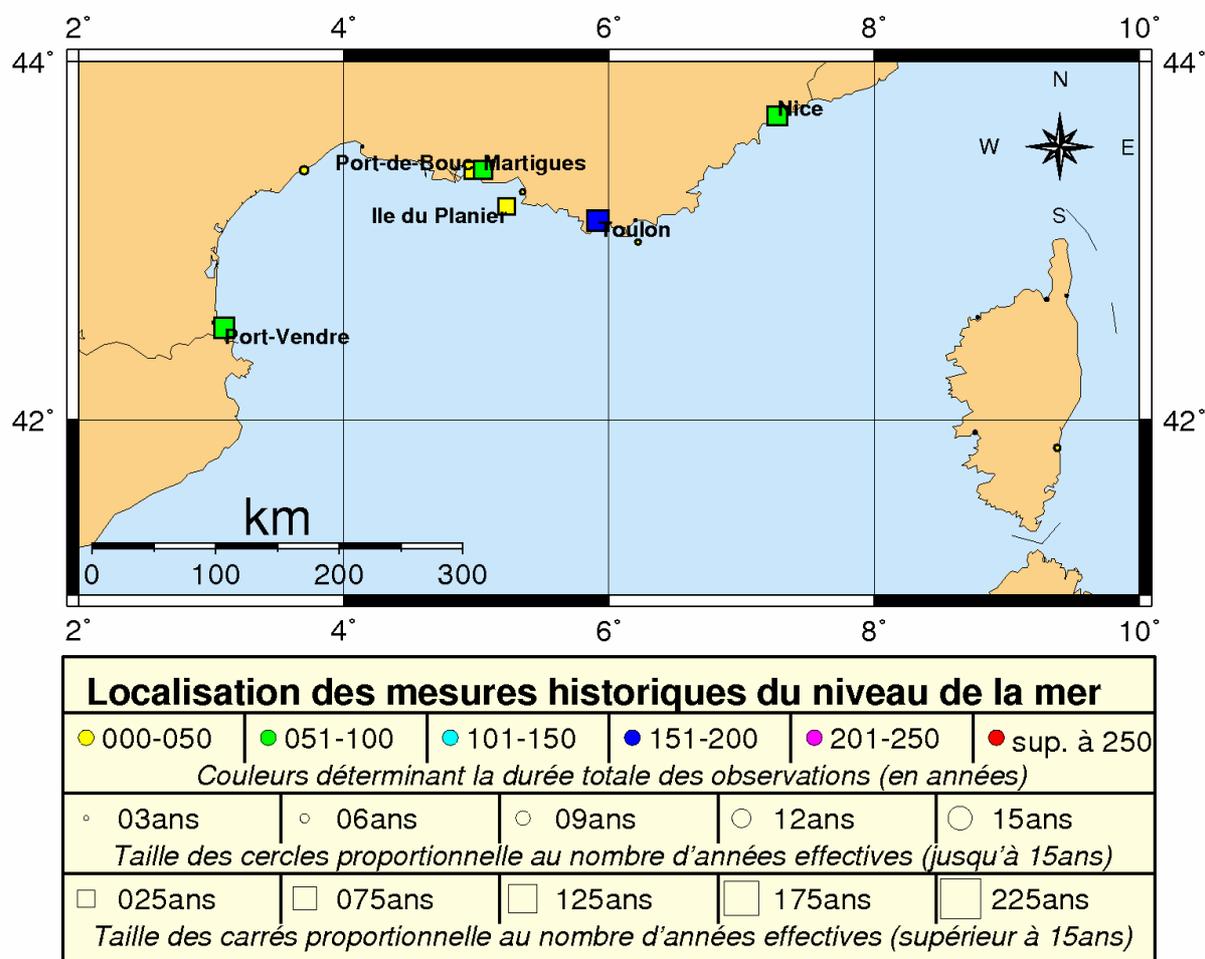


Fig. A.5. – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine le long de la cote méditerranéenne (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 20 années de données).

Du fait du régime micro tidal de la marée en méditerranée, il existe moins de mesures que pour les autres régions côtières précédentes. Le tableau A.5 rassemble toutes les mesures du niveau de la mer réalisées en mer méditerranée.

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
Cotes Sud de France				hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 571
	1958-1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 659
Golfe du Lion	1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2932
Banyuls-Sur-Mer (66)	1963			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 768

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
Port-Vendres (66)	1895-1896			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2058
	1951			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 242
	1888-1932			?	infos météorologiques	IGN - Caisse1347
	Depuis 1975			Planimètrage (1/05ème)	Marégraphe HOTT R16	IGN - Caisse1347
Sète (34)	1975-1979			Planimètrage (1/10ème)	Marégraphe BRILLIE	IGN - Caisse1345
Le Grau du Roi (30)	1961			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 758
Port-de-Bouc (13)	1956-1975			Planimètrage (1/10ème)	Marégraphe BRILLIE	IGN - Caisse1345
Martigues (13)	1895-1896			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2058
	1956-1975			Planimètrage (1/10ème)	Marégraphe BRILLIE	IGN - Caisse1345
	1976-1983			Planimètrage (1/05ème)	Marégraphe HOTT	IGN - Caisse1345 IGN - Caisse1349
Étang de Berre (13)	1966			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 841
Ile du Planier (13)	1964-1980	x		Planimètrage (1/02ème)	Marégraphe HOTT	IGN - Caisse1345
Marseille (13) GLOSS n°205	1849-1851		x			SHOM
	1895-1898			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2059
	1885-	x		Registres horaires + autres	infos météorologiques infos densimétriques	IGN - Caisse1344
	?	x				IGN - Caisse1345
Toulon (83)	1777-1778			heures et hauteurs des PM et BM	Nombreuses lacunes	Lalande JJ. (1781). Traité du flux et du reflux de la mer. In: Desaint JC (ed) Astronomie 4, Bordeaux, Paris.
	1832-1836		x			SHOM
	1841-1860			hauteurs horaires heures	infos météorologiques	SHOM
	1841-1844			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM
	1895-1898			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2059
	1944-1945			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4307 SHOM - 7JJ4308
	1969			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 876
	1955-1975			hauteurs horaires	Marégraphe	IGN - Caisse1348
Port Pothuau (83)	1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 387
Porquerolles (83)	1896-1898			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2060
Villefranche- sur-Mer (06)	?			?	Marégraphe	IGN - Caisse1345
Nice (06)	1896-1898			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2060
	1956-1990			Planimètrage (1/05ème)	Marégraphe Brillie	IGN - Caisse1345
Porto-Vecchio (2A)	1884-1886			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ1751
	1890			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD - R 7JJ1753
Bastia (2B)	1957			Planimètrage (1/05ème)	Marégraphe HOTT	IGN - Caisse1347
Saint-Florent (2B)	1888			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1752
	1891			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1754
Calvi (2B)	1977			Planimètrage (1/05ème)	Marégraphe HOTT	IGN - Caisse1347
Ajaccio (2A)	1821			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0302
	1978			Planimètrage (1/05ème)	Marégraphe HOTT	IGN Caisse1347

Tab. A.5. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer le long du littoral méditerranéen français (Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

Trois observatoires appartiennent au réseau RONIM : Marseille, Toulon et Nice. Ils sont indiqués en gras sur le tableau précédemment. Ullmann et Pirazzoli [2007] dans le cadre de

l'étude des caractéristiques spatiales de la formation des surcotes marines dans le Golfe du Lion ont utilisé à partir de 1986, les mesures de quatre séries marégraphiques dont Port-Vendres, Sète et Marseille. Avec cet inventaire, il existe d'autres données antérieures qui auraient permis d'étudier les surcotes sur une plus longue période temporelle. Quelques mesures existent en Corse mais elles sont peu abondantes et peu suivies.

Après le littoral métropolitain, intéressons-nous maintenant aux hauteurs mesurées ailleurs dans le monde suivant la même nomenclature qu'auparavant.

A.3.2. Pour les autres pays.

Les informations étant nombreuses, plusieurs zones sont définies : l'Europe, l'Afrique, l'Asie l'océan Pacifique, l'Amérique du Sud et l'Amérique du Nord et les Terres Australes et Antarctiques Françaises. Pour chaque secteur est adjoint au tableau détaillé, une carte avec les différents observatoires du niveau de la mer.

1) Monde or France métropolitaine : Continent européen

Quelques mesures sporadiques existent en Allemagne, Pays-Bas, Belgique, Italie, Gibraltar et les îles Anglo-Normandes. Pour les trois premiers pays cités précédemment, les observations furent réalisées à la fin du 18^{ème} début 19^{ème} durant les guerres Napoléonienne. Les premières observations du niveau de la mer dans les îles Anglo-Normandes eurent lieu vers 1830, lors des campagnes bathymétriques en Normandie dirigées par M. Beautemps-Beaupré.

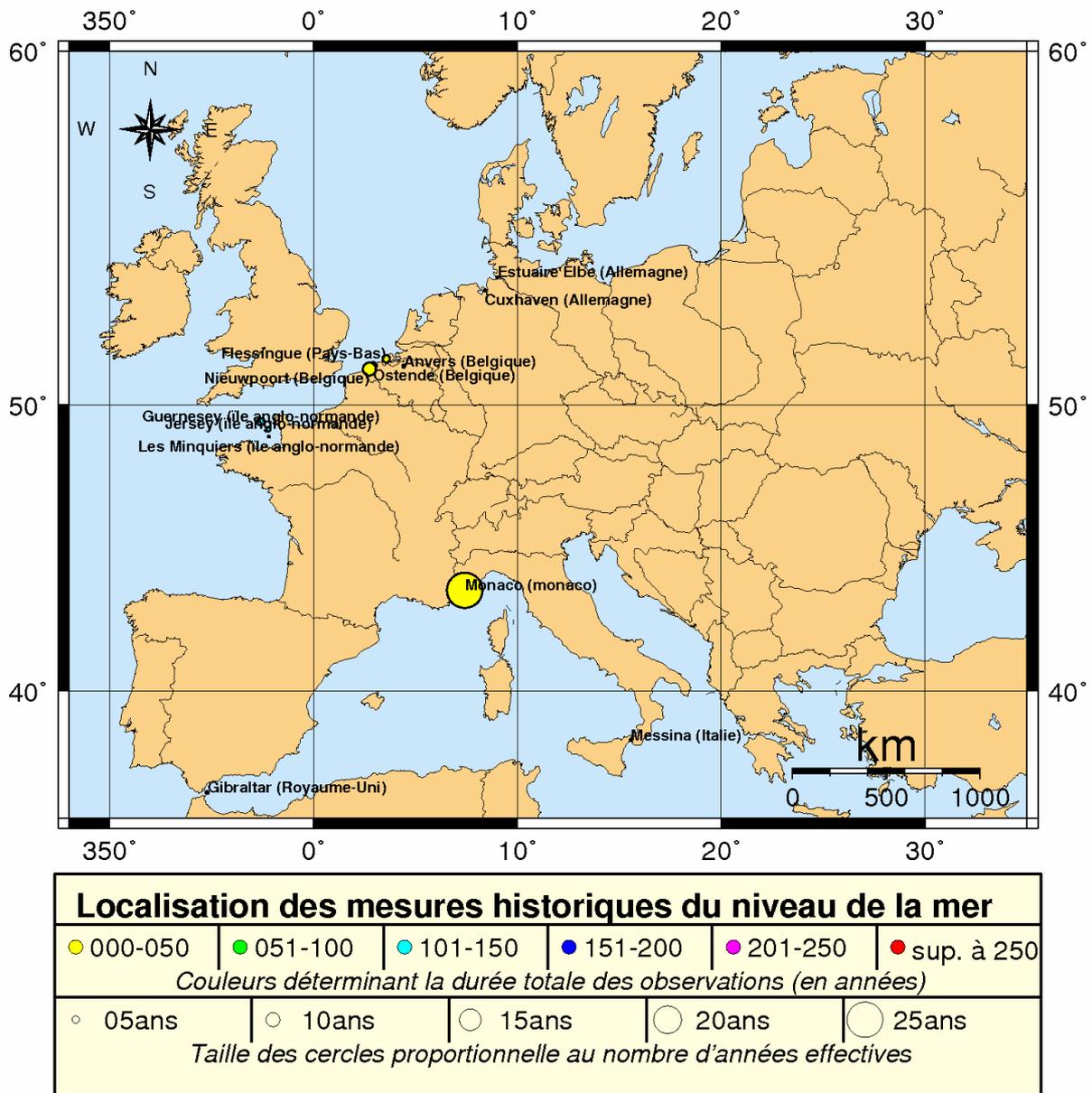


Fig. A.6. – Localisation des observations du niveau de la mer en Europe or France métropolitaine.

Le détail de toutes les données existantes se trouve dans le tableau A.6.

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	SI R : détails sur les mesures		
Jersey (île anglo-normande)	1832			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0556 SHD R - 7JJ0557 SHD R - 7JJ0558 SHD R - 7JJ0559 SHD R - 7JJ0560
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 146
Guernesey (île anglo-normande)	1832			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0556 SHD R - 7JJ0557 SHD R - 7JJ0558 SHD R - 7JJ0559 SHD R - 7JJ0560
	1947-1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 025
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 144
Les Minquiers (île anglo-normande)	1888			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1819 SHD R - 7JJ1820
Anvers (Belgique)	1799			± 1h00 centré sur les PM et BM		SHD R - 7JJ0005
	1803			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0033
Ostende (Belgique)	1800			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0012
	1801			PM puis une hauteur par ½ heure	+ vent matin et soir	SHD R - 7JJ0014
	1802			heures et hauteurs des PM et BM	+ vent matin et soir	SHD R - 7JJ0014
	1803			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0040
	1804			hauteurs toutes les 10minutes	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0039
Nieuwpoort (Belgique)	1801			heures et hauteurs des PM et BM	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0014
	1802			PM puis une hauteur par ½ heure	+ vent matin et soir	SHD R - 7JJ0014
	1802-1808			PM puis une hauteur par ½ heure	+ vent matin et soir	SHD R - 7JJ0023
Escaut occidental (Pays-Bas)	1811			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0080
	1811			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0086
Flessingue (Pays-Bas)	1799			± 1h00 centré sur les PM et BM		SHD R - 7JJ0005
	1801			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0013
	1802			hauteurs PM BM + heure	+ vent matin et soir	SHD R - 7JJ0014
	1802			hauteurs toutes les 10 minutes	+ vent matin et soir	SHD R - 7JJ0023
	1802			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0033
	1803			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0039
	1808			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0056
Estuaire Elbe (Allemagne)	1811			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0069
	1811			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0070
	1811			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0071
Cuxhaven (Allemagne) GLOSS n°284	1812			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0098
	1812			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0104
Spitzberg (Norvège)	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ1902
Gibraltar (Royaume-Uni) GLOSS n°248	1854-1855			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ0953 SHD R - 7JJ0954
Monaco (monaco)	1956-1980			Planimétrage (1/5ème)	Marégraphe HOTT	IGN - Caisse1345
Messina (Italie)	1858	x				AN - 5JJ/346
? Mer d'Alboran	1961-1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 764

Tab. A.6. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer le long du littoral européen (France excepté) (Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

Des mesures à Oostende existent pour les années 1800 à 1804. Verwaest et al. [2005] résume l'histoire des mesures du niveau de la mer dans ce port : Une première série d'observations remonte à la période 1820-1834, un second jeu de mesures couvre la période 1835-1852. Les mesures n'ont pas été conservées. Ensuite des marégraphes furent installés en 1866-1871 et 1878-1914. Malheureusement, ces deux jeux de mesures sont souvent interrompus et aucune référence verticale n'existe. Les mesures récentes depuis 1925 sont tant qu'à elles pleinement exploitables.

2) Monde or France métropolitaine : Continent africain

Le continent africain recèle de nombreux ports ayant faits l'objet d'observations du niveau de la mer. Ces mesures se retrouvent principalement au Maroc, en Algérie, au Sénégal et à Madagascar. La carte A.7 rassemble l'ensemble des données disponibles pour le continent Africain. Sur ce document ne sont nommés que les stations ayant au moins 4 années de mesures. Les 3 cartes suivantes, représentant les régions, d'Afrique du Nord (carte A.8), d'Afrique de l'Ouest (figure A.9) et de Madagascar (document A.10) permettent de situer chaque site de mesures.

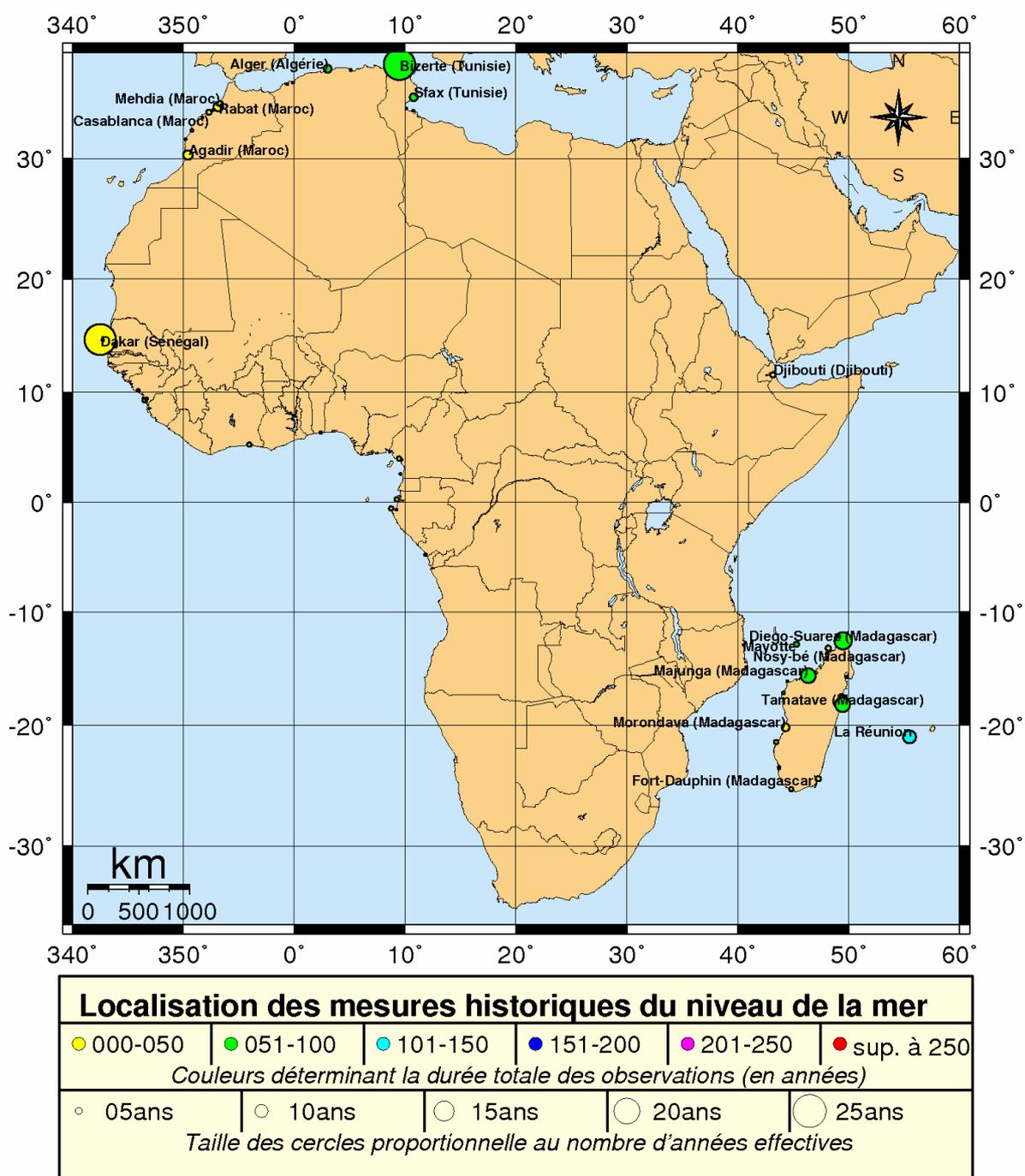


Fig. A.7. – Localisation des observations du niveau de la mer en Afrique (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 4 années de données).

Seuls, les mesures faites en Mauritanie, à Djibouti et en Somalie ne font pas l'objet d'une nouvelle carte. Les informations pour ces jeux de mesures sont consignées dans le tableau A.7.

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
? (Mauritanie)	1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 375
	1961-1963			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 746
	1963-1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 835
	1964-1965			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 872
Baie du Levrier (Mauritanie)	1905-1906		x	hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3806
Djibouti (Djibouti) GLOSS n°2	1897			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2067
	1899	x				SHOM
	1927-1928			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3095
	1927-1928			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 568
? (Somalie)	1934-1935			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3564
Canal de Suez (Egypte)	1891-1951			?	Infos météorologiques, densité et salinité	CAMT 1995060 0070 CAMT 1995060 0119

Tab. A.7. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Mauritanie, en Somalie, à Djibouti et en Egypte (Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

D'après le tableau A.7, les mesures faites à Djibouti comprennent 4 années en tout : 1897, 1899, 1927 et 1928. De plus, cette station fait partis du réseau GLOSS ce qui accroît l'intérêt des données.

2.a) Pays d'Afrique du Nord

Les cotes Tunisienne, Algérienne et Marocaine ont fait l'objet pour de nombreux sites à l'observation du niveau de la mer. Force est de constater, d'après la figure A.8 que c'est principalement sur les cotes Atlantique du Maroc qu'il y a eu le plus grand nombre de stations.

