

**Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA
Spécialité TOPOGRAPHIE**

**Etude Critique des Observations du Marégraphe de
Marseille réalisées par le Service de Géodésie et
Nivellement de l'Institut Géographique National**

Présenté en **Septembre 2003** par **Vincent PHILIPPE**

Réalisé au sein de l'entreprise :

**Institut Géographique National
2 Avenue Pasteur
94165 ST-MANDE Cedex**

Directeur de PFE :

**M. BONNETAIN Paul
Ingénieur Divisionnaire des
Travaux Géographiques et
Cartographiques de l'Etat**

Correcteurs :

**M. LEDIG
M. FERHAT**

Remerciements

Je tiens à saluer ici l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation et à l'aboutissement de cette étude.

Tout d'abord mes remerciements s'adressent aux personnes qui ont proposé le sujet d'étude et qui m'ont encadré tout au long de ce stage : *MM. Paul Bonnetain, Guy Wöppelmann et Patrick Sillard*. Au travers des discussions, ils m'ont apporté une compréhension plus approfondie des divers aspects du sujet, tout en me laissant une grande liberté pour mener à bien ce travail.

Je remercie, *MM. Bernard Simon, Renand Leroy et François Lucas* du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine qui ont notablement contribué à compréhension des problèmes liés à la marégraphie. En outre, je suis reconnaissant de leur accueil et de la disponibilité dont ils ont fait preuve pour discuter des aspects scientifiques et techniques du sujet.

Ma reconnaissance s'adresse également à *MM. Loïc Guegan et Alain Desmurs* pour leur aide concernant le nivellement, les marégrammes et la données numérisées.

Je remercie également l'ensemble du personnel l'Institut Géographique National qui m'a accueilli durant six mois pour effectuer ce travail.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour son soutien tout au long de mes études.

Résumé

La mise en place du marégraphe de Marseille a été décidée en 1883 par le Service du Nivellement Général de la France et a eu pour but la définition de l'origine du Système Altimétrique Français. Aujourd'hui, l'intérêt scientifique de ces observations est d'une grande importance, notamment pour l'étude de l'élévation du niveau des mers entre 1885 et 2002.

Le marégraphe à flotteur de Marseille est un appareil qui fournit deux séries de mesures: les enregistrements sur papier, appelés marégrammes, qui donnent la variation temporelle du niveau de la mer. La deuxième série de mesures est constituée des moyennes temporelles du niveau de la mer, obtenues avec le totalisateur. Le besoin de données numériques horaires a conduit l'Institut Géographique National (IGN), en collaboration avec le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), à numériser les marégrammes et à mettre en place un Marégraphe Côtier Numérique (MCN) en juillet 1998. Cette Etude a donc pour objet de faire un bilan sur la qualité des observations et des données du Marégraphe de Marseille. Les objectifs de ce stage se situent à plusieurs niveaux :

- ✓ une étude critique des données numérisées
- ✓ Etude des performances des marégraphes.
- ✓ L'étude de la stabilité locale du marégraphe.

Connaissances sur la marégraphie

La marée

La marée observée est le fruit de la combinaison entre la « mécanique céleste » et la « mécanique des fluides » par suite du milieu sur lequel elle s'exerce [DAR 71].

L'analyse harmonique est une méthode pratique et précise de prédiction de marée. Cette marée théorique est obtenue à partir d'une formule théorique qui est la somme de termes périodiques fonction du temps, de la forme $C \cdot \cos(q \cdot t - \alpha)$ et s'appuie sur la détermination des paramètres à partir d'observations. Il faut noter que les résultats sont uniquement valables là où les observations ont eu lieu.

La variation du niveau de la mer est soumise à diverses influences en plus du phénomène de marée, comme les phénomènes atmosphériques, la circulation océanique, la variation stérique (volume spécifique de l'eau) et la variation de la température de l'eau.

Les marégraphes

Les marégraphes permettent la mesure instantanée de la hauteur de l'eau, au-dessus d'une référence prédéfinie, dans le temps.

Le marégraphe à flotteur : Le déplacement vertical du flotteur est transmis à la crémaillère qui entraîne le chariot du système traceur et le système enregistreur. Le système traceur permet un enregistrement analogique, sous forme de rouleaux de papier, appelés marégrammes, où la courbe représente les hauteurs d'eau instantanées en fonction du temps. La particularité du marégraphe de Marseille provient de sa composante Totalisateur. Ce mécanisme permet d'obtenir le niveau moyen de la mer pendant un intervalle de temps quelconque.

Marégraphe côtier numérique (MCN) : Ce sont les marégraphes à capteur ultrasonore installés dans les observatoires permanents [ALL 97]. Le principe de fonctionnement de ce type d'appareil est le calcul du temps écoulé entre l'émission et la réception du signal sonore qui est traduit en hauteur d'eau.

Traitements et analyses des données numérisées

Les données numérisées se présentent sous la forme de fichiers, chaque fichier correspond à une année de mesures et chaque ligne du fichier correspond à une journée de mesures, soit 24 mesures pour chaque heure ronde de la journée. Chaque mesure est un entier et l'unité est le centimètre.