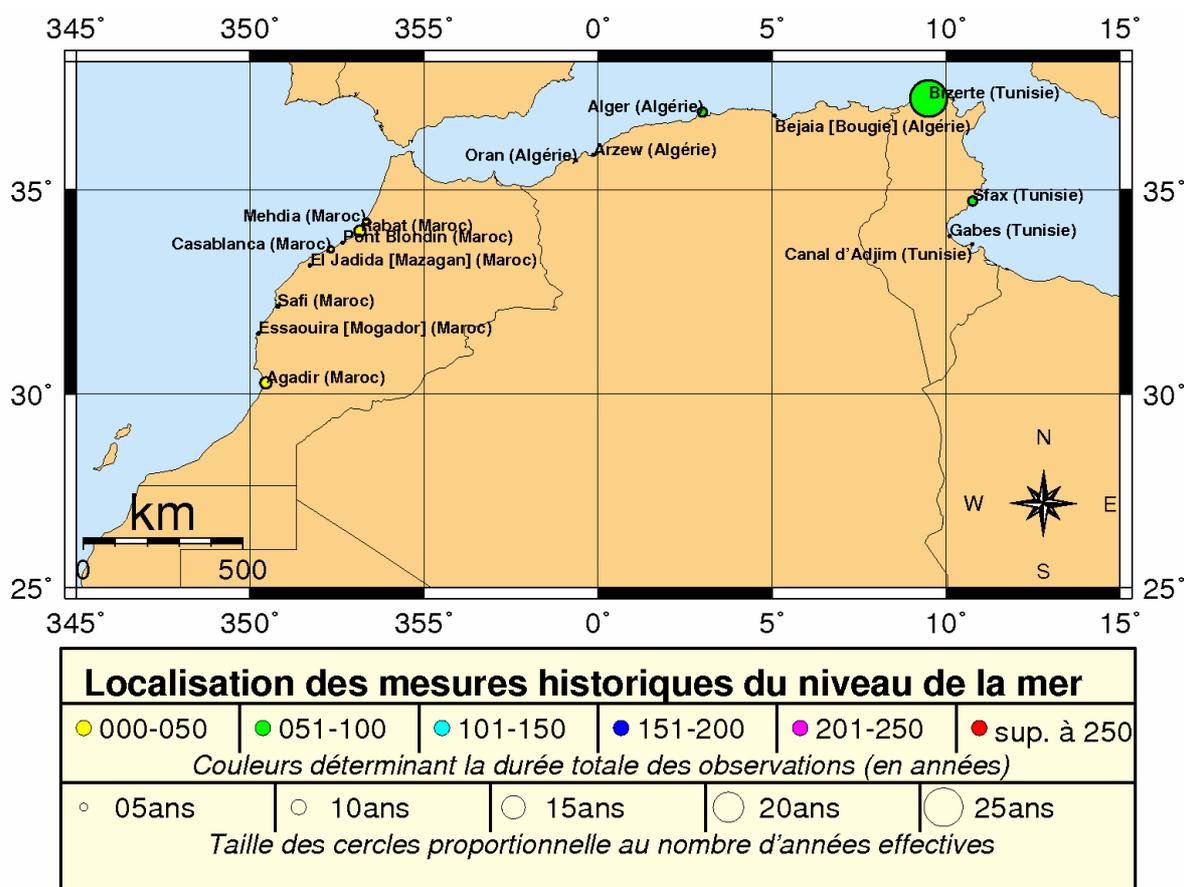


Fig. A.8. – Localisation des observations du niveau de la mer en Afrique du Nord.

Le détail de toutes les mesures se trouve rassemblé dans le tableau A.8. Il n'existe pour cette région qu'une seule station GLOSS se trouvant sur la cote Atlantique Marocaine à Tan Tan. Malheureusement, cet observatoire ne se trouve pas dans la liste ci-dessous.

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	S I R : détails sur les mesures		
? (Tunisie)	1881-1883			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1669 SHD R - 7JJ1670 SHD R - 7JJ1671 SHD R - 7JJ1672
	1935			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3613
	1935			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3642
	1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3772
	1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3931
	1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4057
	1939			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4222
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 114
1950-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 353	
Bizerte (Tunisie)	1890-1897			hauteurs toutes les heures		SHOM
	1940-1955			hauteurs toutes les heures		SHOM
Gabes (Tunisie)	1885			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
Sfax (Tunisie)	1884-1885			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1884-1886	x				SHOM
	1946-1947		x			

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
	1949			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 187 SHOM - S.H.2. 188
Canal d'Adjim (Tunisie)	1933			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3424
? (Algérie)	1922			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2760
	1953			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 393
	?			?	?	IGN - Caisse1349
Arzew (Algérie)	1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 617
Oran (Algérie)	1931			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3289
Alger (Algérie)	1843-1846 1850		x			SHOM
	1921			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4069
	?			?	?	IGN - Caisse1351
Bejaia [Bougie] (Algérie)	1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 617
? (Maroc)	1905-1908			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2348
	1955			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 500
	1955			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 504
	1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 435
	?			?	?	IGN - Caisse1349
Kenitra (Maroc)	?			?	?	IGN - Caisse1349
Rabat (Maroc)	1933-1939		x			SHOM
	1913		x			SHOM
Mehdia (Maroc)	1913			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2590bis
	1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 299
	1953	x				SHOM
	1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 424
	?			?	?	IGN - Caisse1349
Pont Blondin (Maroc)	1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 424
Casablanca (Maroc)	1920			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2682
	1951			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 203
	1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 299
	1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 424
	?		x		?	IGN - Caisse481 IGN - Caisse1351
El Jadida [Mazagan] (Maroc)	1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 299
	?			?	?	IGN - Caisse1349
Safi (Maroc)	1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 183
	1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 435
	?			?	?	IGN - Caisse1349
Essaouira [Mogador] (Maroc)	1920			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2682
	?			?	?	IGN - Caisse1349 IGN - Caisse1351
Agadir (Maroc)	1920			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2682
	1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3786
	1942		x			SHOM
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3896 SHD R - 7JJ3896bis
	1942			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R 7JJ4273
	1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 435
	1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 509 SHOM - S.H.2. 519

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
	?			?		IGN - Caisse1349 IGN - Caisse1351

Tab. A.8. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Afrique du Nord
(Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

2.b) Pays d'Afrique de l'Ouest

L'histoire entre la France et l'Afrique de l'Ouest est très intimement liée. Il n'est donc pas étonnant de retrouver dans cette région du monde des hauteurs du niveau de la mer conservées en France. La carte A.9 évalue que le Sénégal, la Guinée, la Côte d'Ivoire, le Bénin, le Cameroun et le Gabon sont les sièges de ces mesures.



Fig. A.9. – Localisation des observations du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest.

Le long des cotes d'Afrique de l'Ouest, pas moins de 9 stations GLOSS existent. D'après le tableau A.9, il existe pour 4 de ces stations : Dakar, Conakry, Abidjan et La Pointe Noire d'anciennes mesures du niveau de la mer, remontant pour les deux premières d'entre-elles à la fin du 19^{ème} siècle.

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	SI R : détails sur les mesures		
? (Sénégal)	1958-1959			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 651
	1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 714
	1964-1965			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 872
Casamance (Sénégal)	1963-1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 835
Mbour (Sénégal)	1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 061
Dakar (Sénégal) GLOSS n°253	1889, 1900 1903-1912 1914-1920 1930, 1932	x				SHOM
	1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3786
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3882
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3896 SHD R - 7JJ3896bis
Rufisque (Sénégal)	1930-1931			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4346
Kaolack (Sénégal)	1930-1931			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4346
? (Gambie)	1964-1965			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 872
? (Guinée)	1947-1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 052
	1956-1957			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 641 SHOM - S.H.2. 642
	1958-1959			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM S.H.2. 651
Boffa (Guinée)	1942-1943)		x			SHOM
Conakry (Guinée) GLOSS n°255	1900, 1938	x				SHOM
	1937-1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3973
	1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 266
	?			?	?	IGN - Caisse1352
Dureka (Guinée)	1942-1943		x			SHOM
? (Côte d'Ivoire)	1961-1963			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 746
	1964-1965			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 872
Vridi (Côte d'Ivoire) GLOSS n°257	1951-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 267
	1953	x				SHOM
	?			?	?	IGN - Caisse1352
Cotonou (Benin)	1951-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 267
? (Gabon)	1889-1890			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ1832
	1920-1921			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2703
	1955			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 493
	1957-1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 650
	1958-1959			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 651
	1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 714
	1963-1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 835
Libreville (Gabon)	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 163 SHOM - S.H.2. 164
	1963			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 831
Sangatanga (Gabon)	1963			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 831
Cap-Lopez (Gabon)	1910-1912			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2532

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
? (Cameroun)	1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 070
	1955			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 493
Douala (Cameroun)	1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4028
	1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 266
	1955			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 493
Kribi (Cameroun)	1915			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2660
? (Congo)	1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 714
Pointe-Noire (République du Congo) GLOSS n°261	1911, 1918	x				SHOM
	?			?		IGN - Caisse1352

Tab. A.9. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Afrique de l'Ouest
(Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

2.c) Madagascar, îles de la réunion et de Mayotte

En étant la plus grande île d'Afrique, les cotes de Madagascar ont fait l'objet de multiples observations du niveau de la mer comme l'atteste la figure A.10. Autour de la 3^{ème} plus grande île du monde, se trouve également des mesures faites dans le département français de La Réunion ainsi que la collectivité départementale d'outre-mer française Mayotte.

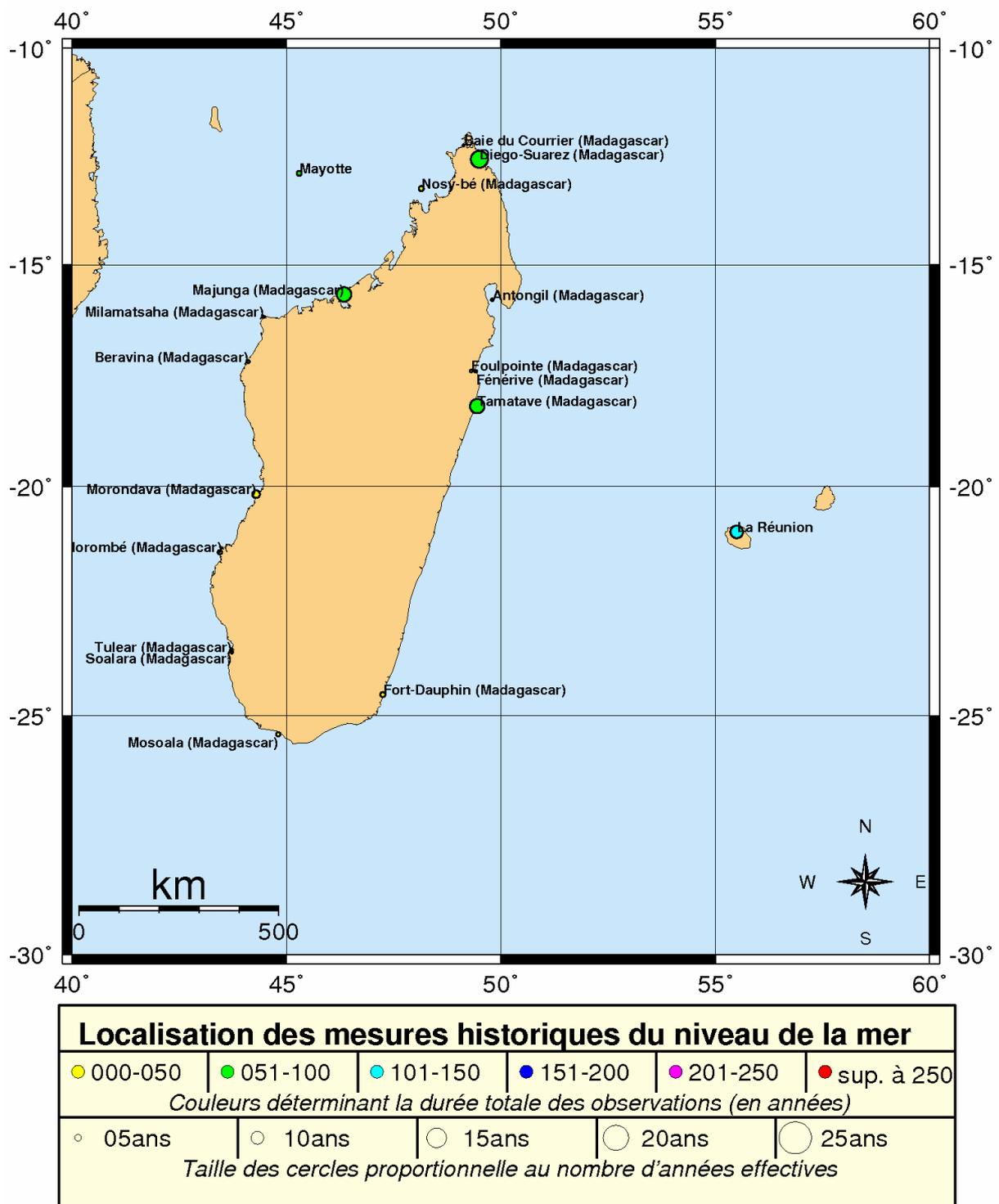


Fig. A.10. – Localisation des observations du niveau de la mer le long de la cote Malgache et sur les îles de Mayotte et de la réunion.

Pour Madagascar, les premières observations débutent à la fin du 19^{ème} siècle alors qu'elles démarrent au début du 20^{ème} siècle pour l'île de la réunion et au milieu du 20^{ème} siècle pour l'île de Mayotte. Le tableau A.10 résume tous les jeux de mesures.

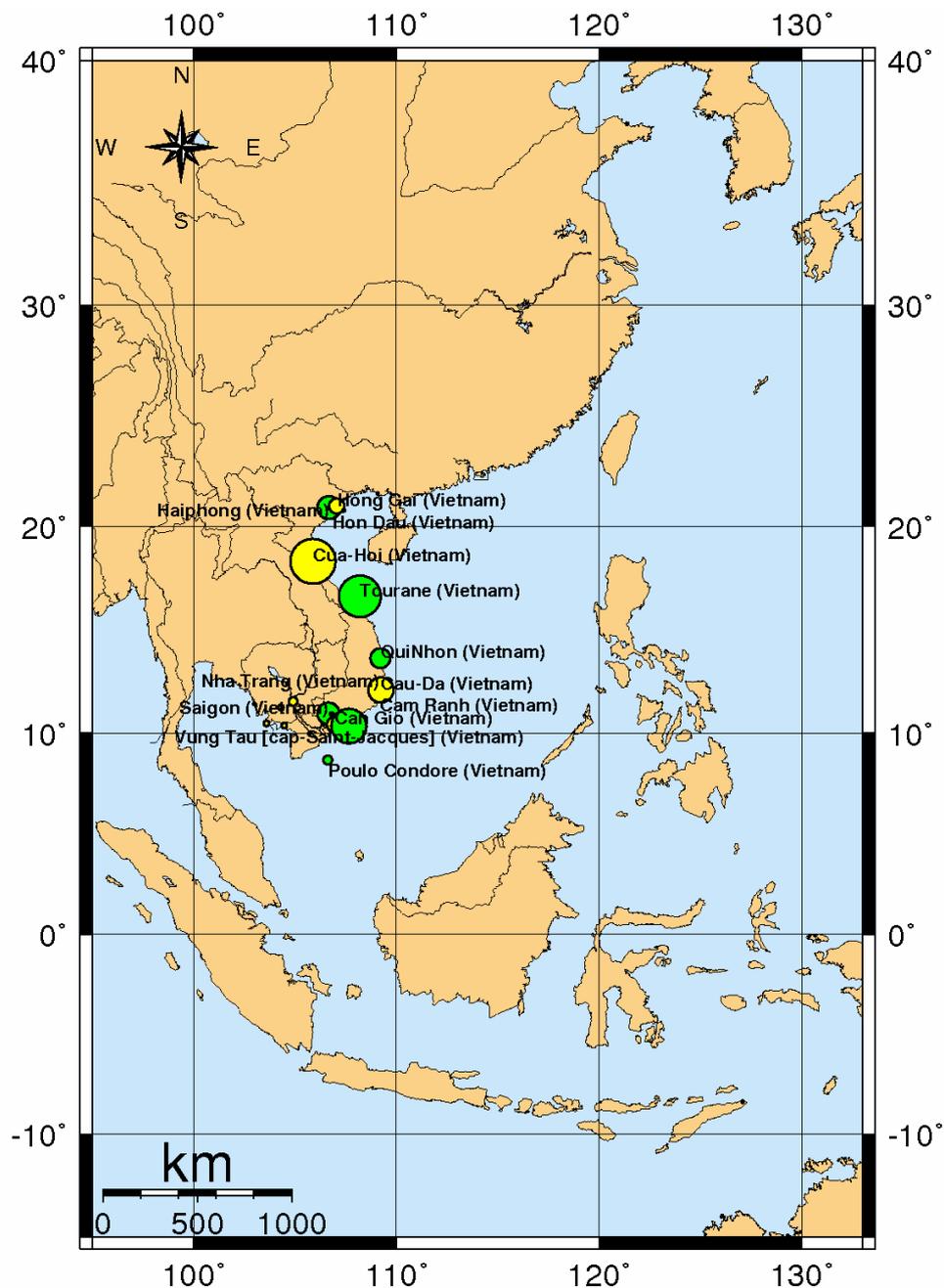
Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
?	1888			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1808 SHD R - 7JJ1809
	1892			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1894
	1903			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2218
	1904-1905			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2283
	1906			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2323
	1907			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2378
	1908-1909			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2444
	1928-1933			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3256
	1947-1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 035
	1950-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 232
	1953-1954			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 374
	1955-1957			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 549
	1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 557
	1957-1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 635
	1957-1959			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 636
1959-1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 676	
Antongil (Madagascar)	1936-1937		x			SHOM
Tamatave (Madagascar)	1900-1901			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2154
	1901-1907		x			SHOM
	1960-1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 724
	?			?	?	IGN - Caisse1352
Nosy-bé (Madagascar) GLOSS n°15	1900			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2138 SHD R - 7JJ2146
	1902-1903			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2215
	1908			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2421
Fort-Dauphin (Madagascar) GLOSS n°271	1936-1937		x			SHOM
	1951-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 281
Soalara (Madagascar)	1948-1949			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 073
Tulear (Madagascar)	1951-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 281
Morombé (Madagascar)	1960-1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 724
Milamatsaha (Madagascar)	1899		x			SHOM
Majunga (Madagascar)	1900			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2146
	1900		x			SHOM
	1901			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2154
	1908			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2421
	1908			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3253
	1947-1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 036
	1948-1949			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 080
	1951-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 281
1960-1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 724	
Diego-Suarez (Madagascar)	1888-1889		x	hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1856 SHD R - 7JJ1857 SHD R - 7JJ1858
	1900			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2138
	1900, 1905 1909		x			SHOM
	1906-1907			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2384
	1948-1949			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 073
	1954-1955			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 453
	1960-1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 724

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
Beravina (Madagascar)	1901			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2166
	1903	x				SHOM
Morondava (Madagascar)	1948-1949			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 073
	1951-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 281
	1954-1955			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 453
Mosoala (Madagascar)	1960-1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 724
Baie du Courrier (Madagascar)	1907	x				SHOM
Foulpointe (Madagascar)	1948-1949			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 073
Fénérive (Madagascar)	1951-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 073
La Réunion	1840 1845-1846 1943-1948	x				SHOM
	1900		x			SHOM
? Les Comores	1962-1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 809
	1963-1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 814
Mayotte	1900	x				SHOM
	1913			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2609
	1962-1963			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 804

Tab. A.10. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer à Madagascar, et pour les îles de Mayotte et la Réunion (Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

3) Monde or France métropolitaine : Continent asiatique

D'abondantes observations du niveau de la mer eurent lieux le long des cotes des actuels Cambodge et Vietnam. La création de l'Indochine française remonte à 1887. Elle réunissait la Cochinchine, l'Annam, le Tonkin, le Cambodge et le Laos. Elle prit fin en 1950. Il est donc normal que durant cette période de présence française des mesures du niveau de la mer eurent lieux. La carte A.11 présente l'ensemble de ces observatoires.



Localisation des mesures historiques du niveau de la mer					
● 000-050	● 051-100	● 101-150	● 151-200	● 201-250	● sup. à 250
<i>Couleurs déterminant la durée totale des observations (en années)</i>					
○ 05ans	○ 10ans	○ 15ans	○ 20ans	○ 25ans	
<i>Taille des cercles proportionnelle au nombre d'années effectives</i>					

Fig. A.11. – Localisation des observations du niveau de la mer le long de la cote asiatique (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 5 années de données).

En plus des possessions en Indochine, la France avait quelques concessions en Chine du Nord. Des mesures du niveau de la mer y furent réalisées tout comme au Timor Oriental.

Tous les jeux de mesures avec les relevés effectués au Vietnam et au Cambodge sont développés dans le tableau A.11.

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
Kompong (Cambodge)	1937-1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4004
Phnom Penh (Cambodge)	1860, 1864 1866-1868		x			SHOM
Ilot Cone (Cambodge)	1930			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3206
Ream (Cambodge)	1927-1928			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4111 SHD R - 7JJ4112 SHD R - 7JJ4113 SHD R - 7JJ4114
? (Indochine)	1904-1905			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2266
	1913-1914			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2629
	1923			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ2827 SHOM - 7JJ2835 SHOM - 7JJ2840
	1924-1925			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2936 SHD R - 7JJ2952
	1925			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3065
	1928-1929			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3125 SHD R - 7JJ3125bis
	1932-1933			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3383 SHD R - 7JJ3384 SHD R - 7JJ3385
	1925			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3541
	1925			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3552
	1928-1929			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4127 SHD R - 7JJ4128 SHD R - 7JJ4129
	1937-1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4006 SHD R - 7JJ4007 SHD R - 7JJ4012
	1950-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 209 SHOM - S.H.2. 215
	1952-1953			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 344
	1954-1955			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 450
	1955-1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 584 SHOM - S.H.2. 585 SHOM - S.H.2. 586
	? Cac Ba (Indochine)	1902 1907-1908	x			
? Province du Tonkin (Vietnam)	1874		x	hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1349
	1885		x	hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1759
	1886-1887			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1784 SHD R - 7JJ1785
	1904			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2264
	1905-1906			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2335 SHD R - 7JJ2335bis
	1922-1923			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4147
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 093
? Fleuve Rouge (Vietnam - Chine)	1929			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3172 SHD R - 7JJ3173
Baie d'Along (Vietnam)	1929			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3181 SHD R - 7JJ3182
	1929			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3708

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
	1931-1932			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4175 SHD R - 7JJ4183 SHD R - 7JJ4184 SHD R - 7JJ4185 SHD R - 7JJ4186 SHD R - 7JJ4188
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3860
	1937-1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3988
Ha tien (Vietnam)	1868		x			SHOM
	1904-1905	x				SHOM
Vinh (Vietnam)	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3861 SHD R - 7JJ3862 SHD R - 7JJ3863
Can Tho (Vietnam)	1869		x			SHOM
Cua-Hoi (Vietnam)	1926-1937					
	1939-1943		x			SHOM
	1930-1944	x				SHOM
Province du Than Hoa (Vietnam)	1930			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3224
My Tho (Vietnam)	1862, 1866		x			SHOM
Ho Chi Minh [Saigon] (Vietnam)	1861-1863			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1864					
	1873-1875 1896, 1898		x			SHOM
	1921-1925	x				SHOM
Bien Hoa (Vietnam)	1861-1862		x			SHOM
Can Gio (Vietnam)	1861-1864 1866-1867			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1896, 1898		x			SHOM
	1868	x				SHOM
Poulo Condore (Vietnam)	1862-1864			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1922-1923			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4135
Hon Dau (Vietnam)	1931-1937	x				SHOM
Haiphong (Vietnam)	1874-1875 1896, 1898		x			SHOM
	1929-1936		x		Observations échelle de marée	SHOM
	1928-1929	x				SHOM
Cua Cam (Vietnam)	1873-1874		x			SHOM
Vung Tau [cap-Saint- Jacques] (Vietnam)	1862, 1868			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1908					
	1926-1933	x				SHOM
	1906-1907			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2372
	1910-1911			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2512
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3864
	1937-1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4026
1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 092	
Hong Gai (Vietnam)	1903, 1928-1934 1937		x			SHOM
	1925			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3008
Cam Ranh (Vietnam)	1906-1907			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2363
	1908-1909			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2433
	1909		x			SHOM
	1910			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2487

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
	1937-1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4011
	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 093
Fai Tsi Long (Vietnam)	1930			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3236 SHD R - 7JJ3237 SHD R - 7JJ3238
Annam (Vietnam)	1935-1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3698 SHD R - 7JJ3699
Tourane (Vietnam)	1858-1859		x			SHOM
	1858-1859			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1907-1908			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2404 SHD R - 7JJ2405
	1902 1926-1944 1949		x		Années 1942-1944 incomplètes	SHOM
	1929-1944		x		Observations échelle de marée	SHOM
Phan Rang (Vietnam)	1930			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3203
Nha Trang (Vietnam)	1898-1899, 1902		x			SHOM
	1912-1913			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2572
QuiNhon (Vietnam) GLOSS n°75	1902		x			SHOM
	1879, 1902 1930-1938		x			SHOM
	1926			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3065
Cau-Da (Vietnam)	1930-1944		x			SHOM
Golfe de Siam [Golfe de Thaïlande]	1902			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2206
	1902			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ2267
	1902			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3682
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ3865 SHD R - 7JJ3866 SHD R - 7JJ3866bis
	1938-1939			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ4262 SHD R - 7JJ4263 SHD R - 7JJ4264 SHD R - 7JJ4265
	1950-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 220
Pakoi (Chine)	1901		x			SHOM
Yen-t'Ai [Tche-Fou] (Chine)	1860		x	heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
Salara (Timor- Oriental)	1903		x			SHOM

Tab. A.11. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Asie du Sud Est
(Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

Dans cette longue suite de ports, seul celui de QuiNhon fait actuellement partis du réseau GLOSS. 9 années consécutives existent entre 1930 et 1938 et permettrait d'enrichir cette intéressante série en plus des années 1879, 1902. Un rapport de l'Intergovernmental Oceanographic Commission [1994] patronné par l'UNESCO sur les mesures archéologiques du niveau de la mer pour les pays du Pacifique de l'Ouest indique que 3 observatoires Vietnamien : Hon Dau, Vung Tau et QuiNhon, enregistrent le niveau de la mer depuis respectivement 1954, 1979 et 1986. Les données antérieures sont d'autant plus intéressantes qu'elles complètent des séries de mesures en cours. Cartwright [2003b] a revisité la marée dans la province du Tonkin. Il discute des conclusions des ingénieurs hydrographes français

de la fin du 19^{ème} et première moitié du 20^{ème} siècle qui s'appuyaient sur des mesures faites à Hon Dau ainsi que dans toute le Tonkin.

4) Monde or France métropolitaine : îles du Pacifique

La Nouvelle Calédonie et les 5 archipels composants la Polynésie française représente la majeure partie des observations pour les îles du Pacifique (figure A.12). Seuls les ports de Akaroa (Nouvelle Zélande) et Honolulu (Etats-Unis d'Amérique) font offices d'exceptions.

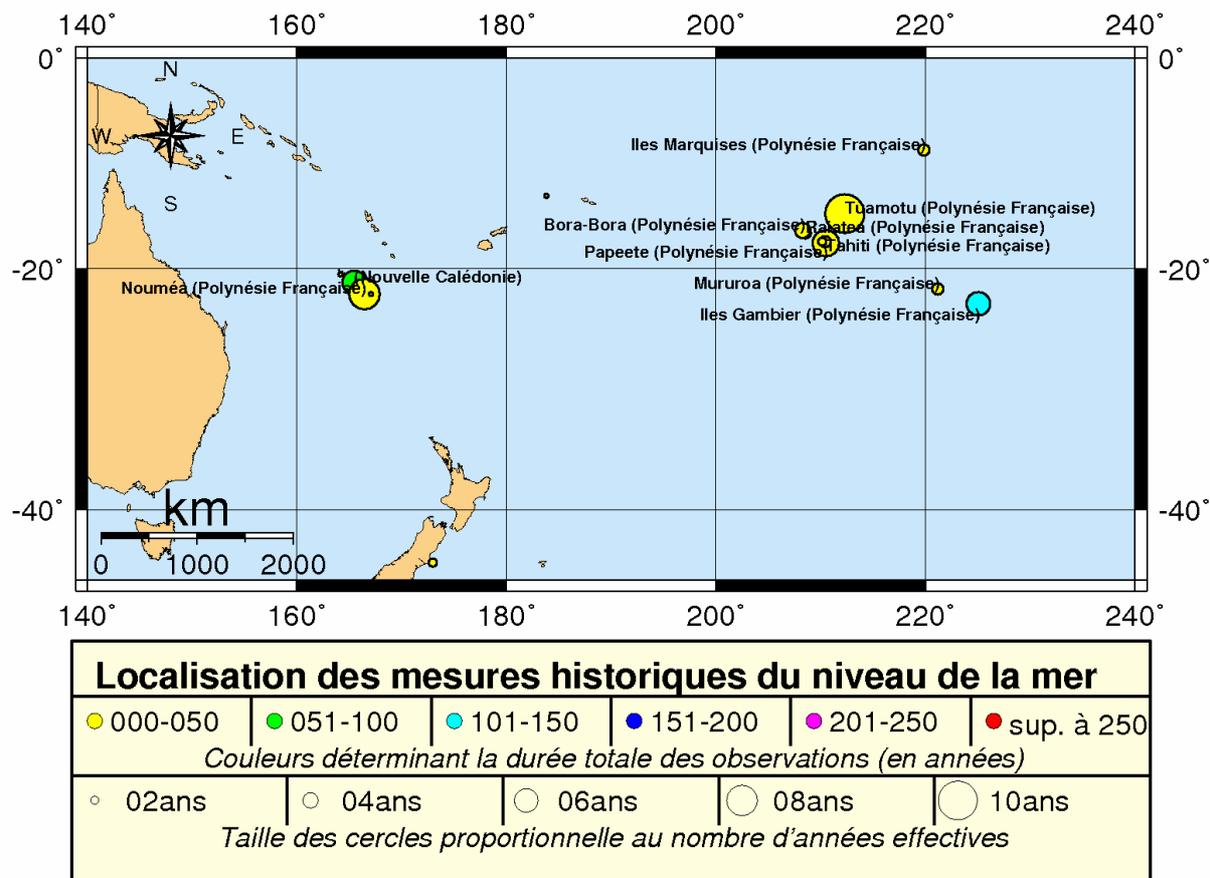


Fig. A.12. – Localisation des observations du niveau de la mer le long des îles du Pacifique (Ne sont nommés que les observatoires ayant au moins 3 années de données).

L'inventaire des mesures pour les îles du pacifique se trouvent rassemblés dans le tableau A.12. La grande partie des mesures débute à la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Papeete et Honolulu sont deux stations faisant partis du réseau GLOSS. Pour étudier les effets de tsunamis en Polynésie Française, Schindelé & al. [2006] ont travaillé sur le catalogue des marégrammes se trouvant au SHOM.

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
Akaroa (Nouvelle-Zélande)	1844		X			SHOM
	1843-1844			hauteurs horaires heures et hauteurs des PM et BM	infos météorologiques	AN - 3JJ/309 n°103

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	Si R : détails sur les mesures		
Etablissements Français de l'Océanie (EFO)	1953-1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 476
? (Polynésie Française)	1958-1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 696
	1958-1960			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 791 SHOM - S.H.2. 792
	1963-1964			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 822 SHOM - S.H.2. 823
	1966-1968			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 858
Iles Gambier (Polynésie Française)	1956-1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 604
	1966-1967			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 852
	1966-1968			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 861
Mururoa (Polynésie Française)	1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 797
	1966-1968			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 858
Iles Marquises (Polynésie Française)	1956-1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 604
Tuamotu (Polynésie Française)	1949			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 098
	1951-1952			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 303
	1956-1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 604
	1965-1966			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 828 SHOM - S.H.2. 829
	1966-1968			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 861
Tahiti (Polynésie Française)	1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3748
	1956-1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 604
	1956-1957			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 607 SHOM - S.H.2. 608
	1966-1968			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 858
Papeete (Polynésie Française) GLOSS n°140	1911, 1924	x				SHOM
	1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3748
Moorea (Polynésie Française)	1956-1957			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 608
Raiatea (Polynésie Française)	1956-1957			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 607 SHOM - S.H.2. 608
	1969			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 880
Tahaa (Polynésie Française)	1956-1957			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 607 SHOM - S.H.2. 608
Bora-Bora (Polynésie Française)	1956-1957			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 608
	1966-1967			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 858
Paagoumene (Nouvelle Calédonie)	1936			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3807
? (Nouvelle Calédonie)	1872			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ1286
	1961-1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 741
	1963-1965			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 868 SHOM - S.H.2. 869
Thio (Nouvelle Calédonie)	1906-1907		x			SHOM
Nouméa (Nouvelle Calédonie)	1930-1935			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3569
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3816
Goro (Polynésie Française)	1938			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4031
Ile Wallis	1936	x				SHOM

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
(Polynésie française)						
Honolulu (Hawaii, USA) GLOSS n°108	1851		x			SHOM

Tab. A.12. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer dans les Îles du Pacifique (Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

Chazallon [1844] commanda les observations faites à Akaroa port se trouvant en Nouvelle-Zélande. Cette ville était le point de départ de la colonisation française sur la principale île du Sud mais les aléas de l'histoire en décidèrent autrement...

5) Monde or France métropolitaine : l'Amérique du Sud

Le continent Sud Américain rassemble quelques mesures du niveau de la mer (figure A.13) principalement le long des cotes des départements d'outre-mer de Guyane, de Martinique et de Guadeloupe.



Localisation des mesures historiques du niveau de la mer					
● 000-050	● 051-100	● 101-150	● 151-200	● 201-250	● sup. à 250
<i>Couleurs déterminant la durée totale des observations (en années)</i>					
○ 02ans	○ 04ans	○ 06ans	○ 08ans	○ 10ans	
<i>Taille des cercles proportionnelle au nombre d'années effectives</i>					

Fig. A.13. – Localisation des observations du niveau de la mer le long des cotes d'Amérique du Sud.

Les mesures réalisées au Chili, à Panama (lors de la construction du canal de Panama par Ferdinand de Lesseps entre 1880 et 1893), en Guyane, en Martinique et en Guadeloupe sont inventoriées dans le tableau A.13.

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	S R : détails sur les mesures		
Cap Horn (Chili)	1882-1883			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHD R - 7JJ1569
Colon (Panama)	1882		x			SHOM
Naos (Panama)	1882		x			SHOM
? (Guyane)	1929			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3155 SHOM - 7JJ3160
	1941-1943			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4334
	1947-1948			hauteurs tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 042
Ile du Salut (Guyane)	1896-1897			heures et hauteurs des PM et BM		SHOM
	1896	x				SHOM
	1936-1937	x		hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3869
Cayenne (Guyane)	1880		x			SHOM
	1931-1932					
	1935-1937	x				SHOM
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3877
Saint-Laurent- Du-Maroni (Guyane)	1935-1937	x				SHOM
	1936-1937			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ3873 SHOM - 7JJ3874 SHOM - 7JJ3875
? (Guadeloupe)	1867-1869			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ1171 SHOM - 7JJ1172
? (Martinique) Fort de France (Martinique)	1824-1825			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ0372
	1912					
	1938-1939	x				SHOM
Saint-Pierre (Martinique)	1938-1939			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4212
	1939-1942			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4332

Tab. A.13. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Amérique du Sud
(Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

Après le continent Sud américain, passons maintenant au continent Nord américain.

6) Monde or France métropolitaine : l'Amérique du Nord

Les archives françaises recèlent quelques observations faites sur le continent Nord Américain aussi bien du côté Pacifique que du côté Atlantique comme l'illustre la figure A.14.



Fig. A.14. – Localisation des observations du niveau de la mer le long des côtes d'Amérique du Nord.

Le tableau A.14 catalogue tous les jeux de mesures disponibles pour ce continent.

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	SI R : détails sur les mesures		
Old-Point-Comfort (USA)	1853	x				AN - 5JJ/253
Fort Constitution (USA)	1853	x				AN - 5JJ/253

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
San Francisco (USA) GLOSS n°158	1853	x				AN - 5JJ/253
Terre-Neuve (Canada)	1851-1852			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ0887
	1862			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ1137
Port Saint-Pierre (Saint-Pierre et Miquelon)	1940			hauteurs diurnes tous les ¼ d'heure	infos météorologiques	SHOM - 7JJ4335

Tab. A.14. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer en Amérique du Nord
(Type de support : **M** : Marégramme, **I** : Inconnu, **R** : Registre).

Sur la liste des ports, seul celui de San Francisco appartient au réseau GLOSS. Pour le continent Nord Américain, les informations très modestes.

7 Les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF)

Les TAAF rassemblent les îles Saint Paul et Amsterdam, l'archipel Crozet, l'archipel Kerguelen et la terre Adélie (figure A.15).

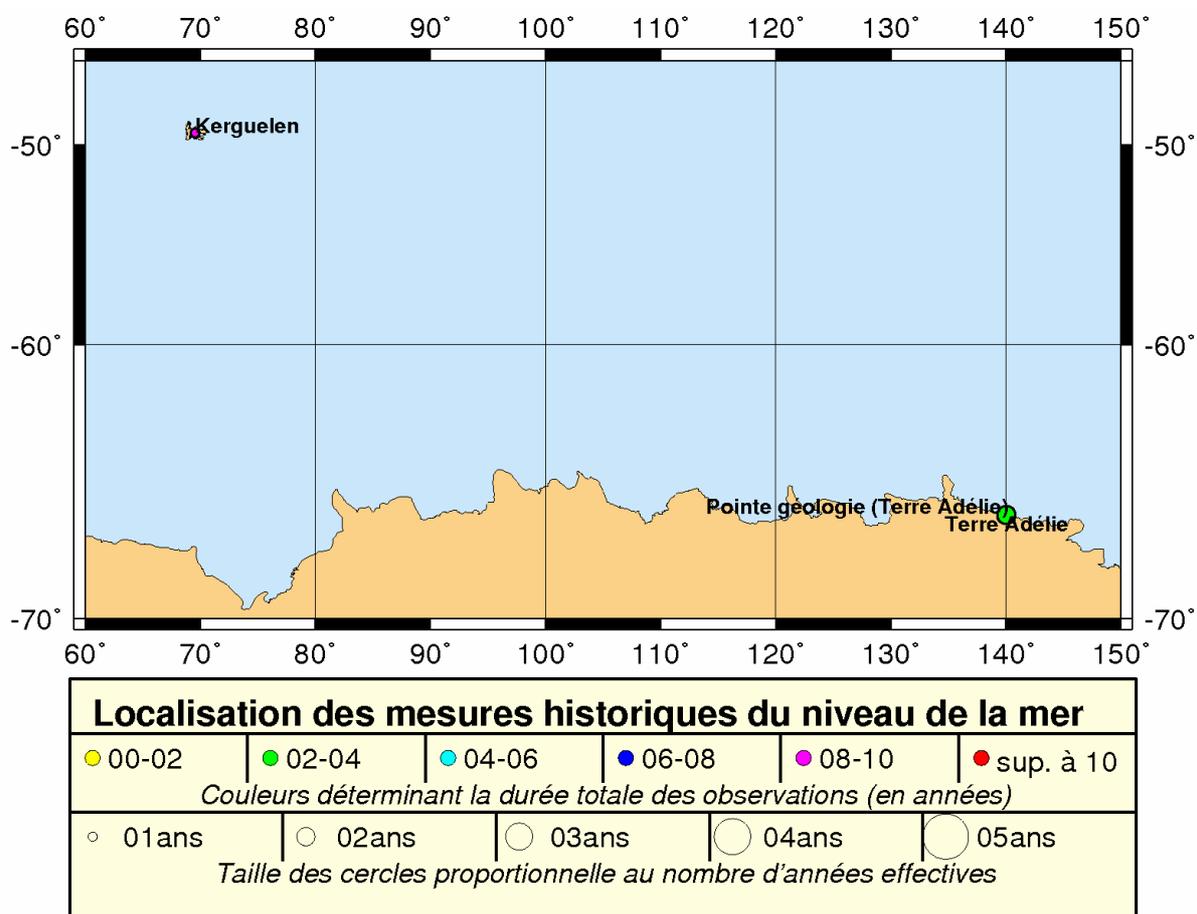


Fig. A.15. – Localisation des observations du niveau de la mer pour les TAAF.

Testut & al. [2006] travaillent sur les mesures actuelles et passés réalisés à Kerguelen et plus largement sur l'ensemble des TAAF. Dans le cadre de cette thèse, des observations inédites lui ont été fournies. Le tableau suivant rassemble les hauteurs du niveau de la mer disponibles dans les différents centres d'archivages :

Site (département)	Période	Type de support			Commentaires	Localisation et cote du document
		M	I	si R : détails sur les mesures		
Kerguelen GLOSS n°23	1949-1950			hauteurs tous les ¼ d'heure	Infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 128
	1956			hauteurs tous les ¼ d'heure	Infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 560
Iles australes	1957-1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	Infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 600
	1956-1958			hauteurs tous les ¼ d'heure	Infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 604
Pointe géologie (Terre Adélie)	1957			hauteurs tous les ¼ d'heure	Infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 643
Terre Adélie	1961-1962			hauteurs tous les ¼ d'heure	Infos météorologiques	SHOM - S.H.2. 717

Tab. A.15. - Inventaire exhaustif des observations du niveau de la mer pour les Terres Australes et Antarctiques Françaises (Type de support : M : Marégramme, I : Inconnu, R : Registre).

A.4. Conclusion.

Cet inventaire permet de faire un "état des lieux" du potentiel des observations historiques du niveau marin. Il confirme que la France possède un patrimoine inestimable aussi bien en métropole que partout ailleurs dans le monde, notamment dans les pays du Maghreb, pour les nations de l'Afrique francophone et au Vietnam. Il est important de les valoriser scientifiquement dans le contexte actuel de changement climatique afin d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : Les événements extrêmes sont-ils plus fréquents aujourd'hui que par le passé ? Le niveau moyen de la mer a-t-il évolué ? Si oui, de combien ? Autant de questions pour lesquelles les observations historiques peuvent aider à y répondre.

A.5. Perspectives.

Depuis le 1^{er} octobre 2007, un nouveau doctorant, Thomas Gouriou renforce l'équipe "niveau marin" dirigé par Guy Wöppelmann. Il travaille sur les observations du niveau de la mer le long du littoral charentais. Thomas a découvert de nouvelles observations auprès d'organismes tels que les Port Autonome de Bordeaux¹ ou Le Service de Prévision des Crues Littoral Atlantique². Ses recherches montrent que cet inventaire est loin d'être exhaustif. Pour rendre ce catalogue le plus complet possible, d'autres centres d'archivages restent à explorer ou à approfondir :

1- Le Fond ancien de la marine 3 jj : Observations scientifiques et géographiques des Archives Nationales. Il est indiqué *"de nombreuses pièces analysées dans cet inventaire ont été depuis lors intégrées dans d'autres séries de la Marine et des Colonies : les cotes sous lesquelles ces documents ont été reclassés n'étant pas indiquées, il est pratiquement impossible de les retrouver, si ce n'est au hasard d'une recherche, le cachet du Service hydrographique permettant de les identifier à coup sûr"*³. C'est le cas notamment pour les cotes 3 JJ 1 à 443. Par exemple, la cote MAR 3JJ159B, découverte par Olivier Sauzereau renferme le *"Journal d'observations de marées de germinal an VIII (mars 1800) à la fin de mars 1806 (31 pièces jointes)"*.

2- Les fonds des manuscrits et archives **du Muséum d'histoire naturelle de Paris**. Les documents les plus anciens remontent à quelques singularités près à la fin du 17^{ème} siècle. Une partie des archives du Muséum ont été versées aux Archives Nationales, où elles sont inventoriées sous la cote **AJ15 1-916**. De nombreux documents, en particulier pour la fin du 19^{ème} siècle et le début du 20^{ème} siècle se trouvent au Muséum et sont inventoriés à la bibliothèque où ils forment le fonds **AM 1-637**. Parmi ces documents se décèlent les procès-verbaux des assemblées des professeurs pour les années 1850-1899 et 1932-1939. Ce fonds des archives est complémentaire avec celui des manuscrits. Contact : **Pascale Heurtel** (pheurtel@mnhn.fr), conservateur des manuscrits.

¹ URL : http://www.bordeaux-port.fr/fr/marees/marees_reseau_maregraphique.asp (consulté le 5 octobre 2008).

² URL : http://www.vigicrues.ecologie.gouv.fr/niv_spc.php?idspc=13 (consulté le 5 octobre 2008).

³ URL : http://www.archivesnationales.culture.gouv.fr/chan/chan/pdf/sa/Etat_des_inventaires_Marine_2007.pdf (consulté le 5 octobre 2008).

3- Les archives se trouvant aux **Directions Départementales de l'équipement – Unité Littorale** [DDE–L]. Successeurs des Ponts et Chaussées, les DDE-L possèdent pour celles les ayant conservés, des archives portant sur des observations de hauteurs d'eau. Généralement, les archives locales des Ponts et Chaussées et des DDE-L ont été versées aux archives départementales concernées.

4- Les **archives départementales** sont un vivier incontournable pour celui qui recherche des observations anciennes du niveau de la mer. Dans tous les départements français de métropole et d'outre-mer, les archives sont organisées en séries selon le même cadre de classement réglementaire. Son principe et son organisation ont été fixés par l'instruction ministérielle du 24 avril 1841. Cependant, par la circulaire AD 98-8 du 18 décembre 1998, la direction des Archives de France a réactualisé l'instruction de 1841 de manière à mettre à jour le classement des archives départementales. Voici la liste des cotes à cibler :

- **Archives anciennes** [jusqu'en 1789] : **Série D** : instructions publiques, sciences et arts ;
- **Archives modernes** [1800-1940] : **Série R** : Affaires militaires, organismes de temps de guerre & **Série S** : Travaux publics et transports [Ponts et Chaussées] ;
- **Archives privées** : **Série F** : Fonds entrés par voie extraordinaire jusqu'en 1994 & **Série J** : Fonds entrés par voie extraordinaire jusqu'en 1994.

Vingt-six départements français sont limitrophes de la mer. La liste suivante rassemble les vingt et un d'entre eux qui n'ont pas encore été dépouillés avec adresse, numéro de téléphone et l'adresse électronique :

Département 59 : Nord

Adresse postale : Archives
départementales du Nord - 22 rue Saint-
Bernard - 59000 Lille
Email : archivedep@cg59.fr
Téléphone : 03.20.85.31.50.

Département 62 : Pas-de-Calais

Adresse postale : Archives
départementales du Pas-de-Calais - 1 rue
du 19 mars 1962 - 62000 Dainville
Email :
Téléphone : 03.21.71.10.90.

Département 80 : Somme

Adresse postale : Archives
départementales de la Somme - 61, rue St-
Fuscien - 80000 Amiens
Email :
Téléphone : 03.22.71.86.00

Département 76 : Seine-Maritime

Adresse postale : Archives
départementales de Seine-Maritime -
Cours Clemenceau - 76101 Rouen Cedex
Email :
Téléphone : 02.35.03.54.95.

Département 27 : Eure

Adresse postale : Archives
départementales de l'Eure – 2 Rue de
Verdun - 27025 Evreux
Email :
Téléphone : 02.32.31.50.84 ou
02.32.31.50.85.

Département 14 : Calvados

Adresse postale : Archives
départementales du Calvados - 61 rue
Lion-sur-Mer - 14000 Caen
Email :
Téléphone : 02.31.94.70.85.

Département 50 : Manche

Adresse postale : Archives
départementales de la Manche - 103 rue
Maréchal Juin - BP 540 - 50010 Saint-Lô
cedex
Email : archives@cg50.fr
Téléphone : 02.33.75.10.10.

Département 22 : Côtes d'Armor

Adresse postale : Archives
départementales des Côtes-d'Armor - 7, rue

François-Merlet - 22000 Saint-Brieuc

Email :

Téléphone : 02.96.78.78.77.

Département 56 : Morbihan

Adresse postale : Archives

départementales du Morbihan - BP 405.

80, rue des Vénètes - 56010 Vannes

Cedex.

Email : archives@cg56.fr

Téléphone : 02.97.46.32.52.

Département 44 : Loire-Atlantique

Adresse postale : Archives

départementales de Loire-Atlantique - 6

rue de Bouillé - BP 23505 - 44035 Nantes
cedex 1

Email : archives@cg44.fr

Téléphone : 02.51.72.93.20.

Département 85 : Vendée

Adresse postale : Archives

Départementales de la Vendée - 14, rue

Haxo - BP 34 - 85 001 La Roche-sur-Yon
Cedex

Email : http://archives.vendee.fr/nous_ecrire/

Téléphone : 02.51.37.71.33.

Département 33 : Gironde

Adresse postale : Archives

départementales de Gironde - 13-25, rue
d'Aviau - 33000 Bordeaux

Email : archives.gironde@cg33.fr

Téléphone : 05.56.29.18.16.

Département 40 : Landes

Adresse postale : Archives

départementales des Landes - 4, impasse
Montrevel - 40000 Mont-de-Marsan

Email : archives@cg40.fr

Téléphone : 05.58.05.40.40.

Département 64 : Pyrénées-Atlantiques

Adresse postale : Service départemental
des archives des Pyrénées-Atlantiques -

Boulevard Tourasse - 64000 Pau

Email : archives@cg64.fr

Téléphone : 05.59.84.97.60.

Département 66 : Pyrénées-Orientales

Adresse postale : Archives

départementales des Pyrénées-Orientales -

74, av Paul Alduy - BP 948 - 66020

Perpignan cedex

Email : archives66@cg66.fr

Téléphone : 04.68.54.60.39.

Département 11 : Aude

Adresse postale : Archives
départementales de l'Aude - Avenue
Claude Bernard - Plateau de Grazailles -
11000 Carcassonne

Email : archives@cg11.fr

Téléphone : 04.68.11.31.54.

Département 30 : Gard

Adresse postale : Archives
Départementales du Gard - 20 rue des
Chassaintes - 30000 Nîmes

Email :

Téléphone : 04.66.67.23.95.

Département 83 : Var

Adresse postale : Archives
départementales du Var - BP 277 - 157,
avenue Alphonse Daudet - 83007
Draguignan Cedex 07

Email :

Téléphone : 04.98.10.22.40.

Département 06 : Alpes-Maritimes

Adresse postale : Archives et
documentation historique - Bâtiment
Grand Capelet - 06206 Nice Cedex 3

Email : dad@cg06.fr

Téléphone : 04.97.18.61.71.

Département 2A : Corse-du-Sud

Adresse postale : ARCHCd2A@sitec.fr

Email : Archives départementales
de Corse-du-Sud - Les Salines - rue
François Pietri - 20090 Ajaccio

Téléphone : 04.95.29.14.26.

Département 2B : Haute-Corse

Adresse postale : Archives
Départementales de la Haute-Corse - Hôtel
du Département - Rond-point du Maréchal
Leclerc - 20405 BASTIA Cedex

Email : ARCHIVES2B@mic.fr

Téléphone : 04.95.55.55.77.

4- Les **archives municipales**. Pour chaque ville balnéaire, dépouiller les archives municipales peut permettre de retrouver des mesures du niveau de la mer. Tout comme les archives départementales, les archives municipales ont le même système de classification partout en France. Voici les cotes à privilégier :

- **Archives anciennes** [jusqu'en 1790] : **Série DD**, Biens communaux, travaux publics, voirie ; **Série EE**, Affaires militaires ; **Série HH**, Agriculture, industrie, commerce ; **Série II**, Documents divers ;

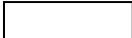
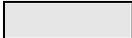
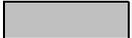
- **Archives modernes** [1790-1974] : **Série H**, Affaires militaires ; **Série O**, Travaux publics, voirie, moyens de transport, régime des eaux ; **Série R**, Instruction publique, sciences, lettres et arts.

Il est probable que d'autres centres d'archivages existent et sont ici oubliés. Les contraintes pour dépouiller les archives sont nombreuses mais c'est la seule manière de retrouver des mesures de hauteurs d'eau "historiques".

Annexe B : Pourcentages des observations du niveau de la mer disponibles au format numérique pour Brest.

Cette annexe fait état pour chaque année, du pourcentage des observations disponibles au format numérique. Plusieurs types de mesures sont pris en considérations : les observations horaires, les mesures de PM et de BM, les données de PM ou de BM, les PM diurnes associées aux BM diurnes et les PM nocturnes associées aux BM nocturnes.

Afin d'avoir une vision globale de l'ensemble, un code de couleurs a été mis en place afin d'avoir une estimation rapides rapidement des pourcentages d'observations annuelles :

-  Entre 00 et 24% d'observations.
-  Entre 25 et 49% d'observations.
-  Entre 50 et 74% d'observations.
-  Entre 75 et 100% d'observations.

année	Horaire	PBM	PBM diurne	PBM nocturne	PM	BM
1711	0	36	45	26	52	20
1712	0	62	81	43	88	37
1714	0	63	81	44	86	40
1715	0	70	88	50	98	42
1716	0	53	67	38	74	32
1757	0	0	0	0	42	0
1758	0	0	0	0	97	0
1759	0	0	0	0	97	0
1760	0	0	0	0	95	0
1761	0	0	0	0	95	0
1762	0	0	0	0	90	0
1763	0	0	0	0	87	0
1764	0	0	0	0	99	0
1765	0	0	0	0	98	0
1766	0	0	0	0	98	0
1767	0	0	0	0	98	0
1768	0	0	0	0	98	0
1769	0	0	0	0	98	0
1770	0	0	0	0	97	0
1771	0	0	0	0	98	0
1772	0	0	0	0	95	0
1773	0	0	0	0	98	0
1774	0	0	0	0	98	0
1775	0	0	0	0	98	0
1776	0	0	0	0	99	0
1777	0	0	0	0	97	0
1778	0	0	0	0	88	0
1779	0	0	0	0	99	0
1780	0	0	0	0	99	0
1781	0	0	0	0	98	0
1782	0	0	0	0	99	0
1783	0	0	0	0	99	0
1784	0	0	0	0	99	0
1785	0	0	0	0	99	0
1786	0	0	0	0	99	0
1787	0	0	0	0	99	0
1788	0	0	0	0	99	0
1789	0	0	0	0	99	0
1790	0	0	0	0	98	0
1791	0	0	0	0	99	0
1792	0	0	0	0	98	0
1807	0	58	96	16	60	56
1808	0	58	97	16	60	56
1809	0	57	97	15	59	55
1810	0	57	97	15	60	55
1811	0	56	97	13	58	54
1812	0	64	99	27	65	63
1813	0	67	98	35	67	68
1814	0	71	99	42	71	72
1815	0	71	99	40	71	70

année	Horaire	PBM	PBM diurne	PBM nocturne	PM	BM
1816	0	75	99	49	75	75
1817	0	76	99	51	76	76
1818	0	75	100	50	75	76
1819	0	75	99	50	75	75
1820	0	76	99	52	76	76
1821	0	77	99	54	78	76
1822	0	69	98	39	71	68
1823	0	78	99	56	80	77
1824	0	77	99	53	78	75
1825	0	79	100	57	80	78
1826	0	78	99	55	79	77
1827	0	79	100	56	78	80
1828	0	78	99	55	78	78
1829	0	78	100	56	79	78
1830	0	72	98	44	70	74
1831	0	69	99	37	67	70
1832	0	72	99	42	71	72
1833	0	70	99	39	69	70
1834	0	70	99	39	69	71
1835	0	73	100	44	73	72
1836	0	22	32	12	23	22
1837	0	40	41	40	41	40
1846	99	99	99	99	99	99
1847	95	100	100	100	100	100
1848	100	100	100	100	100	100
1849	100	100	100	100	100	100
1850	100	100	100	100	100	100
1851	100	100	100	100	100	100
1852	95	100	100	100	100	100
1853	100	100	100	100	100	100
1854	100	100	100	100	100	100
1855	100	100	100	100	100	100
1856	100	100	100	100	100	100
1857	41	41	41	41	41	41
1859	10	10	10	10	10	10
1860	72	83	84	84	83	83
1861	97	97	97	97	97	97
1862	95	95	95	95	95	95
1863	67	67	67	67	67	66
1864	84	84	84	84	84	84
1865	100	100	100	100	100	100
1866	100	100	100	100	100	100
1867	94	94	94	94	94	94
1868	95	96	96	96	95	96
1869	100	100	100	100	100	100
1870	100	100	100	100	100	100
1871	100	100	100	100	100	100
1872	98	98	98	98	98	98
1873	100	100	100	100	100	100
1874	97	97	97	97	97	97

année	Horaire	PBM	PBM diurne	PBM nocturne	PM	BM
1875	100	100	100	100	100	100
1876	100	100	100	100	100	100
1877	92	91	92	91	91	91
1878	91	91	91	91	91	91
1879	100	100	100	100	100	100
1880	100	100	100	100	100	100
1881	100	100	100	100	100	100
1882	100	100	100	100	100	100
1883	100	100	100	100	100	100
1884	100	100	100	100	100	100
1885	100	100	100	100	100	100
1886	100	100	100	100	100	100
1887	100	100	100	100	100	100
1888	100	100	100	100	100	100
1889	100	100	100	100	100	100
1890	100	100	100	100	100	100
1891	93	93	93	93	93	93
1892	100	100	100	100	100	100
1893	100	100	100	100	100	100
1894	100	100	100	100	100	100
1895	100	100	100	100	100	100
1896	100	100	100	100	100	100
1897	83	100	100	100	100	100
1898	100	100	100	100	100	100
1899	100	100	100	100	100	100
1900	100	100	100	100	100	100
1901	100	100	100	100	100	100
1902	100	100	100	100	100	100
1903	100	100	100	100	100	100
1904	100	100	100	100	100	100
1905	100	100	100	100	100	100
1906	100	100	100	100	100	100
1907	92	92	92	92	92	92
1908	100	100	100	100	100	100
1909	100	100	100	100	100	100
1910	96	96	96	96	96	96
1911	98	98	98	98	98	98
1912	100	100	100	100	100	100
1913	100	100	100	100	100	100
1914	100	100	100	100	100	100
1915	100	100	100	100	100	100
1916	100	100	100	100	100	100
1917	91	91	91	91	91	91
1918	100	100	100	100	100	100
1919	100	100	100	100	100	100
1920	99	99	99	99	99	99
1921	100	100	100	100	100	100
1922	90	98	98	98	98	98
1923	98	97	98	98	98	97
1924	100	100	100	100	100	100

année	Horaire	PBM	PBM diurne	PBM nocturne	PM	BM
1925	100	100	100	100	100	100
1926	100	100	100	100	100	100
1927	100	100	100	100	100	100
1928	100	100	100	100	100	100
1929	100	100	100	100	100	100
1930	100	100	100	100	100	100
1931	100	100	100	100	100	100
1932	100	100	100	100	100	100
1933	100	100	100	100	100	100
1934	100	100	100	100	100	100
1935	100	100	100	100	100	100
1936	100	100	100	100	100	100
1937	83	83	83	83	83	83
1938	0	99	99	99	99	99
1939	100	100	100	100	100	100
1940	98	98	98	98	98	98
1941	100	100	100	100	100	100
1942	100	100	100	100	100	100
1943	100	100	100	100	100	100
1944	33	33	33	33	33	33
1952	25	25	25	25	25	25
1953	100	100	100	100	100	100
1954	100	100	100	100	100	100
1955	100	100	100	100	100	100
1956	100	100	100	100	100	100
1957	100	100	100	100	100	100
1958	100	100	100	100	100	100
1959	100	100	100	100	100	100
1960	100	100	100	100	100	100
1961	100	100	100	100	100	100
1962	100	100	100	100	100	100
1963	100	100	100	100	100	100
1964	100	100	100	100	100	100
1965	100	100	100	100	100	100
1966	100	100	100	100	100	100
1967	100	100	100	100	100	100
1968	100	100	100	100	100	100
1969	100	100	100	100	100	100
1970	100	100	100	100	100	100
1971	100	100	100	100	100	100
1972	100	100	100	100	100	100
1973	100	100	100	100	100	100
1974	100	100	100	100	100	100
1975	100	100	100	100	100	100
1976	100	100	100	100	100	100
1977	100	100	100	100	100	100
1978	100	100	100	100	100	100
1979	100	100	100	100	100	100
1980	87	87	87	87	87	87
1981	98	98	98	98	98	98

année	Horaire	PBM	PBM diurne	PBM nocturne	PM	BM
1982	89	89	89	89	89	89
1983	100	100	100	100	100	100
1984	100	100	100	100	100	100
1985	100	100	100	100	100	100
1986	100	100	100	100	100	100
1987	100	100	100	100	100	100
1988	100	100	100	100	100	100
1989	100	100	100	100	100	100
1990	100	100	100	100	100	100
1991	100	100	100	100	100	100
1992	100	100	100	100	100	100
1993	98	97	98	98	97	97
1994	100	100	100	100	100	100
1995	100	100	100	100	100	100
1996	100	100	100	100	100	100
1997	100	100	100	100	100	100
1998	100	100	100	100	100	100
1999	100	100	100	100	100	100
2000	99	99	99	99	99	99
2001	100	100	100	100	100	100
2002	100	100	100	100	100	100
2003	100	100	100	100	100	100
2004	100	100	100	100	100	100
2005	100	100	100	100	100	100
2006	100	100	100	100	100	100
2007	100	100	100	100	100	100

Tab. B.1. – Pourcentages des mesures du niveau de la mer observées à Brest et disponibles au format numérique (code des couleurs / % d'observations. Blanc : entre 0 et 24% ; gris très clair : entre 25 et 49% ; gris : entre 50 et 74% ; gris foncé : 75 et 100%). Les années en gras signifient que 100% des observations sont disponibles.

Annexe C : Erreurs détectées dans l'ouvrage contenant les *Observations des marées faites à la mâture et au bassin dans le port de Brest 1807-1835* publiée par le Bureau des Longitudes en 1843.

Cette annexe fait le bilan des erreurs détectées dans l'ouvrage publié par Savary et al. (1843) à la demande du Bureau des Longitudes.

Trois types d'erreur de saisies sont détectées : erreur en temps, erreur en hauteur et erreur sur l'indice "m" pour matin et "s" pour soir.

L'annexe renferme deux tableaux : le premier fait état des corrections apportées pour les observations réalisées à la mâture tandis que le second contient les modifications pour les mesures effectuées au bassin de Brest. Les deux tableaux précisent les observations qui sont modifiées avec leur date, heure et hauteur indiquée sur le registre ainsi que la correction apportée.

Année	Mois	Jour	n° jour	heure (registre)	hauteur (registre)	origine de l'erreur - Correction		
						m - s	hauteur	temps
1807	2	27	58	06:48 m	3,875		2,875	
1807	3	27	86	00:02 m	3,045	m -> s		
1807	3	28	87	00:47 m	2,47	m -> s		
1807	5	8	128	10:00 m	1,49		2,49	
1807	6	25	176	06:40 m	2,905		1,905	
1807	8	27	239	03:44 s	1,86		0,86	
1807	9	28	271	11:59 m	2,14			00:59 s
1807	11	10	314	00:39 s	2,14		1,14	
1808	3	3	63	06:52 m	3,82		1,82	
1808	3	4	64	07:32 m	3,47		1,47	
1808	3	5	65	08:10 m	3,1		1,1	
1808	3	13	73	04:22 s	2,515		3,515	
1808	3	24	84	08:04 m	3,41		2,41	
1808	6	18	170	05:17 s	1,535	s-> m		
1808	7	12	194	11:35 m	2,395			00:35 s
1808	8	28	241	02:35 s	2,79		1,79	
1809	1	8	8	07:39 m	3		2,3	
1809	4	11	101	07:11 m	1,335		2,335	
1809	4	27	117	01:49 s	1,495		2,495	
1809	4	28	118	02:35 s	2,025		3,025	
1809	4	29	119	03:20 s	2,225		3,225	
1809	4	30	120	04:01 s	2,365		3,365	
1809	5	4	124	06:40 m	6,52		2,52	
1809	5	19	139	00:37 s	2,819		1,819	
1809	5	26	146	06:55 m	1,19		2,19	
1809	5	30	150	04:07 m	2,32		3,32	

Année	Mois	Jour	n° jour	heure (registre)	hauteur (registre)	origine de l'erreur - Correction		
						m - s	hauteur	temps
1809	5	31	151	10:10 m	3,125			11:10 m
1809	6	2	153	06:25 m	3,895		2,895	
1809	6	5	156	09:19 m	2,42		1,42	
1809	6	6	157	10:27 m	2,74		1,74	
1809	6	15	166	05:12 s	3,395		2,395	
1809	6	22	173	10:19 m	2,52		1,52	
1809	6	24	175	06:52 s	1,405		2,405	
1809	7	13	194	04:14 s	1,485		2,485	
1809	8	3	215	02:59 s	2,26		1,26	
1809	9	21	264	02:11 s	6,625		2,625	
1809	9	24	114	10:12 m	2,075		3,075	
1809	12	15	349	05:54 s	1,18			04:54 s
1810	1	31	31	00:04 s	1,495			11:44 m
1810	2	22	53	11:25 m	2,015		3,015	
1810	3	19	78	08:52 m	1,42		2,42	
1810	4	26	116	03:10 s	2,7		1,7	
1810	5	19	139	09:47 m	2,135		3,135	
1810	5	27	147	05:51 s	1,94			04:51 s
1810	5	29	149	07:16 m	2,275	m -> s		
1810	7	1	182	03:04 s	2,515			03:40 s
1810	7	31	212	08:41 m	2,3			09:41 m
1810	8	12	224	01:12 s	1,41		2,41	
1810	9	1	244	04:05 m	2,875			04:50 m
1810	9	25	268	07:43 m	2,87		1,87	
1810	10	2	275	04:41 m	2,83			05:41 m
1810	10	19	292	08:01 m	2,72		1,72	
1811	1	31	31	02:37 s	1,14		2,14	
1811	2	28	59	07:12 m	3,885		2,885	
1811	3	5	62	05:12 s	1,605			00:12 s
1811	4	12	102	05:56 m	2,755	m -> s		
1811	5	3	123	06:05 m	2,26		1,26	
1811	8	28	240	10:30 m	1,31			09:30 m
1811	9	23	266	00:57 s	2,97		1,97	
1811	10	14	287	08:04 m	1,025		2,025	
1811	10	22	295	00:47 s	2,74		1,74	
1811	11	4	308	06:04 m	2,095		3,095	

Tab. C.1. – Inventaire des erreurs détectées pour les observations réalisées entre 1807 et 1811 à la mâturation (hauteurs exprimées en mètres).

Le tableau C.2 est complété par la colonne "*confirm. source*" pour "confirmation source" qui signale si la correction apportée est confirmée par le registre original trouvé aux Archives Nationales¹.

¹ Cote : MAR 3JJ 153.

Année	Mois	Jour	n° jour	heure (registre)	hauteur (registre)	origine de l'erreur - Correction			confirm. source
						m - s	hauteur	temps	
1810	1	28	28	01:35 s	2,516			02:35 s	non
1810	1	31	41	06:26 m	2,373			05:26 m	non
1810	9	16	259	05:04 m	7,471			05:40 m	non
1810	11	10	315	03:04 m	8,067		7,067		non
1812	2	11	42	08:53 m	1,732	m -> s			non
1812	6	7	159	09:52 m	1,698			07:52 m	non
1812	7	17	199	03:51 m	3,125	m -> s			non
1812	7	27	209	11:34 m	1,117	s -> m			non
1812	7	28	210	11:24 m	1,637			00:44 s	non
1813	23	5	143	09:11 m	6,443		5,443		non
1813	6	1	152	10:30 m	1,136			11:30 m	non
1813	7	1	182	11:56 m	2,57		1,57		non
1813	8	7	219	00:07 m	5,739	m -> s			non
1813	12	3	337	06:48 m	3,322			05:48 m	non
1813	12	9	343	19:46 m	1,082			10:46 m	non
1814	4	27	117	03:45 s	3,727		2,727		non
1814	6	16	167	08:2 s	2,447		1,447		non
1814	7	13	194	11:56 s	6,125	s -> m			non
1814	8	5	217	00:10 s	1,003		2,003		non
1814	9	4	247	06:39 s	8,256		7,256		non
1814	9	11	252	08:30 m	2,186			07:30 m	non
1814	9	18	261	01:47 s	1,854			00:47 s	non
1814	10	17	290	00:02 s	1,841	s -> m			non
1815	7	25	206	05:20 m	2,07	m -> s			non
1815	7	26	207	06:34 m	7,313		6,313		non
1815	9	22	265	06:20 m	1,949	m -> s			non
1815	11	26	330	00:08 s	7,313		6,313		non
1815	11	30	334	07:20 m	1,488	m -> s			non
1816	4	24	115	02:15 m	6,5	m -> s			non
1816	6	1	153	01:30 m	2,3	m -> s			non
1816	9	10	283	00:00 m	2	m -> s			non
1817	9	19	262	03:43 s	3,1			04:43 s	non
1817	9	23	266	08:54 m	1,62	m -> s			non
1817	11	4	101	05:12 s	2,83			06:12 s	non
1817	12	25	359	11:02 m	2,06	m -> s			non
1818	2	17	48	00:26 s	5,87			01:26 s	non
1818	2	19	50	09:08 m	2,08	m -> s			non
1818	3	26	85	10:11 m	1,3			00:11 s	non
1818	4	17	107	01:30 m	6,6	m -> s			non
1818	7	7	188	11:52 s	2,3	s -> m			non
1818	7	9	190	09:07 m	6,23			07:09 m	non
1818	9	2	252	10:02 s	1,35			11:02 s	non
1818	11	15	319	11:07 s	2,2	s -> m			non
1818	11	23	327	06:04 m	3,02	m -> s			non
1819	2	14	45	00:00 m	1,719	m -> s			non
1819	4	14	104	00:12 m	2,057	m -> s			non
1819	4	28	118	00:00 m	2,274	m -> s			non
1819	5	14	134	00:55 s	1,091		2,091		non
1819	6	17	198	05:26 m	3,328		2,328		non

Année	Mois	Jour	n° jour	heure (registre)	hauteur (registre)	origine de l'erreur - Correction			confirm. source
						m - s	hauteur	temps	
1819	7	31	212	03:45 m	2,95	m -> s			non
1819	8	14	226	04:30 s	2,234		3,234		non
1819	8	15	227	05:42 s	1,18		3,18		non
1819	9	6	249	11:23 s	0,46		0,96		non
1819	9	19	262	09:22 m	1,786			09:42 m	non
1819	12	8	312	07:45 m	7,982		5,982		non
1820	1	6	6	00:45 m	6,421			06:45 m	oui
1820	1	24	24	04:53 s	2,193		3,193		oui
1820	5	6	127	09:12 m	5,711			10:12 m	oui
1820	5	22	143	05:03 m	2,991			05:30 m	oui
1820	5	28	149	04:50 s	7,187			04:05 s	oui
1820	6	8	160	01:30 s	6,604	s -> m			oui
1820	6	10	162	03:11 m	Illisible		6,822		oui
1820	6	30	182	06:54 s	6,173		3,193		oui
1820	7	1	183	07:22 s	6,685			07:42 s	oui
1820	7	3	185	09:00 m	7,846		5,846		oui
1820	9	23	267	10:42 s	0,677		0,487		oui
1820	9	24	268	11:03 m	0,487		0,799		oui
1820	9	24	268	05:13 s	7,658		8,121		oui
1820	9	24	268	11:23 s	0,799		0,758		oui
1820	9	25	269	05:32 m	8,121		7,701		oui
1820	9	25	269	11:43 m	0,758		1,002		oui
1820	9	25	269	05:53 s	7,701		7,701		oui
1820	9	26	270	00:04 m	1,002		1,137		oui
1820	9	26	270	06:15 m	7,714		7,119		oui
1820	9	26	270	00:26 s	1,137		1,299		oui
1820	9	26	270	06:37 s	7,119		7,145		oui
1820	9	27	271	01:12 s	1,299		1,99		oui
1820	9	28	272	02:06 s	1,99		2,663		oui
1820	9	29	273	03:12 s	2,639		3,112		oui
1820	9	30	274	04:34 s	3,112		3,33		oui
1820	10	10	284	06:15 m	6,971			05:15 m	oui
1820	10	22	296	10:02 m	1,624		1,024		oui
1820	10	30	304	05:18 s	Illisible		3,357		oui
1820	12	12	347	08:03 m	6,604			08:30 m	oui
1820	12	25	360	01:15 s	3,099		2,721		oui
1820	12	30	365	05:38 s	3,153			06:36 s	oui
1821	2	4	35	11:21 s	0,705		1,056		oui
1821	3	1	60	01:30 s	5,635		6,538		oui
1821	7	21	202	01:05 s	2,03			01:50 s	oui
1821	11	4	308	04:07 s	3,25			05:07 s	oui
1821	11	27	331	00:12 m	2,19			11:12 m	oui
1822	1	21	21	08:55 m	2,275	m -> s			oui
1822	2	2	33	05:12 m	2,87			05:52 m	oui
1822	3	10	69	11:07 s	1,625			11:17 s	oui
1822	4	17	107	06:04 m	4,855		2,832		oui
1822	4	22	112	04:15 s	0,065		8,065		oui
1822	5	6	126	03:40 m			7,038		oui
1822	5	31	151	05:50 s	2,68			06:10 s	oui
1822	6	3	154	09:55 s	2,14			09:25 s	oui

Année	Mois	Jour	n° jour	heure (registre)	hauteur (registre)	origine de l'erreur - Correction			confirm. source
						m - s	hauteur	temps	
1822	6	17	168	07:45 m	1,355		2,003		oui
1822	7	16	197	07:34 s	2,054			07:44 s	oui
1822	7	19	200	04:45 s	7,471			04:17 s	oui
1822	7	28	209	05:00 s	3,437			05:05 s	oui
1822	9	8	251	02:10 s	2,679			02:40 s	oui
1822	9	28	271	07:54 m	3,139		2,49		oui
1822	10	5	278	01:45 s	2,111			01:00 s	oui
1823	2	1	32	07:18 m	7,092		6,768		oui
1823	3	7	66	06:18 s	7,681		3,681		oui
1823	3	14	73	11:58 s	1,137			10:58 s	oui
1823	4	20	110	05:52 s	2,463	s -> m			oui
1823	4	26	116	04:43 s	7,308			04:23 s	oui
1823	6	12	163	01:18 s	1,434			00:18 s	oui
1823	9	6	249	11:00 s			0,866		oui
1823	9	20	263	03:03 m	6,93			03:33 m	oui
1823	11	24	328	02:34 s	3,355		2,355		oui
1824	2	12	43	01:37 m	6,605	m -> s			oui
1824	5	19	140	07:03 m	5,847			07:31 m	oui
1824	7	8	190	01:10 s	6,388			01:30 s	oui
1824	7	16	198	06:13 s	6,514		6,469	06:43 s	oui
1824	8	11	224	10:49 m	1,705	m -> s			oui
1824	8	15	228	01:35 s	2,463			06:35 s	oui
1824	9	2	246	05:18 m	3,329			04:18 m	oui
1824	10	10	284	11:14 m	2,49	m -> s			oui
1824	12	9	344	05:23	7,389	m			oui
1825	1	18	18	03:27 m	7,957		6,957		oui
1825	3	5	64	10:10 s	1,704		0,704		oui
1825	3	12	71	09:11 m	6,44		5,44		oui
1825	4	1	91	08:28 m	1,326	m -> s			oui
1825	6	22	173	01:49 m	2,111	m -> s			oui
1825	7	11	192	10:46 m	5,684			11:46 m	oui
1825	11	27	331	11:08 m	2,003	m -> s			oui
1825	12	9	343	02:50 m	6,687		7,687		oui
1825	12	12	346	11:48 m	1,569	m -> s			oui
1826	1	1	1	02:05 s	2,68			02:50 s	oui
1826	1	23	23	03:48 m	6,849			03:00 m	oui
1826	3	20	80	08:48 m	2,626			06:48 m	oui
1826	5	25	146	00:33 s	1,186		1,786		oui
1826	5	27	148	01:17 s	2,165		2,518		oui
1826	6	20	171	04:18 s	1,002			10:18 s	oui
1826	7	7	189	04:22 m	6,957			04:42 m	oui
1826	7	21	203	10:16 s	1,137			11:16 s	oui
1826	7	29	211	11:07 s	5,44	s -> m			oui
1826	9	7	251	07:34 s	6,876			07:24 s	oui
1826	9	15	258	09:27 m	1,542	m -> s			oui
1826	10	14	287	04:45 m	6,74			02:45 m	oui
1826	10	17	290	10:43 s	1,84	s -> m			oui
1826	11	4	308	00:41 s	1,542	s -> m			oui
1827	2	21	52	10:31 m	6,036			11:38 m	oui
1827	4	18	108	09:29 m	6,226			08:29 m	oui

Année	Mois	Jour	n° jour	heure (registre)	hauteur (registre)	origine de l'erreur - Correction			confirm. source
						m - s	hauteur	temps	
1827	5	27	147	10:08 s	2,003			11:08 s	oui
1827	6	25	176	04:27 m	6,794	m -> s			oui
1827	9	18	261	08:19 s	1,03		2,03		oui
1827	11	6	310	04:05 m	6,903			04:51 m	oui
1827	12	11	345	02:52 s	2,302		3,302		oui
1828	1	2	2	10:07 m	2,219	m -> s			oui
1828	1	5	5	05:36 m	6,903	m -> s			oui
1828	2	17	17	04:59 m	6,418		8,418		oui
1828	4	2	93	11:18 m	1,434	s -> m			oui
1828	5	1	122	10:40 s	1,245	s -> m			oui
1828	7	1	183	00:16 m	1,191	s -> m			oui
1828	8	31	244	07:41 s	6,442	s -> m			oui
1829	1	7	7	00:13 m	1,95		j.8 au lieu de j.7		oui
1829	3	1	60	11:59 s	6,009	s -> m			oui
1829	3	7	66	11:32 m	0,704	m -> s			oui
1829	5	23	143	06:31 s	6,74	s -> m			oui
1829	10	18	291	01:08 s	2,409			01:55 s	oui
1829	11	9	313	01:00 m	7,092			01:46 m	oui
1830	1	9	9	09:04 m	1,326			10:04 m	oui
1830	3	5	64	07:07 s	2,707	s -> m			oui
1830	5	5	125	08:45 m	2,138	m -> s			oui
1830	5	27	147	07:56 s	6,497			07:36 s	oui
1830	6	25	176	06:45 m	7,767		6,767		oui
1830	6	25	176	07:07 s	7,578		6,578		oui
1830	7	31	202	04:56 m	7,146			04:36 m	oui
1830	7	31	212	06:23 s	2,896			07:02 s	oui
1830	11	17	321	11:01 m	2,165	m -> s			oui
1830	12	30	364	04:25 s	8,202		7,498		oui
1831	1	13	13	03:57 s	6,794			03:27 s	oui
1831	1	20	20	04:12 s	2,707			02:12 s	oui
1831	1	21	21	03:13 s	3,194		2,924		oui
1831	1	25	25	01:04 s	6,713			01:36 s	oui
1831	1	30	30	05:27 m	7,741			05:06 m	oui
1831	2	12	43	03:49 m	7,092			03:30 m	oui
1831	3	13	62	09:16 s	1,488			09:46 s	oui
1831	4	11	101	08:51 m	2,111		1,462		oui
1831	4	14	104	11:23 m	0,92	m -> s			oui
1831	4	28	118	10:58 s	2,355		2,165		oui
1831	4	29	119	11:14 m	2,165		2,355		oui
1831	5	12	132	03:56 m	7,85		7,822	03:37 m	oui
1831	6	20	171	00:03 s	6,009			00:30 s	oui
1831	7	9	190	03:51 s	7,471			03:70 s	oui
1831	8	12	224	00:49 s	2,544		1,57		oui
1831	8	15	227	08:34 m	6,874		5,874		oui
1831	8	16	228	03:55 m	3,275	m -> s			oui
1831	10	21	294	03:10 s	7,741			03:40 s	oui
1831	10	23	296	11:02 s	1,191	s -> m			oui
1831	11	10	315	10:43 m	6,199			06:43 m	oui
1831	12	7	341	05:17 m	7,714		7,39		oui
1831	12	12	346	08:54 m	6,874		5,874		oui

Année	Mois	Jour	n° jour	heure (registre)	hauteur (registre)	origine de l'erreur - Correction			confirm. source
						m - s	hauteur	temps	
1831	12	12	346	03:10 s	3,708		3,682		oui
1832	2	3	34	04:56 m	7.065	m -> s			oui
1832	3	24	84	03:13 s	2.463		3.263		oui
1832	6	28	180	03:13 s	7.389			03:43 s	oui
1832	6	29	181	11:29 m	1.137			10:29 m	oui
1832	7	2	184	06:12 m	7.028			06:42 m	oui
1832	7	11	193	09:21 m		m -> s			oui
1832	8	3	216	08:14 m	6.199			08:44 m	oui
1832	8	28	241	05:57 s				05:37 s	oui
1832	9	19	263	10:52 m	6.657		5.657		oui
1832	12	1	336	04:58 s	3.248			04:38 s	oui
1832	12	30	365	09:00 m	6.684		5.766		oui
1832	12	31	366	10:01 m	6.684		5.684		oui
1833	1	30	30	04:27 m	2,978	m -> s		04:37 s	oui
1833	2	4	35	03:59 s	7,471			03:39 s	oui
1833	3	23	82	11:23 m	1,542	m -> s			oui
1833	3	30	89	10:39 s	5,765	s -> m			oui
1833	4	18	108	03:04 m	6,903	m -> s			oui
1833	4	19	109	09:37 s	1,624	s -> m			oui
1833	5	9	129	07:24 m	6,28	m -> s			oui
1833	5	10	130	07:49 s	5,819	s -> m			oui
1833	7	2	183	04:55 s	6,957			03:55 s	non
1833	8	7	220	07:52 m	6,117	m -> s		07:52 s	non
1833	8	21	233	01:17 s	6,551			08:17 s	non
1833	8	24	236	05:45 m	3,032			04:45 m	non
1833	10	14	287	11:46 s	1,002			10:46 s	oui
1833	10	19	292	05:19 m	2,788			06:19 m	oui
1833	11	27	331	04:43 s	7,416			03:43 s	oui
1833	12	24	358	08:00 s	2,842	s -> m			oui
1833	12	25	359	09:04 m	1,976	m -> s			oui
1833	12	28	362	04:48 m	7,254			04:28 m	oui
1833	12	31	365	01:54 s	1,84			01:14 s	oui
1834	1	10	10	10:19 s	2,219	s -> m			oui
1834	2	7	38	02:23 s	6,632			03:23 s	oui
1834	3	1	60	07:04 m	6,74			07:41 m	oui
1834	3	9	68	03:40 m	6,659	m -> s			oui
1834	3	25	84	02:22 s	0,704			10:22 s	oui
1834	3	30	89	07:18 m	7,767		6,767		oui
1834	4	2	92	05:49 s	3,194			04:59 s	oui
1834	4	3	93	05:46 m	2,599		2,924		oui
1834	4	25	115	05:03 m	7,714	m -> s			oui
1834	6	14	165	08:51 s	6,226	s -> m			oui
1834	6	19	170	02:11 m	7,011	m -> s			oui
1834	6	29	180	04:42 s	3,113			03:42 s	oui
1834	7	22	203	11:22 m	1,705	m -> s			oui
1834	7	27	208	02:22 s	2,815			02:02 s	oui
1834	8	20	232	04:37 s	6,281		7,282		oui
1834	10	29	302	07:07 m	1,084		2,084		oui
1834	11	19	323	06:06 m	6,794			05:06 m	oui
1834	11	30	334	02:52 m	7,06		7,66		oui

Année	Mois	Jour	n° jour	heure (registre)	hauteur (registre)	origine de l'erreur - Correction			confirm. source
						m - s	hauteur	temps	
1834	12	13	347	08:02 m	3,382		2,382		oui
1834	12	17	351	04:15 s	6,767	s -> m			oui
1835	1	4	4	06:58 s	6,578	s -> m			oui
1835	1	9	9	05:51 s	2,221		3,221		oui
1835	1	23	23	04:19 s	2,436			04:59 s	oui
1835	1	31	31	06:44 s	7,119			05:44 s	oui
1835	2	23	54	04:49 s	3,086			05:49 s	oui
1835	3	8	67	03:46 s	2,707		3,207		oui
1835	3	23	82	10:20 m	5,359			11:20 m	oui
1835	5	27	147	03:32 s	6,822	s -> m			oui
1835	6	30	181	00:05 s	6,632			06:35 s	oui
1835	7	11	192	11:34 m	1,515			10:34 m	oui
1835	8	6	218	06:51 m	2,165			07:51 m	oui
1835	9	11	254	06:58 m	7,227			05:58 m	oui
1835	11	22	326	05:02 m	7,714	m -> s			oui
1835	12	29	363	11:48 s	5,684	s -> m			oui

Tab. C.2. – Inventaire des erreurs détectées pour les observations réalisées entre 1810 et 1835 au bassin de Brest (hauteurs exprimées en mètres).

Annexe D : Erreurs dans la transmission des Niveaux Moyens mensuelles (NMm) et Niveaux Moyens annuelles (NMa) de la série de Brest (190091) au PSMSL. Anomalies dans le calcul des NMm et NMa.

En cherchant à vérifier que les NMa de Brest disponibles au PSMSL étaient les mêmes que ceux indiqués dans des registres trouvés au SHOM, j'ai constaté des différences pour certaines années.

Présentation des registres :

Les registres, aux noms de "*Niveaux moyens à Brest*" rassemblent les NMm et NMa entre 1807 et 1835 puis à partir de 1846 jusqu'en 1943. Les calculs ont été réalisés au Service Hydrographique à partir de 1933. Dans les cahiers sont notés les niveaux moyens, les corrections barométriques et les niveaux moyens corrigés des pressions barométriques.

Problèmes rencontrés :

1) Problème d'arrondi.

Les niveaux moyens indiqués sur le PSMSL sont exprimés en millimètre tandis que les mesures sur les registres sont données au dixième de millimètre. Les valeurs indiquées à 0,5mm sont soit arrondies au millimètre au-dessus soit arrondies au millimètre en dessous. Néanmoins, ce genre d'erreur est notablement mineur comparé aux deux suivants.

2) Niveau moyen ou niveau moyen corrigé de la correction barométrique.

Il y a eu très certainement, à la fin des années 1930 et au début des années 1940 une confusion par l'agent chargé d'envoyer au PSMSL les NMm et NMa pour Brest. En effet on retrouve sur le PSMSL, pour les années 1937, et de 1939 à 1943 les NMa et les NMm corrigés de la pression barométrique. Pour toutes les autres années antérieures à 1939 on trouve sur le PSMSL, les niveaux moyens sans aucune correction barométrique. Les tableaux D.1. et D.2. détaillent respectivement les hauteurs de NMa et de NMm du PSMSL avec celles non corrigés et corrigés des registres.

Année	[1] NMa du PSMSL RLR ¹	[2]= [1] – 245,9	[3] NMa registres	[4] NMa corrigé de la pression barométrique des registres
1937	703,6	457,7*	460,2	457,8*
1939	700,3	454,4	454,9	454,4
1940	703,1	457,2*	456,8	457,1*
1941	701,8	455,9	457,2	455,9
1942	704,8	458,9	458,8	458,9
1943	709,1	463,2	459,1	463,2

Tab. D.1. – NMa du PSMSL présentant des différences avec les NMa des registres du SHOM (cm). * problème d'arrondi indiqué précédemment.

La valeur **245,9** cm, différence entre le NMa du PSMSL et le NMa indiqué sur les registres du SHOM est liée au "Revised Local Reference" (RLR) utilisé par le PSMSL. Le RLR est apparu dans les années 1960 pour éliminer les moyennes négatives, difficiles à utiliser avec le développement informatique. Les valeurs du RLR ont été choisies de manière à avoir les niveaux moyens approximativement égaux à 7000mm².

Année mois	[1] NMm PSMSL RLR	[2] = [1] – 245,9	[3] NMm registres	[4] NMa corrigé de la pression barométrique des registres	[5] = [2] – [3]
1937,042	710,8	464,9	471,2	464,9	-6,3
1937,125	707,8	461,9	469,3	461,9	-7,4
1937,208	703,8	457,9	469,5	457,9	-11,6
1937,292	702,1	456,2	459,9	456,2	-3,7
1937,375	699,7	453,8	453,5	453,8	0,3
1937,458	698,7	452,8	448,9	452,8	3,9
1937,542	699	453,1	450,1	453,1	3
1937,625	693,5	447,6	447,4	447,6	0,2
1937,708	701,6	455,7*	456,1	455,6*	-0,5
1937,792	703,2	457,3	458,7	457,3	-1,4
1937,875	722,5	476,6	478	476,6	-1,4
1937,958	702,1	456,2	459,9	456,2	-3,7
1938,042	701,8	455,9	455,9	456,8	0
1938,125	687,5	441,6	441,6	450,4	0
1938,208	690,5	444,6	444,6	454,6	0
1938,292	686	440,1	440,1	449,2	0

¹ Sur le PSMSL, les NMa sont exprimés en mm, la conversion a été réalisée pour faciliter la lecture
URL : <http://www.pol.ac.uk/psmsl/pubi/rlr.annual.data/190091.rlrdata> (consulté le 5 octobre 2008).

² URL : <http://www.pol.ac.uk/psmsl/datainfo/psmsl.hel> et

URL : http://www.icsm.gov.au/tides/SP9/links/IOCVIII_levelling.pdf (consultés le 5 octobre 2008).

1938,375	697,8	451,9	451,9	451,8	0
1938,458	694,4	448,5	448,5	452,7	0
1938,542	696,6	450,7	450,7	451,2	0
1938,625	694,1	448,2	448,2	448,5	0
1938,708	694,1	448,2	448,2	449,9	0
1938,792	706,3	460,4	460,4	461	0
1938,875	716	470,1	470,1	467,7	0
1938,958	715,1	469,2	469,2	464,2	0
1939,042	714,9	469	479,4	469	-10,4
1939,125	694,5	448,6	442,9	448,6	5,7
1939,208	695	449,1	446,6	449,1	2,5
1939,292	696,1	450,2	451,8	450,2	-1,6
1939,375	695	449,1	447,3	449,1	1,8
1939,458	701	455,1	453,3	455,1	1,8
1939,542	692,3	446,4	447,9	446,4	-1,5
1939,625	697,9	452	451,4	452	0,6
1939,708	701,9	456	453,6	456	2,4
1939,792	705,9	460	464,9	460	-4,9
1939,875	705,7	459,8	461	459,8	-1,2
1939,958	703,5	457,6	457,4	457,6	0,2
1940,042	705,7	459,8	459,7	459,8	0,1
1940,125	705,5	459,6	464,2	459,6	-4,6
1940,208	705,8	459,9	461	459,9	-1,1
1940,292	698,3	452,4	455	452,4	-2,6
1940,375	700,9	455	453,4	455	1,6
1940,458	707,3	461,4	457,4	461,4	4
1940,542	689,4	443,5*	443,3	443,4*	0,1
1940,625	700,8	454,9	447	454,9	7,9
1940,708	702,1	456,2	453,3	456,2	2,9
1940,792	709,6	463,7	468,8	463,7	-5,1
1940,875	710,5	464,6	469	464,6	-4,4
1940,958	700,4	454,5	449	454,5	5,5
1941,042	697,9	452	463,5	452	-11,5
1941,125	701,4	455,5	469,7	455,5	-14,2
1941,208	709,8	463,9	469,6	463,9	-5,7
1941,292	698,6	452,7	456,3	452,7	-3,6
1941,375	698,5	452,6	454,4	452,6	-1,8
1941,458	703	457,1	455	457,1	2,1
1941,542	687,8	441,9	442	441,9	-0,1

1941,625	703	457,1	458,7	457,1	-1,6
1941,708	703,9	458	452	458	6
1941,792	704,4	458,5	452,9	458,5	5,6
1941,875	711,3	465,4	467,5	465,4	-2,1
1941,958	701,5	455,6	444,8	455,6	10,8
1942,042	696,1	450,2	449,9	450,2	0,3
1942,125	692,3	446,4	444,5	446,4	1,9
1942,208	700,2	454,3	459,5	454,3	-5,2
1942,292	700	454,1	458,5	454,1	-4,4
1942,375	705,5	459,6*	462,7	459,7*	-2,9
1942,458	703,1	457,2	453,4	457,2	3,8
1942,542	701,1	455,2	452,1	455,2	3,1
1942,625	702	456,1	456,4	456,1	-0,3
1942,708	710,4	464,5	465,2	464,5	-0,7
1942,792	716,4	470,5	470,3	470,5	0,2
1942,875	714,1	468,2	461,2	468,2	7
1942,958	716,4	470,5	471,6	470,5	-1,1
1943,042	715,3	469,4	477,7	469,4	-8,3
1943,125	703,4	457,5	447,4	457,5	10,1
1943,208	706,8	460,9	455,6	460,9	5,3
1943,292	706,3	460,4	452,4	460,4	8
1943,375	706,9	461	456,4	461	4,6
1943,458	707,8	461,9	454,1	461,9	7,8
1943,542	708,6	462,7	459,6	462,7	3,1
1943,625	706,4	460,5	457,9	460,5	2,6
1943,708	709,9	464	461,8	464	2,2
1943,792	721,6	475,7	471,8	475,7	3,9
1943,875	709,6	463,7	459,6	463,7	4,1
1943,958	706,9	461	455	461	6

Tab. D.2. – NMm du PSMSL présentant des différences avec les NMm des registres du SHOM de 1937 à 1943 (cm). * problème d'arrondi indiqué précédemment.

Les différences mensuelles varient de 0,1cm pour janvier et juillet 1940 jusqu'à 14,2cm pour le mois de février 1941.

Le PSMSL a été informé des valeurs incorrectes communiquées dans le passé mais aucune moyenne n'a été, jusqu'à présent, corrigée. Pourtant, avec les NMm correctes, l'ensemble des hauteurs pour les années 1942 et 1943 ne seraient certainement plus considérées comme fausses par le PSMSL et pour cause !

3) NMm calculés à partir d'observations horaires aujourd'hui disparues.

Les NMm des mois de novembre et décembre 1937 ainsi que l'ensemble des mois pour l'année 1938 sont disponibles au PSMSL. Les moyennes sont différentes de celles calculées à partir des hauteurs des PM et BM. Or les hauteurs horaires ont disparu pour ces périodes : ni les marégrammes, ni les registres horaires n'ont été retrouvés. Cela signifie que les NMm du PSMSL de novembre 1937 à décembre 1938 sont les seules moyennes ayant été calculés à partir des hauteurs horaires du niveau de la mer.

4) Problèmes divers.

Calcul de NMM fictifs : l'année 1917 est incomplète. Il manque le NMM du mois de janvier. Or, sur les registres a été calculé un NMm fictif (459,65cm). Ce NMm fictif se retrouve sur le PSMSL. Le NMa de 1917 sur 11 mois d'observation a été calculé sur les registres, sa valeur étant égale à 450,30cm. Or, sur le PSMSL, on trouve comme valeur pour le NMa de cette même année 451,1 cm utilisant de fait, pour calculer le NMa, le NMm fictif du mois de janvier.

Erreur non définit : Cette erreur, tout comme la précédente, n'a été détecté une seule fois pour l'année 1930. Le NMa du PSMSL ne correspond ni au NMa du service hydrographique ni au NMa corrigé de la pression barométrique. En regardant les NMm de cette année, j'ai trouvé que les mois de mars et juin étaient différents d'une source à l'autre. Il apparaît clairement d'après le tableau n°1 que les NMm indiqués sur le PSMSL sont des NMm non corrigés de la pression barométrique.

Année Mois	[1] NMM PSMSL RLR (cm)	[2] NMA registres (cm)	[3] = [1] - [2] (cm)	[4] NMA corrigé de la pression barom. Registres (cm)	[5] = [1] - [4] (cm)
1930.042	712,4	466,5	466,5	461,8	0
1930.125	694,5	448,6	448,6	449,5	0
1930.208	693,7	447,8	454,8	452,1	-7
1930.292	704	458,1	458,1	451,8	0
1930.375	696,3	450,4	450,4	452,5	0
1930.458	690,7	444,8	450,9	452,5	-6,1
1930.542	701,3	455,4	455,4	455,6	0
1930.625	701,2	455,3	455,3	456,1	0
1930.708	706,3	460,4	460,4	461,3	0
1930.792	708,2	462,3	462,3	462,1	0
1930.875	713	467,1	467,1	465,9	0
1930.958	710,3	464,4	464,4	463,3	0

Tab. D.2. – NMm du PSMSL présentant des différences avec les NMm des registres du SHOM pour l'année 1930 (cm).

Malheureusement, l'origine de cette différence n'a pas été déterminé.

Bibliographie générale

La bibliographie générale se présente sous deux volets : sources imprimées et sources manuscrites.

Le premier volet se compose de trois sources chronologiques. La première s'étend jusqu'en 1795, année de fondation du Bureau des Longitudes. La deuxième rassemble tous les écrits allant de cette date jusqu'en 1941. Gutenberg publie cette année-là, la première étude "moderne" de renommée mondiale sur le changement du niveau de la mer. La troisième source court jusqu'à aujourd'hui. Elle est scindée en deux ensembles : sources scientifiques et sources secondaires. Le premier regroupe l'ensemble des communications disponibles dans les périodiques, les mémoires et les ouvrages scientifiques tandis que le second rassemble des travaux de synthèse fondés sur des sources primaires ou des documents de "second ordre" par rapport au premier sous-ensemble.

Le second volet intéressera surtout la communauté des historiens. Il rassemble les cotes des documents consultés dans les principaux fonds d'archives : Académie des Sciences, bibliothèque de l'Observatoire de Paris, bibliothèque Nationale de France, Centre d'Accueil et de Recherche des Archives Nationales, Services Historiques de la Défense – Marine (Brest, Rochefort, Toulon, Vincennes) – Armée de Terre (Vincennes), bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Archives départementales (Charente-Maritime, Ille et Vilaine, Hérault).

1. Sources imprimées

1.1. Sources antérieures à 1795

Anonyme, Perrault (1675). Extrait du journal d'Italie contenant quelques avertissements pour observer les différens périodes de la marée ; avec la description de la machine dont il est parlé. *Journal des Sçavans*, vol. 10, pp. 65-67 (exemplaire Gallica JDS 1675, lundi 22 avril, pp. 118-120).

Cassini J. (1710a). Sur le flux et le reflux, MHARS 1710 (Paris 1732), hist., pp.4-10.

Cassini J. (1710b). Réflexions Sur les Observations du Flux & du Reflux de la Mer, faites à Dunquerque par M. Baert Professeur d'Hydrographie, pendant les années 1701 & 1702. , MHARS 1710 (Paris 1732), mém., pp.318-341.

Cassini J. (1710c). Réflexions sur les Observations du flux & du reflux de la Mer, faites au Havre de Grace par M. boissaye du Bocage Professeur d'Hydrographie ; pendant les années 1701 & 1702 , MHARS 1710 (Paris 1732), mém., pp.366-374.

Cassini J. (1712a). Sur le flux et le reflux de la mer, MHARS 1712 (Paris 1731), hist., pp.1-3.

Cassini J. (1712b). Du flux et du reflux de la mer, MHARS 1712 (Paris 1731), mém., pp.86-95.

Cassini J. (1713a). Sur le flux et le reflux de la mer, MHARS 1713 (Paris 1739), hist., pp.1-6.

Cassini J. (1713b). Reflexions sur de nouvelles Observations du Flux & du Reflux de la Mer, faites au Port de Brest dans l'année 1712, MHARS 1713 (Paris 1739), mém., pp.14-30.

Cassini J. (1713c). Reflexions sur les observations des marées, MHARS 1713 (Paris 1739), mém., pp.267-290.

Cassini J. (1714a). Sur le flux et le reflux de la mer, MHARS 1714 (Paris 1717), hist., pp.4-7.

Cassini J. (1714b). Reflexions sur de Nouvelles Observations des Marées faites dans le Port de Brest, MHARS 1714 (Paris 1717), mém., pp.246-258.

Cassini J. (1720a). Sur le flux et le reflux de la mer, MHARS 1720 (Paris 1722), hist., pp.1-4.

Cassini J. (1720b). Reflexions Sur les Observations des Marées continuées à Brest, depuis le premier Avril 1714 jusqu'au 30 Septembre 1716, MHARS 1720 (Paris 1722), mém., pp.154-166.

Cassini J. (1720c). Reflexions Sur les Observations des Marées faites au Port de l'Orient depuis le I Fevrier 1711 jusqu'au 1 Fevrier 1712, & depuis le 18 Août 1716 jusqu'au 30 Juin 1719, MHARS 1720 (Paris 1722), mém., pp.355-364.

- Choquet (1757). Description des trois formes du port de Brest, baties, dessinées et gravées. Imprimerie Romain Malassis, Brest, 10pp + 8pl.
- Clairbois V. de (1786). Encyclopédie méthodique – Marine, tome 2. Ed. Panckoucke, Paris, Liège, 784pp.
- Fourcroy de Ramecourt de (1775). Observations sur les marées, à la côte de Flandre ou recherches sur la hauteur convenable aux Digues, Quais, Ecluses, Bâtardeaux, & autres Ouvrages contre la Mer. *Recueil des savants étrangers de l'Académie Royale des Sciences*, T. VIII, pp.577-600.
- Göuye T. (s.j.), P. de La Hire (1701). Mémoire de la manière d'observer dans les ports le flux et reflux de la mer, MHARS 1701 (Paris 1743), hist., pp.12-13.
- Lalande J. J. (1772). Mémoire sur le flux et le reflux de la mer et spécialement sur les marées des équinoxes, MHARS 1772, partie I (Paris 1775), mém., pp.297-324.
- Lalande J. J. (1781). Traité du flux et du reflux de la mer. Ed. Desaint J.C., Astronomie 4, Bordeaux, Paris, 348pp.
- Lalande J. J. (1789). Remarques Sur les Marées de l'équinoxe de printemps, observées à Brest en 1789, MHARS 1789 (Paris 1793), mém., pp.183-186.
- Lalande J. J. (1793). Histoire de l'Astronomie en 1793. Observations sur la physique, sur l'histoire naturelle et sur les arts. Tome 43, pp.386-392.
- Lalande J. J. (1795). Abrégé d'Astronomie. Ed. Didot F., Paris, 418pp. (Google Books : <http://books.google.fr/books?id=w6gAAAAAMAAJ&printsec=frontcover&dq=Abr%C3%A9g%C3%A9+d%E2%80%99Astronomie#PPP1,M1>. Consulté le 5 octobre 2008).
- Laplace P.-S. de (1789) Mémoire sur le flux et reflux de la mer. Mémoire de l'Académie des Sciences, MHARS 1789 (Paris 1793), mém., pp.45-181.
- Le Gentil de la Galaisière G. (1782). Observations de physique faites en 1781, Dans un Voyage sur les côtes de base Normandie. MHARS 1782 (Paris 1785), mém., pp.345-366.
- Moray R. (1666). Considerations and Enquiries concerning Tides ; likewise for a further search into Dr. Wallis's newly publish't Hypothesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 1, pp.298-301.
- Pezenas E. (1755). Observations des différentes hauteurs de l'eau de la Mers dans le Port de Marseille. *Mémoires de mathématique et de physique rédigés à l'observatoire de Marseille*, vol. 1 pp.161-170.
- Picard J., de La Hire P. (1729a). Observations faites à Brest et à Nantes pendant l'année 1679. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences depuis 1666 jusqu'à 1699*, tome VII, part. I, pp.379-390.
- Picard J., de La Hire P. (1729b). Observations faites à Bayonne, Bordeaux et Royan pendant l'année 1680. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences depuis 1666 jusqu'à 1699*, tome VII, part. I, pp.391-398.

- Picard J., de La Hire P. (1729c). Observations astronomiques faites aux costes septentrionales de France pendant l'année 1681. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences depuis 1666 jusqu'à 1699*, tome VII, part. I, pp.399-411.
- Philips H. (1668) A letter written to Dr. John Wallis containing observations about the true time of the tides. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 2, pp.656-659.
- Sturmy S. (1668). An account of some observations, made this present year by Capt Samuel Sturmy in Hong-road within four mile of Bristol, in answer to some of the Queries concerning the Tydes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 3, pp.813-817.
- Voltaire (1734). Lettres philosophiques. Lettre XIV sur Descartes et Newton. A Amsterdam, éditeur E. Lucas, pp. 139-140. (Gallica : ftp://ftp.bnf.fr/007/N0072251_PDF_1_393.pdf).
- Wallis J. (1666). Hypothesis on the flux and reflux of the sea. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 1, pp.263-298.

1.2. Sources comprises entre 1795 et 1941

- Aimé G. (1844). Mémoire sur les variations du niveau de la Méditerranée. CRAS, tome 18, pp. 219-223.
- Anonyme (1866). Annales des mines ou recueil de mémoires sur l'exploitation des mines et sur les sciences et les arts qui s'y rattachent rédigés par les ingénieurs des mines. Tome XI., Dunod éditeur, Paris, pp. 57-59. (Google Books : http://books.google.fr/books?id=sHPJv9X1zpAC&printsec=titlepage&source=gbs_summary_r&cad=0. Consulté le 5 octobre 2008).
- Bajot L.-M. (1824). Pilote français. Environs de Brest. Première partie. *Annales Maritimes et Coloniales*, vol.1, 2^{ème} partie, pp.221-222.
- Barral J.-A. (1855). Œuvres de François Arago. Notices Scientifiques. T. 2-5, Gide et Baudry, Paris.
- Bureau des Longitudes (1852). Annuaire pour l'an 1852. Paris.
- Beautemps-Beaupré C. (1808). Méthodes pour la levée et la construction des cartes et plans hydrographiques. Imprimerie Royale, Paris, 96pp.
- Beautemps-Beaupré C., P. Daussy (1829). Exposé des travaux relatifs à la reconnaissance hydrographique des côtes occidentales de France. Imprimerie Royale, Paris, 124pp.

- Bégat P. (1839). *Traité de géodésie à l'usage des marins ou méthodes et formules trigonométriques relatives au levé et à la construction des cartes hydrographiques*. Imprimerie Royale, Paris, 288pp.
- Bouquet de la Grye (1882). *Etude sur les ondes à longue période dans les phénomènes des marées*. CRAS, tome 94, pp.1446-1450.
- Bouquet de la Grye (1890). *Note sur le choix d'un zéro fondamental pour le nivellement*. *Annales Hydrographiques*, vol. 12, pp.32-38.
- Caspari E. (1882). *Rapport de la commission nautique chargée d'examiner le projet d'établissement d'une rade fermée et d'un avant-port militaire à Brest*. *Recherches hydrographiques sur le régime des côtes*, Service hydrographique de la marine, n°715, Paris, Imprimerie Nationale, pp.172-178.
- Charton E. (1848). *Le maréographe*. *Le magasin pittoresque*, vol. 16, pp.319-320. (Google Books : http://books.google.fr/books?id=cHsGAAAAQAAJ&printsec=titlepage&source=gbs_summary_r&cad=0. Consulté le 5 octobre 2008).
- Chazallon R. (1854a). *Note sur la marée solaire de Brest (Extrait d'une lettre de M. B. Chazallon, ingénieur-hydrographe de la Marine, à M. Elie de Beaumont)*. CRAS, tome 38, pp.1149-1153.
- Chazallon R. (1854b). *Note sur l'oscillation du niveau d'équilibre des mers; réflexions sur les échelles de marée. (Extrait d'une lettre de M. R. Chazallon, ingénieur-hydrographe de la Marine, à M. Elie de Beaumont)*. CRAS, tome 39, pp.111-116.
- Chazallon R. (1844a). *Sur l'installation d'un maréographe à Toulon, et sur les marées d'Akaroa (Nouvelle-Zélande)*. CRAS, tome 18, pp.1307-1312.
- Chazallon R. (1844b). *Sur les observations des marées faites à Alger. (Lettre de M. Chazallon à M. Arago)*. CRAS, tome 18, pp.438-440.
- Chazallon R. (1844c). *Annuaire des marées des côtes de France*. Publié au Dépôt de la Marine, Paris.
- Chazallon R. (1843). *Annuaire des marées des côtes de France*. Publié au dépôt de la Marine, Paris.
- Chazallon R. (1842a). *Mémoire sur les marées des côtes de France, et particulièrement sur les lois du mouvement de la mer pendant qu'elle s'élève et qu'elle s'abaisse*. CRAS, tome 14, pp.368-370.
- Chazallon R. (1842b). *Lettre de M. Chazallon à M. Arago, sur les marées du port de Toulon*. CRAS, tome 15, pp.562-565.
- Chazallon R. (1839). *Annuaire des marées des côtes de France*. Publié au Dépôt de la Marine, Paris.
- Courtier A. (1934). *Données numériques concernant les marées des côtes de France*. Publication SHOM, n°14-1016, 71pp.

- Darwin G. H. (1883). The harmonic analysis of tidal observations. (Report of a Committee consisting of Professors G. H. Darwin and J. C. Adams for the harmonic analysis of tidal observations). British Association Report, pp.49-118.
- Daussy P. (1831). Mémoire sur les Marées des côtes de France. *Connaissance des Temps [...] pour l'année 1834*, pp.74-87.
- Doodson A. T. (1921). Harmonic development of the tide-generating potential. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 100, pp.305-329.
- Dubernad, Boutroux, Rouxel, Bourbeau, Ferré, De Lessan, Cosmao, Thomasset, Mével. (1864). Rapport de la commission nautique chargée d'examiner le projet de création d'un avant-port militaire à Brest. Recherches hydrographiques sur le régime des côtes, Service hydrographique de la marine, n°578, Paris, Imprimerie Nationale, pp.11-19 + 1pl.
- Fénoux, Mengin (1879). Notice sur le port de Brest. Ports maritimes de France, Imprimerie Nationale, Paris. 70pp.
- Jal A. (1848). Glossaire Nautique. Répertoire polyglotte de termes de marine anciens et modernes. Editeurs Firmin Didot frères, Paris, 1591pp.
- Jourdan A. J. L. (1837). Dictionnaire raisonné, étymologique, synonymique et polyglotte, des termes usités dans les Sciences Naturelles. Société belge de librairie, 6^{ème} édition, revue, corrigée et augmentée, Bruxelles, 655pp. (Google Books : http://books.google.fr/books?id=uZ8GAAAAQAAJ&printsec=titlepage&source=gbs_summary_r&cad=0. Consulté le 5 octobre 2008).
- Lallemand C., E. Prévot (1927). Le nivellement général de la France de 1878 à 1927. Exposé préliminaire, procès-verbaux, documents administratifs, comptes rendus des travaux du service. Paris, imprimerie nationale.
- Lallemand C. (1910). Sur une erreur systématique de la détermination du niveau moyen de la mer, à l'aide du médimarémètre. CRAS, tome 150, pp.265-268.
- Lallemand C. (1888a). Sur le niveau moyen de la mer, et sur la surface générale de comparaison des altitudes. CRAS, tome 106, pp.1524-1527.
- Lallemand C. (1888b). Détermination du niveau moyen de la mer à l'aide d'un nouvel instrument, le médimarémètre. CRAS, tome 106, pp.1637-1641.
- Laplace P.-S. de, A.-M. de Rochon, P. Lévêque (1803). Mémoire sur les observations qu'il est important de faire sur les marées dans les différens ports de la république, fait au nom d'une commission, par P. Lévêque. Publié par ordre de l'Institut, Baudouin, imprimeur, Paris, 23pp.
- Laplace P.-S. de (1825) Traité de mécanique céleste, tome 2, Livre 4, et tome 5 Livre 13, Paris, Bachelier.

- Legendre A. M. (1806). Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes ; avec un supplément contenant divers perfectionnemens de ces méthodes et leur application aux deux Comètes de 1805. Chez Courcier, Imprimeur, 10pp. URL : <http://www.lsp.ups-tlse.fr/Fp/Falguerolles/FACSIMILE/legendre.pdf>. Consulté le 5 octobre 2008.
- Levot P. (1865). Histoire de la ville et du port de Brest. Le port depuis 1681. Tome 2, 387pp.
- Magado (1865). Légende historiques sur la ville et l'arsenal de Brest pour accompagner le Plan de cette ville. A Paris, 23pp.
- Marmont A. F. L. V. de (1857). Mémoires du Maréchal Marmont, Duc de Raguse de 1792 à 1841. Paris, 614pp.
- Milankovitch, M. (1938). Astronomische Mittelzur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate. *Handb. Geophys.*, vol. 9, pp.593-698.
- Millin A. L. (1817). Annales encyclopédiques, Tome 6, Bureau des annales encyclopédiques, Paris, 384pp.
- Palmer H. R. (1831). Description of a Graphical Registrar of Tides and Winds. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 121, pp.209-213.
- Poirel (1841). Mémoire sur les travaux à la mer, comprenant l'historique des ouvrages exécutés au port d'Alger, et l'exposé complet et détaillé d'un système de fondation à la mer, au moyen de blocs de béton. Imprimerie Carilian-Goeury, Paris, 4pp., 18pl.
- Renaud J. (1900). Rapport de la commission nautique chargée d'examiner le projet d'achèvement de la rade de refuge et de modification de l'entrée du port de commerce de Brest. Recherches hydrographiques sur le régime des côtes, Publication du Service hydrographique de la marine, n°880, Paris, Imprimerie Nationale, pp.243-251.
- Robert A., G. Cougny (1889). Dictionnaire des parlementaires Français comprenant tous les Membres des Assemblées françaises et tous les Ministres français Depuis le 1er Mai 1789 jusqu'au 1er Mai 1889 avec leurs noms, état civil, états de services, actes politiques, votes parlementaires, etc. Bourelton, Paris, t.2, 640pp.
- Rollet de l'Isle (1905). Observation, étude et prédiction des marées. Publication du Service hydrographique de la marine, n°13-155, 287pp.
- Savary F., A. Bouvard, C. Mathieu, P. Daussy, C.-L. Largeteau (1843). Observations des marées faites à la mâture et au bassin dans le port de Brest 1807-1835. Publiées par le Bureau des Longitudes, Imprimerie Royale, Paris.
- Thomson W. (1869). Report of the Committee of the purpose of promoting the extension, improvement and harmonic analysis of Tidal Observations. In: Report of the 38th Meeting of the British Association for the Advancement of Science, 1868, John Murray, London, pp.489-510.

Whewell W. (1837) On the progress of the diurnal inequality wave along the coasts of Europe. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 127, pp.227-244.

Whewell W. (1836). Tide observations made on the coasts of Europe and America in June 1835. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 126, pp.289-341.

1.3. Sources postérieures à 1941

1.3.1. Sources scientifiques

Antonov J.I., S. Levitus, T.P. Boyer (2005). Thermosteric sea level rise : 1955-2003. *Geophysical Research Letters*, 32, L12602, doi : 10.1029/2005GL023112.

Araújo I., D. Pugh (2008). Sea Levels at Newlyn 1915-2005: analysis of Trends for Future Flooding. *Journal of Coastal Research*, vol. 24, issue sp3, pp.203-212.

Barbot C. (1998). Statistique des niveaux extrêmes de basse mer des ports de France. Mém. ingénieur, Génie Civil, Clermont-Ferrand, 101pp.

Bertois L., G. Auffret (1968). Contribution à l'étude des conditions de sédimentation dans la rade de Brest. Chapitre 1 : Minéralogie et granulométrie sédimentaire. *Cahiers Océanographiques*, 20^{ème} année, n°10, pp.893-920.

Bertois L., G. Auffret (1969). Contribution à l'étude des conditions de sédimentation dans la rade de Brest. Chapitre 2 : Dynamique des dépôts littoraux. *Cahiers Océanographiques*, 21^{ème} année, n°5, pp.469-485.

Bertois L., G. Auffret (1970a). Contribution à l'étude des conditions de sédimentation dans la rade de Brest. Chapitre 3 : Hydrologie et courantométrie. *Cahiers Océanographiques*, 22^{ème} année, n°7, pp.701-726.

Bertois L., G. Auffret (1970b). Contribution à l'étude des conditions de sédimentation dans la rade de Brest. Chapitre 4 : Etude analytique des apports fluviaux en rade de Brest. *Cahiers Océanographiques*, 22^{ème} année, n°10, pp.981-1010.

Bessero G. (1985). Cours de marées, 2 vols. EPSHOM, Brest. ISBN Vol. I 2-11-080573-0, Vol II 2-11-08574-9.

Bogdanov V.I., M. Yu. Medvedev, V.A. Solodov, Yu A. Trapeznikov, G.A. Troshkov, A.A. Trubitsina (2000). Mean monthly series of sea level observations (1777-1993) at the Kronstadt gauge. Reports of the Finnish Geodetic Institute, pp.34.

Bouligand R., P. A. Pirazzoli (1998). Les surcotes et les décotes marines à brest, étude statistique et évolution. *Oceanologica acta*, vol 22 n°2, pp.153-166.

Cailleux A. (1952). Récentes variations du niveau des mers et des terres. Revue *Bulletin de la Société Géologique de France*, 6^{ème} série, II, pp.135-144.

- Cartwright D. E. (2003a), Remi Chazallon - a forgotten "ingenieur hydrographe". *History of Oceanography*, Vol. 15, pp. 2-3.
- Cartwright D. E. (2003b). The Tonkin tides revisited. *Notes and Records of the Royal Society of London*, Vol. 57, No. 2 (May, 2003), pp.135-142.
- Cartwright D. E. (1999). Tides : a scientific history, Cambridge University Press, Cambridge, 292pp.
- Cartwright D. E. (1972). Secular changes in oceanic tides at Brest (1711-1936), *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 30, pp.433-449.
- Cartwright D. E. (1971). Some ocean tide measurements of the 18th century, and their relevance today. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, B, vol. n°72, pp.331-339.
- Church J.A., N.J. White, R. Coleman, K. Lambeck, J.X. Mitrovica (2004) Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950–2000 period. *J Clim* vol. 17, pp.2609–2625.
- Church J.A., N.J. White (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L01602 doi:10.1029/2005GL024826, 4pp.
- Church, J.A., N.J. White, T. Aarup, W.S. Wilson, P.L. Woodworth, C.M. Domingues, J.R. Hunter, K. Lambeck (2008). Understanding global sea levels: past, present and future. *Sustainability Science*, Doi:10.1007/s11625-008-0042-4.
(URL: <http://rses.anu.edu.au/geodynamics/lambeck/pubs/267.pdf>. Consulté le 5 octobre 2008).
- COI (2006). Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO, Manuel et Guides 31, vol. 4, p1-88. (URL : http://www.pol.ac.uk/psmsl/manuals/manual_14_final_21_09_06.pdf. Consulté le 5 octobre 2008).
- COI (1985). Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer. Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO, Manuel et Guides 14, vol. 1, p1-84.
- COI (1983). Stations marégraphiques opérationnelles. UNESCO, guide technique n°23, 40pp.
- Créach R., F. Lecornu, N. Le Floch PREVIMER (2007). Logiciel temps réel pour le Réseau d'Observations du Niveau de la Mer "RONIM". Avis de marché 2007/S12-013713 Cahier des Clauses Techniques Particulières. DOP/CB/DYNECO/PHYSED/2007-01 version 1.0, référence DAJ : 07/2 210 027, pp.36.
(ULR : <http://www.previmer.org/content/download/952/3396/file/07027.pdf>. Consulté le 5 octobre 2008).
- Devauchelle O. (2002). Mesure du gradient de température dans le puits du marégraphe de Penfeld (Brest). EPSHOM, Rapport d'étude n°005/02.
- Disney L. P. (1961). Conditions minima requises pour le fonctionnement d'un marégraphe. *Revue Hydrographique Internationale*, vol° 38, n°2.

- Douglas B.C. (2001). Sea level change in the era of the recording tide gauge, in *Sea Level Rise, History and Consequences*. Edited by M.S. Kearney, and S.P. Leatherman, Academic, San Diego, Calif., Associated Press, pp.37-64.
- Douglas B.C. (1997). Global sea rise: A redetermination. *Surveys in Geophysics*, vol. 18, pp.279-292.
- Douglas B.C. (1992). Global Sea Level Acceleration. *Journal of Geophysical Research*, vol. 97, n° C8, pages 12 699–12 706.
- Douglas B.C. (1991). Global sea level rise. *Journal of Geophysical Research*, vol. 96, pp.6981-6992.
- Ekman M. (2003). The World's Longest Sea Level Series and a Winter Oscillation Index for Northern Europe 1774-2000. *Small Publications in Historical Geophysics* n°12, 31pp. (URL: http://www.pol.ac.uk/psmsl/author_archive/martin_ekman/ekman_2003.pdf. Consulté le 5 octobre 2008).
- Ekman M. (1999) Climate changes detected through the world's longest sea level series. *Global Planet Change*, n°21, pp.215–224.
- Ekman M. (1988). The world's longest continuous series of sea level observations. *Pure Appl. Geophys.*, 127, pp.73-77.
- Emery K.O. (1980). Relative sea levels from tide gauge records. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. n°77, pp.6968-6972.
- Fairbridge R. W., Jr. O. A. Krebs (2007), Sea level and the Southern Oscillation. *Geophysical Journal*, vol. 6/4, pp.532–545.
- Felloux J.-L. (2000). Edito. La lettre du Changement global. Programme International Géosphère Biosphère – Programme Mondial de Recherches sur le Climat., n°11, pp.1-8.
- Gonella J., B. Simon (2002). Erreur induite par l'évolution diurne de la température sur deux marégraphes acoustiques en Méditerranée. Muséum d'histoire naturelle et EPSHOM. Rapport du SHOM n°002/02.
- Graff J., A. Karunaratne (1980). Réduction précise des enregistrements de niveau de la mer. *Revue Hydrographique Internationale*, vol 57-2, Monaco.
- Gutenberg B. (1941). Changes in sea level, postglacial uplift, and mobility of the Earth's interior. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 52, pp.721-772.
- Hamm L., G. Goasguen (2004). Applications pratiques de la base de données CANDHIS de mesures d'états de mer in-situ. 8^{èmes} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004, pp.21-28. (URL : www.cetmef.equipement.gouv.fr/colloques/geniecotier/fichiers/theme1/03_Hamm.pdf. Consulté le 5 octobre 2008).
- Hannah J. (2004). An updated analysis of long-term sea-level change in New Zealand, in the light of lead isotope data. *Geophysical Research Letters*, 31, L03307, doi:10.1029/2003GL019166.

- Hannah J. (1990). Analysis of Mean Sea Level Data From New Zealand for the Period 1899-1988. *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, N°B8, pp.12399-12405.
- Hannah J. (1988). Analysis of mean sealevel trends in New Zealand from historical tidal data. Rep. 2, Dep. Of Surv. And Land. Inf. Wellington, New Zealand, 41pp.
- Holgate S.J. (2007). On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01602, doi:10.1029/2006GL028492.
- Holgate S.J. P.L. Woodworth (2004). Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s, *Geophys. Res. Lett.*, vol.31, L07305, doi :10.1029/2004GL019626.
- Jevrejeva S., J.C. Moore, A. Grinsted, P.L. Woodworth (2008). Recent global sea level acceleration started over 200 years ago? *Geophysical Research Letters*, vol. 35, doi:10.1029/2008GL033611, L08715, 4pp.
- Jevrejeva S, A. Grinsted, J.C. Moore, S.J. Holgate (2006) Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *J Geophys Res.* 111:C09012. doi:10.1029/2005JC003229.
- Lambeck K, M. Anzidei, F. Antonioli, A. Benini, A. Esposito (2004). Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for recent change. *Earth Planet Sci Lett.* vol. 224, pp.563–575.
- Lambeck, K. (2002). Sea level change from mid-Holocene to recent times: An Australian example with global implications, *Ice Sheets, Sea Level and the Dynamic Earth*, J.X. Mitrovica and B.L.A. Vermeersen, Eds., *Geodynamics Series*, Vol. 29, pp.33-50.
- Lambeck K, J. Chappell (2001) Sea level change through the last glacial cycle. *Science* vol.292, pp.679–686.
- Lambeck K, Y. Yokoyama, T. Purcell (2002). Into and out of the Last Glacial Maximum: sea-level change during Oxygen Isotope Stages 3 and 2. *Quat Sci Rev.* 21(1), pp.343–360.
- Le Roy R. (2006). Evaluation des performances des télémètres radar pour la mesure des hauteurs d'eau. Rapport d'étude du SHOM n°001/06, 49pp.
- Lisitzin (1958). Le niveau moyen de la mer. *Bulletin d'information du Comité central d'océanographie et d'étude des côtes*, vol n°10(5), pp.254-262.
- Maul G.A., D.M. Martin (1993). Sea level rise at Key West, Florida, 1946-1992: American longest instrument record? *Geophysical Research Letters*, vol.20, 1955-1958.
- Marmor H. A. (1951). Tidal Datum Planes. U.S. Department of Commerce, Coast and Geodetic survey, special publication n°135, édition révisée.
- Martin Miguez B., R. Le Roy, G. Wöppelmann (2008). The use of radar tide gauges to measure variations in sea level along the French coast. *Journal of Coastal Research*, Vol. 24, pp. 61-68.
- Merceron M., J. Hussenot, J. Y. Piriou, M. Leglise, G. Raguènes (1978). Inventaire des sites potentiels pour l'aquaculture sur le littoral du Finistère : première phase (Etude bibliographique et reconnaissance terrain). Secteur V : Rade de Brest. Rapport, 57pp.

- Mitchum G.T. (1998). Monitoring the stability of satellite altimeters with tide gauges, *J. Atmos. Ocean. Technol.* 15, pp.721–730.
- Moisselin J.-M., O. Mestre (2002). Research, Digitisation, and Homogenization of Long-Term Data Series. Actes du Colloque "Ensuring Long-Term Preservation and adding Value to scientific and technical data" organisé par le CNES du 5 au 7/11/2002, Toulouse. (URL: http://vds.cnes.fr/manifestations/PV2002/DATA/1-9_moisselin.pdf. Consulté le 5 octobre 2008).
- Mörner N. A. (1973). Eustatic changes during the last 300 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Quaternary International*, vol^o9, pp.153– 181.
- Nicholls R.J. et J.A. Lowe (2006a) Climate stabilisation and impacts of sea-level rise. In *Avoiding Dangerous Climate Change*, eds. H.J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T.M.L. Wigley, and G. Yohe. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nicholls R.J. et R.S.J. Tol (2006b). Impacts and responses to sealevel rise: a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, 364, 1073-1095.
- Nicholls, R.J., F.M.J. Hoozemans, M. Marchand (1999). Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change*, Part A: Human and Policy Dimensions, vol. 9, suppl., pp.S69-S87.
- Pawlowicz R., B. Beardsley, S. Lentz (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences*, n^o28, pp.929-937.
- Peltier W.R., A.M. Tushingham (1989). Global sea level rise and greenhouse effect: might they be connected? *Science*, n^o1244, pp.806-810.
- Peltier W.R. (2001). Global glacial isostatic adjustment and modern instrumental records of relative sea-level history, in *Sea level Rise, History and Consequences*. Edited by M.S. Kearney, and S.P. Leatherman, Academic, San Diego, Calif., Associated Press, pp.65-95.
- Pirazzoli P. (1986). Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tides gauge records. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, vol. 1, pp.1-26.
- Pirazzoli P. (1989). Present and near-future global sea-level changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Quaternary International*, vol. 2, pp.63-71.
- Pugh D. (2004). *Changing Sea Levels, Effects of Tides, Weather and Climate*. Cambridge University Press, United Kingdom, 280pp.
- Pugh (1987). *Tides, surges and mean sea-level. A Handbook for Engineers and Scientists*. Wiley, Chichester, 472pp.
- Rahmstorf S., A. Cazenave, J.A. Church, J.E. Hansen, R.F. Keeling, D.E. Parker, R.C.J. Somerville (2007). Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science*, vol. 316, pp.709.

- Ramsay J.O., B.W. Silverman (2005). *Functional Data Analysis*. Springer-Verlag, New York. 419pp.
- Schindelé F. (2008). La participation de la France dans la mise en place du réseau de surveillance du niveau de la mer en Méditerranée occidentale et dans l'Atlantique Nord-Est. *La lettre de RONIM* n°6, pp.4-5.
(URL : http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/lettre_RONIM_2008.pdf. Consulté le 5 octobre 2008).
- Schindelé F, H. Hébert, D. Reymond, A. Sladen (2006). L'aléa tsunami en Polynésie française : synthèse des observations et des mesures. CRAS Geoscience, Tome 338, pp.1133-1140.
- Shennan et Woodworth (1992). A comparison of late Holocene and twentieth-century trends from the UK and North Sea region. *Geophysical Research International*, vol. n°109, pp.96-105.
- SHOM (2007). Documentation de MAS. Fascicule : mode opératoire n°2007-061.
- SHOM (1979). Répertoire des zones de marées et des zéros hydrographiques sur les côtes métropolitaines. *Annales Hydrographique*, n°751, pp.3-67.
- Simon B. (2007). La marée océanique côtière. Collection "Synthèse", ed. Institut Océanographique, 433pp.
- Simon B. (2004). Statistique des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France. Rapport d'étude du SHOM n°001/94 78pp.
- Simon B., A. Lahaye-Collomb (1997). La marée. SHOM, Collection *les guides du SHOM*, Paris, 75pp.
- Simon B. (1996). Détermination des hauteurs d'eau extrêmes pour la délimitation du domaine public maritime. *Annales Hydrographique*, vol 20, n°767, pp.17-27.
- Simon B. (1985). Stations marégraphiques françaises. Rapport d'étude de l'Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine n°0007/85 32pp.
- Simon J.-L., M. Chapront-Touzé, B. Morando et W. Thuillot, (1997). Introduction aux éphémérides astronomiques. Bureau des longitudes 440pp.
- SOGREAH PRAUD (2003). SAGE de l'Aulne. Etat des lieux et Pré-diagnostic. Rapport, 204pp.
- Speer P. E., Aubrey D. G. (1985). A study of non-linear tidal propagation. Shallow inlet/estuarine systems. Part II: theory. Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, vol. 21, pp.207-224.
- Taylor J. (2000). Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques, avec exercices et problèmes résolus. Collection Masson Sciences, éditeur Dunod, 336pp.
- Testut L., G. Wöppelmann, B. Simon, P. Téchiné (2006). The sea level at Port-aux-Français, Kerguelen Island, from 1949 to the present. *Ocean Dynamics*, vol. 56, n°5-6, pp.464-472.

- Ullmann A., P.A. Pirazzoli (2007). Caractéristiques spatiales de la formation des surcotes marines dans le Golfe du Lion. *Cybergeogeo, Environnement, Nature, Paysage*, article 362, mis en ligne le 18 janvier 2007, modifié le 17 septembre 2008.
(URL : <http://www.cybergeogeo.eu/index1708.html>. Consulté le 5 octobre 2008).
- UNESCO IOC-SOA-NOAA (1994). Regional Workshop for Member States of the Western Pacific - GODAR-II (Global Oceanographic Data Archeology and Rescue Project). Intergovernmental Oceanographic Commission Workshop Report No. 100. World Data Centre D, Oceanography Tianjin, China 8-11 March 1994, pp.74.
(URL : <http://ioc.unesco.org/iocweb/IOCpub/iocpdf/w100.pdf>. Consulté le 5 octobre 2008).
- Vail P.R., R.M. Mitchum, S. Thompson (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 4/ Global cycles of relative changes in sea level. In *Seismic stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration (Memoir 26)*, C.E. Payton (ed.), Am. Assoc. Petrol. Geol., 83-97.
- Van Onselen K.L. (2000). The influence of data quality on the detectability of sea-level height variations. Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy 49, Delft, 204pp.
(URL: <http://www.ncg.knaw.nl/Publicaties/Geodesy/49Onselen.html>. Consulté le 5 octobre 2008).
- Van Veen J. (1954). Tides-Gauges, Subsidence-Gauges and Flood-Stones in the Netherlands. *Geologie en Munbouw (New Serie)*, vol. 16, pp.214-219.
- Van Veen J. (1945). Bestaat er een geologische bodemdaling te Amsterdam sedert 1700 ? Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap. Tweede Serie, vol. 62, pp.2-36.
- Verwaest T.; P. Viaene, J. Verstraeten, F. Mostaert. (2005). De zeespiegelstijging meten, begrijpen en afblokken. [Measuring, understanding and blocking the sea-level rise]. *De Grote Rede*, vol. 15: pp.15-25.
(URL : <http://www.vliz.be/vmdcdata/imis2/ref.php?refid=97467>. Consulté le 5 octobre 2008).
- Vignal J. (1945). Altération des ondes transmises dans un médimarémètre, due à l'entraînement d'eau par la sonde. CRAS, vol. 220, pp.648-650.
- White N. J., A. Church, J.M. Gregory (2005). Coastal and global averaged sea level rise for 1950 to 2000. *Geophysical Research Letters*, n°32, L01601, doi:10.1029/2004GL021391.
- Wöppelmann G. (2007). Géodésie et Niveau de la mer. Dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de La Rochelle, 193pp.
- Wöppelmann, G., B. Martin Miguez, M.-N. Bouin, Z. Altamimi (2007). Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide. *Global and Planetary Change*, 57, 396–406.
- Wöppelmann G, S. Zerbini, M. Marcos (2006a). Tide gauges and Geodesy : a secular synergy illustrated by three present-day case studies. CRAS – Géosciences, n°338, pp.980-991.

- Wöppelmann G., N. Pouvreau, B. Simon (2006b). Brest sea-level record: a time series construction back to the early eighteenth century, *Ocean Dynamics* 56, pp.487-497.
- Wöppelmann G., P. Pirazzoli (2005). Tide Gauges. In: M.L. Schwartz, Editor, *Encyclopedia of Coastal Sciences*, Springer-Verlag, pp.984-986.
- Wöppelmann G., S. Allain, P. Bahurel, S. Lannuzel, B. Simon (1999). Zéro hydrographique vers une détermination globale. *Revue xyz*, pp.27-33.
- Wöppelmann G. (1997). Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale. Thèse de doctorat : Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste et Géodésie, Observatoire de Paris, 263pp.
- Woodworth P.L. (2006). Some important issues to do with long-term sea level change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 364, pp.787-803.
- Woodworth P.L. (2003). A One Year Comparison of Radar and Bubbler Tide Gauges at Liverpool. *International Hydrographic Review*. Vol. 4, n°3 (New series), pp.2-9.
- Woodworth P. L., R. Player (2003). The Permanent Service for Mean Sea Level: An Update to the 21st Century. *Journal of Coastal Research*, Volume 19, Issue 2, pp.287–295.
- Woodworth P.L. (1999a). A study of changes in high water levels and tides at Liverpool during the last two hundred and thirty years with some historical background. Proudman Oceanographic Laboratory Report, N°56, 62pp.
- Woodworth P.L. (1999b): High waters at Liverpool since 1768: the UK's longest sea level record. *Geophysical Research Letters* vol. 26, pp.1589-1592.
- Woodworth P.L., S.M. Shaw, D.L. Blackman (1991). Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline. *Geophysical Journal International*, vol. 19, pp.287-295.
- Woodworth P.L. (1990). A search for accelerations in records of European mean sea level. *International Journal of Climatology*, vol. 10, pp.129-143.

1.3.2. Sources secondaires

- Amoros C. G.E. Petts (1993). *Hydrosystèmes fluviaux*. Ed. Masson, collection d'écologie 24, Paris, 300pp.
- Auffret G. A. (1983). *Dynamique sédimentaire de la Marge Continentales Celtique*. Thèse d'état ès Sciences, Université Bordeaux 1.
- Averous J. (2006). *Marie-Joseph Caffarelli (1760-1845) : Préfet maritime de Brest sous le Consulat et l'Empire*. Edition de l'Harmattan, 193pp.

- Boistel G. (2001) L'astronomie nautique au XVIIIème siècle en France: tables de la Lune et longitudes en mer. Thèse de doctorat : Histoire des sciences et des techniques, Université de Nantes, faculté des sciences et des techniques, Centre François Viète, 3 vols., 991pp. (ANRT, 2003, 2 vols, ISBN 2-284-03915-4).
- Boulaire A., R. Le Bihan (2004). Brest. Histoire et géographie contemporaine. Collection histoire et géographie contemporaine, Edition Palentines, 303pp. ISBN 2911434382.
- Briot C. (1990). J. B. D. N. D'Après de Mannevillette, hydrographe de la compagnie des Indes, Auteur du Neptune Oriental [1701 – 1780]. Congrès des Sociétés historiques et Archéologiques de Normandie à Cherbourg en octobre 1990.
(URL : <http://monsie.orange.fr/mannevillette-2007/page5.html>. Consulté le 5 octobre 2008).
- Chapuis O. (2000). A la mer comme au ciel. Beautemps-Beaupré & la naissance de l'hydrographie moderne (1700-1850). L'émergence de la précision en navigation et dans la cartographie marine. Presse de l'Université de Paris-Sorbonne, 1060pp.
- Cloître M.-T., A. Bugat (1991). Atlas historique des villes de France : Brest, Finistère. Atlas historique des villes de France. Editions du CNRS, Paris, France, 6pp. 1pl ISBN 2-222-04447-2.
- Cros B., J. Littoux, J. Ronot (2005). Brest face à la mer. Trois siècles de marine et d'arsenal. Editions Le Télégramme, Brest. 116pp. ISBN 2-84833-143-7.
- Ephémérides Astronomiques (2001). Annuaire du bureau des longitudes. Editions Dunod, 384pp.
- Feurtet J.-M. (2005). Le Bureau des Longitudes, de Lalande à Le Verrier. Thèse de l'école nationale des Chartes, Paris, 520pp.
- G.I.E.C. Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley, A. Unnikrishnan (2008). Chapter 5. Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- G.I.E.C. Church J.A., J.M. Gregory, P. Huybrechts, M. Kuhn, K. Lambeck, M.T. Nhuan, D. Qin, P.L. Woodworth, O.A. Anisimov, F.O. Bryan, A. Cazenave, K.W. Dixon, B.B. Fitzharris, G.M. Flato, A. Ganopolski, V. Gornitz, J.A. Lowe, A. Noda, J.M. Oberhuber, S.P. O'Farrell, A. Ohmura, M. Oppenheimer, W.R. Peltier, S.C.B. Raper, C. Ritz, G.L. Russell, E. Schlosser, C.K. Shum, T.F. Stocker, R.J. Stouffer, R.S.W. van de Wal, R. Voss, E.C. Wiebe, M. Wild, D.J. Wingham, H.J. Zwally (2002). Chapter 11. Changes in Sea Level. In *Climate Change 2001 The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

- G.I.E.C. Warrick R.A., C. Le Provost, M.F. Meier, J. Oerlemans and P.L. Woodworth (1996). Chapter 7. Changes in sea level *In Climate Change 1995. The science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [J.T.Houghton, L.G.Meira Filho, B.A.Callander, N.Harris, A.Kattenberg and K.Maskell (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 572pp.
- Gillet A. (1998). Une histoire des marées. Ed. Belin, regards sur la science, Paris, 96pp.
- Jedrzejewski F. (2002). Histoire universelle de la mesure. Ed. Ellipses, Paris, 416pp.
- Lardeux H. (1996). Guide géologique de la Bretagne. Guides géologiques régionaux, 3^{ème} édition, Masson, 222pp.
- O.H.I. (1998). Dictionnaire hydrographique. Publication spéciale n°32, version française de la 5ème édition, OHI, Monaco.
- OPECST (2007). L'évaluation et la prévention du risque de tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer. Résumé du rapport de M. Roland Courteau, Sénateur, Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Décembre 2007. 4pp. (URL : <http://www.senat.fr/noticerap/2007/r07-117-notice.html>. Consulté le 5 octobre 2008).
- Savoie D. (2001). La Gnomonique. Editions Les Belles Lettres, Paris, 453pp.
- Troadec P., R. Le Goff *et al* (1997). Etats des lieux et des milieux de la rade de Brest et de son bassin versant. Phase préliminaire du Contrat de Baie de la rade de Brest. Edition Communauté Urbaine de Brest. 335pp. (URL : <http://applications-internet.brest-metropole-oceane.fr/VIPRR91/interligo.Web.Front/UploadFiles/publications/278/chapitr1.zip.V11.aspx>. Consulté le 5 octobre 2008).

2. Sources manuscrites

2.1. Archives de l'Académie des Sciences

Procès-Verbaux de l'Académie Royale des Sciences, tomes 3 à 107,

Gallica : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb375720275/date>.

Pochettes des séances par année : 1685, 1701, 1702, 1710, 1712, 1713, 1715, 1714, 1715, 1717.

Pochettes des séances du : 1767/01/24, 1767/04/08, 1767/05/27, 1768/11/29, 1772/04/10, 1772/06/17, 1773/06/19, 1773/07/10, 1773/07/17, 1776/02/03, 1776/02/10, 1776/02/24, 1776/03/06, 1777/12/17, 1778/01/31, 1778/03/28, 1780/07/05, 1780/08/19, 1781/01/31, 1781/07/04, 1783/08/09, 1783/08/20, 1784/06/09, 1784/06/19, 28 germinal an XI (1803/04/18), 12 floréal an XI (1803/05/02), 26 floréal an XI (1803/05/16), 17 prairial an XI (1803/06/06), 20 thermidor an XI (1803/08/08), 30 pluviose an XII (1804/02/20), 30 fructidor an XII (1804/09/17), 3 thermidor an XIII (1805/07/22), 29 fructidor an XIII (

1805/09/16), 13 brumaire an XIV (1804/11/04), 1806/04/07, 1806/10/06, 1807/05/18, 1807/05/18, 1807/07/13, 1811/07/22, 1822/10/07, 1823/09/08, 1826/05/22, 1826/06/12, 1831/01/31, 1831/11/07.

Dossiers biographiques de Bouvard (Alexis), Cassini (Jean-Dominique), Cassini (Jacques), Chazallon (Antoine-Marie-Rémi), Dangos (le chevalier d'Angos), Daussy (Pierre), Groignard (Antoine), Lalande (Joseph-Jérôme Lefrançois de), Laplace (Pierre-Simon), Thevenard (Antoine-Jean-Marie).

2.2. Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Consultation des microfilms suivants : B.4.1, B.5.5, B.5.9, C.2.19, F.24.

Consultation des manuscrits : D.2.42.

2.3. Bibliothèque Nationale de France

Consultation des documents suivants : NaFR 9411, NaFR 9414, NaFR 9415, NaFR 9482 (mf 11050), NaFR 9495, Fr 15871-15872, Fr 21015

2.4. Centre d'Accueil et de Recherche des Archives Nationales (CARAN)

Les archives consultées proviennent toutes (sauf indication contraire) du fond Marine. Il s'agit ici principalement des archives de la Marine durant l'ancien régime. Voici le système de classification :

Archives anciennes du Service Hydrographique de la Marine : série JJ ;

Service général : série B ;

Personnel : série C ;

Matériel : série D ;

Innovations techniques dans la marine : série G.

B1 : Décisions. Cote consultée : 4.

B2 : Ordres et dépêches. Cotes consultées : 214, 420, 422, 426.

B3 : Lettres reçues. Cotes consultées : 236, 329.

C7 : Personnel de la Marine. Cotes consultées : 32 (Blondeau), 74 (Coubard), 161 (Lalande), 319 (Thevenard).

D2 : travaux hydrauliques et bâtiments civils. Cotes consultées : 25, 26, 27, 306.

G : Mémoires et projets reçus par le département de la Marine. Cote consultée : G96.

3JJ : observations scientifiques et géographiques. Cotes consultées : 151, 153, 398, 399, 401, 402.

5JJ : voyages et missions hydrographiques. Cotes consultées : 1, 176, 198^A, 198^B, 198^C, 230, 231, 253, 346.

10JJ : Archives provenant du Service Hydrographique (versement 10/07/1933). Cote consultée : 503.

F : Sciences et Lettres (indépendant du fond Marine). Cote consultée : F17/3609.

2.5. Services Historiques de la Défense - Marine

Les Archives de la Marine depuis 1800 sont conservées dans les différents centres de Services Historiques de la Défense – Marine (SHD-M) de Brest, Cherbourg, Lorient, Rochefort, Toulon et Vincennes. Les SHD-M de Cherbourg et Lorient ont été contactés de manière informelle tandis que les autres ont fait l'objet de recherches dans leurs fonds.

Le système de classification des archives et le même qu'au CARAN :

Matériel : série DD ;

Majorité générale, direction du port, dépôt : série D ;

Service de santé : série F ;

Travaux hydrauliques puis travaux maritimes : série K.

2.5.1. à Brest

1D : Majorité générale et direction des mouvements du port (1820-1907) Cotes consultées : 2, 4, 5, 134, 135, 136, 137

1K : Période 1699-1887. Cotes consultées : 4/2, 5/1 à 5/23, 6/1 à 6/14, 10/4.

2.5.2. à Rochefort

2D⁴ : Direction du port, autres documents. Cotes consultées : 5t, 5r, 5v, 5w, 5y, 5ad, 5af.

2F : observations faites à l'hôpital de la marine. Cotes consultées : 556-562.

5F : divers. Cotes consultées : 42-80.

7JJ : minutes de levés hydrographiques – registre de minutes – versement 1966. Cotes consultées : 5, 12, 13, 14, 23, 33, 38, 39, 113, 114, 115, 119, 140, 141, 142, 143, 143bis, 159, 160, 161, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 205, 361, 362, 363, 364, 365.

K : Fort Boyard, non coté. Boîtes n°1, 7, 8 et chemise n°44.

2.5.3. à Toulon

2K : Travaux hydrauliques et bâtiments civils. Cotes consultées : 2K²164, 2K³2, 2K³3.

2.5.4. à Vincennes

DD² : travaux hydrauliques et bâtiments civils. Cotes consultées : 691-2, 691-3, 691-4, 691-6, 691-16, 691-18, 691-19, 691-20, 691-21, 691-22, 691-33, 691-38, 691-41, 691-42, 691-43, 692-16, 692-24, 692-26, 692-27, 692-28, 692-29, 692-31, 692-32, 692-33, 692-34, 692-83, 692-99, 692-100, 702 III 7, 702 III 8a, 702 III 8b, 702 III 9, 702 III 10, 702 III 12, 702 III 15, 703 I 68, 703 I 64a, 704 I 123, 704 I 123b, 704 I 123c, 704 I 123d, 704 II 144, 704 II 149, 704 III 156, 704 III 161, 704 III 161a, 704 III 166a, 704 III 166a, 704 III 167, 708 III 35, 740, 899, 917, 2053, 2116, 2215, 2571, 2576.

Ms: manuscrits de la bibliothèque centrale entrés par voie extraordinaire. Cotes consultées 66 T. III, 70 T. VII, 276, 326, 367, 433,

SH : bibliothèque de la marine. Cotes consultées 55, 56, 57, 58, 323.

Dossiers personnels consultés : 142 (Beautemps-Beaupré), 474 (Chazallon Antoine-Marie-Rémi), 612 (Daussy Pierre), sans numéro (Guepratte Charles).

2.6. Services historiques de la Défense – Armée de Terre - Vincennes

Archives du génie consultées : article 8 (places françaises) – section 1 (1677-1878) ; article 21 (objets d'arts) – section 9 (travaux hydraulique) § 6 (ports de mer, cales, et formes pour les navires, jetées, balises, marées, phares 1680-1884) numéros 13 et 21.

2.7. Bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (Marne-la-Vallée)

MS : manuscrits. Cotes consultées : 120, 233, 299, 313, 3(34), 353, 1083, 2531, 2450, 2608, 2896, 3007, 3048.

DA : plan. Cote consultée : 5.

PH : photographie. Cotes consultées : 127-18 A09, 127-18 A10, 127-18 A11, 127-18 A12, 127-18 A36, 127-18 A38 (idem que 385 P1), 127-18 A39. 520.P1, 520P2, 520 P3, 520 P4, 520 P5, 520 P6 non disponibles le 26 juillet 2005.

2.8. Archives départementales

2.8.1. de Charente-Maritime

J : documents entrés par voie extraordinaire. Cotes consultées : 4J3362, 12J3, 12J106, 12J116, 27J1, 27J2, 27J3, 27J4, 27J5, 27J6, 27J7, 27J8, 27J9, 27J10, 27J11, 27J12, 43J sup34, 43J sup35-36, 43J238, 43J sup334.

DDE : DDE service maritime – Ponts et chaussées. Cotes consultées : 58, 85, 2809, 3341, 3441, 3509, 3652, 3965, 4115, 5659.

1294 W : travaux publics et transports. Fonds des travaux publics Service Maritime. Cotes consultées : 134, 222, 329, 646.

2.8.2. d'Ille et Vilaine

S : Ponts et chaussées. 3S523, 3S604, 3S726, 3S727, 3S728, 3S729, 3S730, 3S731, 3S732, 3S733, 3S734, 3S735, 4S5004, 4S5005, 4S5236, 4S5261, 4S5262, 4S5263.

2.8.3. de l'Hérault

C : Intendance de Languedoc. Cotes consultées : 748-757, 5795-5798, 5799-5800

D : Instructions publiques, sciences et arts. Cotes consultées : 116, 117, 132, 136-142, 144-150, 158, 190, 191, 204, 261.

S : travaux publics et transports. Cotes consultées : 1S664, 4S135.

Acronymes et abréviations

BM	Basse Mer ;
BMO	Brest Métropole Océane ;
BODC	British Oceanographic Data Centre ;
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières ;
CANDHIS	Centre d'Archivage National de Données de Houles In-Situ ;
CARAN	Centre d'Accueil et de Recherche des Archives Nationales ;
CCI	Chambre de Commerce et d'Industrie ;
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique ;
CETMEF	Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales ;
CG	Conseil Général ;
CNEXO	Centre National pour l'EXploitation des Océans (futur IFREMER) ;
COI	Commission Océanographique Intergouvernementale (voir IOC) ;
COM	Collectivité d'Outre-Mer ;
CR	Conseil Régional ;
CRAS	Comptes Rendus de l'Académie des Sciences ;
DCC	Débit Caractéristique de Crue ;
DCE	Débit Caractéristique d'Etiage ;
DDE	Direction Départementale de l'Equipement ;
DEUC	Direction de l'Environnement, de l'Urbanisme et de la Construction ;
DOM	Départements d'Outre-Mer ;
EDF	Electricité De France ;
EPSHOM	Etablissement Principal Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (voir SHOM) ;
ESEAS	European SEA level Service;
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (voir IPCC) ;

GLOSS	Global Sea Level Observing System (Acronyme originel : Global Level Of the Sea Surface) ;
GODAR	Global Oceanographic Data Archaeology and Rescue ;
ICSU	International Council for Science ;
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploration de la MER ;
IGN	Institut Géographique National ;
IHO	International Hydrographic Organization (voir OHI) ;
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (voir GIEC) ;
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission (voir COI) ;
IPCC	International Panel on Climate Change (idem GIEC, acronyme français) ;
IPGP	Institut de Physique du Globe de Paris ;
ISTPM	Institut Scientifique et technique des Pêches Maritimes ;
MCM	Marégraphe Côtier Mécanique ;
MCN	Marégraphe Côtier Numérique ;
MF	Météo France ;
MHA	Mission Hydrographique de l'Atlantique ;
MHARS	Histoire et Mémoire de l'Académie des Sciences ;
MHW	Mean High Water ;
MLW	Mean Low Water ;
MN	Marine Nationale ;
MSL	Mean Sea Level (voir NMM et NMa) ;
MTL	Mean Tide Level (niveau moyen de mi-marée) ;
MTR	Mean Tidal Range (niveau du marnage moyen) ;
NGF	Nivellement Général de la France ;
NMa	Niveau Moyen annuel de la mer ;
NMj	Niveau Moyen journalier de la mer ;
NMm	Niveau Moyen mensuel de la mer ;
NMM	Niveau Moyen de la Mer ;

OCA	Observatoire de Côte d'Azur ;
OCI	Ouvrages, cartes et Instruments ;
OHI	Organisation Hydrographique Internationale (voir IHO) ;
OMM	Organisation Météorologique Mondiale (voir WMO) ;
ORSTOM	l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (futur IRD) ;
PA	Port Autonome ;
PAB	Port Autonome de Bordeaux ;
PAD	Port Autonome de Dunkerque ;
PAH	Port Autonome du Havre ;
PAM	Port Autonome de Marseille ;
PANSN	Port Autonome de Nantes – Saint-Nazaire ;
PAR	Port Autonome de Rouen ;
PM	Pleine Mer ;
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level ;
PREVIMER	observations et PREVIions côtières des MERs ;
PTWS	Pacific Tsunami Warning System;
RMS	Root Mean Square (Ecart quadratique moyen en français) ;
ROSAME	Réseau d'Observation Sub-antarctique et Antarctique du niveau de la MER ;
SHD	Service Historique de la Défense ;
SHM	Service Hydrographique de la Marine (ancienne appellation du SHOM) ;
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine ;
SM	Service Maritime ;
SME	Service Maritime de l'Équipement ;
SMH	Service Maritime et Hydraulique ;
SONEL	Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales ;
STCPMVN	Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables ;
TC	Temps Civil ;

TSM	Temps Solaire Moyen ;
TSV	Temps Solaire Vrai ;
TU	Temps Universel ;
UHSLC	University of Hawaii Sea Level Center ;
UNEP	United Nations Environment Program ;
WCRP	World Climate Research Programme ;
WMO	World Meteorological Organization (voir OMM) ;

Résumé :

Les estimations récentes montrent que le niveau moyen de la mer a monté de quelque vingt centimètres au cours du siècle dernier avec un rythme supérieur depuis 1993 (entre 2,9 et 3,7 mm/an). Cette évolution aura un impact sur les populations côtières et sera à l'origine de risques naturels accrus. Ainsi les composantes du niveau marin font l'objet de nombreux travaux scientifiques d'autant qu'ils font partie des meilleurs indicateurs pour évaluer le réchauffement climatique. Les études montrent qu'il faut disposer de séries temporelles de mesures supérieures à 60 ans pour estimer des tendances fiables sur les composantes du niveau marin. L'observation et la reconstitution des fluctuations de ce niveau sur les derniers siècles s'inscrivent au cœur des grands programmes de recherche sur le réchauffement planétaire.

Ces estimations masquent une grande variabilité d'une région à une autre. Qu'en est-il pour la côte atlantique française ? Le niveau moyen de la mer a-t-il évolué ? Quand ? De combien ? Autant de questions auxquelles nous allons tenter de répondre dans la partie II avec la série marégraphique de Brest, observatoire exceptionnel où des mesures systématiques du niveau de la mer sont réalisées depuis 1679 !

Mais avant cela, il était nécessaire de rechercher toutes les données anciennes de marégraphie potentiellement encore en archives, et dont la validation devait se révéler difficile. La partie I traite alors de l'évolution des méthodes d'observation du niveau marin en France, préalable indispensable au ciblage de nos recherches de mesures anciennes, d'une part, et donnée fondamentale pour compléter les séries d'observations contemporaines par les mesures anciennes retrouvées, d'autre part.

Mots clés :

Niveau moyen de la mer, composantes du niveau marin, réchauffement climatique, série temporelle, tendances, côte atlantique française, Brest, marégraphie, archives, mesures anciennes.

Abstract :

Recent estimations show that the average sea level has risen up to about 20 cm over the last century, and even at a higher rate since 1993, (between 2.9 and 3.7 mm a year). This evolution will affect coastal populations and will create higher natural risks. Recently, sea level components have accordingly been the subject of numerous scientific studies, all the more as they are one of the best indicators to evaluate global warming. Studies show that it is necessary to process data time series longer than 60 years in order to infer significant trends for the sea level components. Observation and reconstitution of sea level fluctuations over the last centuries are at the heart of global warming research programs.

Those estimations hide a large variability from one region to another. What about the French Atlantic coast? Has the sea level changed? When? How much? These questions will be answered in part II with the Brest tide gauge series, an exceptional data centre where systematic sea level measurements have been obtained since 1679!

Prior to this work, however, one had to search in archives for all the possible old tide gauge data, the validation of which happened to be a quite difficult task. Hence, Part I first deals with the evolution of French sea level observations methods, both a prerequisite for targeting our old data research and a fundamental background to complete the contemporary observations series with the newly found old data.

Keywords :

Average sea level, sea level components, global warming, time series, trends, French atlantic coast, Brest, tide gauge, archives, old data.