Analyse de la structure et bilan général des fichiers

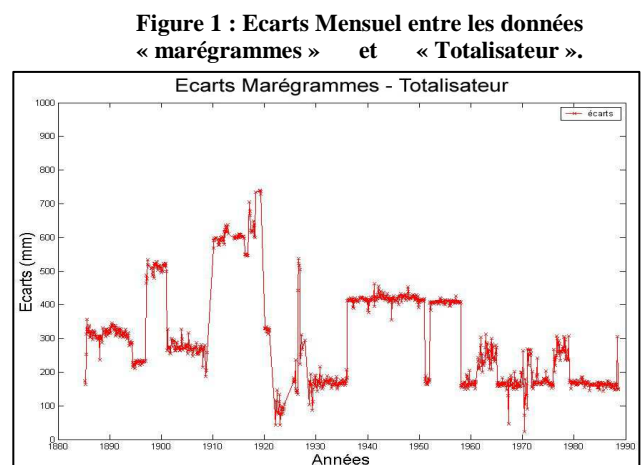
Les fichiers ont deux formats possibles, l'un avec des espaces entre chaque mesure et l'autre sans espace. L'uniformisation des données m'a permis de déceler des problèmes dans les fichiers. Ils sont des conséquences directes de la numérisation et concernent principalement des doublons. Ces doublons font suite à des journées digitalisées deux fois par l'opérateur.

L'implémentation d'un programme de détection des doublons et d'un deuxième programme de détermination du type d'erreur m'a permis d'automatiser la détection et de donner rapidement une idée sur l'origine du doublon. Cependant, ils n'empêchent pas l'incompréhension de certains cas de doublons. Ce qui m'a obligé à regarder en détail les marégrammes et de constater les problèmes suivant pour certaines années :

- ✓ Deux références différentes utilisées entre les marégrammes lors de la numérisation.
- ✓ L'hypothèse de décalages temporels pour certaines années numérisées.

Comparaison entre les données numérisées et les données du totalisateur

L'utilisation du totalisateur comme référence semble être pertinente puisque ses données ont toujours été suivies et contrôlées par l'IGN. De plus les deux mesures sont censées correspondre exactement puisque les deux systèmes dépendent du déplacement de la crémaillère du marégraphe. Etant donné que les données du totalisateur sont mensuelles, la comparaison se fait à un niveau mensuel. Cette étude permet en particulier de mettre en avant les problèmes de référence des hauteurs d'eau et d'identifier les années qui posent problèmes et donc de faire les premières corrections.



Utilisation de l'outil : prédiction de la marée

MAS est un programme d'analyse de la marée du SHOM. Il permet d'avoir les constantes harmoniques de la marée et à partir de ces constantes le programme détermine une marée prédite que l'on compare aux observations. Il peut faire une étude sur les décalages en temps au niveau journalier et donc de faire des corrections au niveau temporel. Ce calcul ne permet pas de détecter les déphasages de 12 heures et plus puisque le calcul se fait sur une journée. Afin de palier à ce problème, j'ai procédé à une étude harmonique détaillée de chaque année et comparé les phases de constantes harmoniques afin de lever toute ambiguïté. Une étude des décalages horaires par autocorrélation sur les hauteurs d'eau a été faite et a amené aux mêmes résultats.

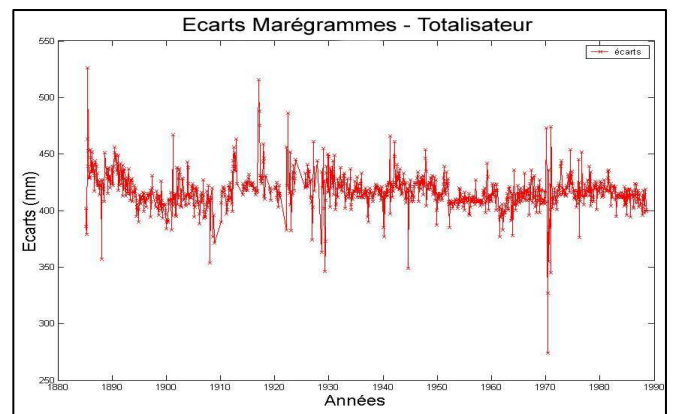
Problèmes dans les fichiers liés à la numérisation

Lors de la numérisation des erreurs de calages ont engendré des erreurs d'un facteur multiplicatif 0.5 ou 0.75 entre les valeurs lues sur les marégrammes et les données numérisées. Une fois que les années ont été identifiées, j'ai procédé à une correction des données numérisées.

Etudes des constantes du totalisateur

Une grande partie des erreurs au niveau des données numérisées proviennent de la numérisation, cependant une fois ces corrections apportées, des sauts entre 1885 et 1931 sont encore constatés. L'origine de ces sauts peut provenir du changement des constantes du totalisateur qui n'aurait pas été pris en compte par les mesures des marégrammes. Ainsi, la saisie des observations concernant le calcul de la profondeur du zéro des courbes a permis de faire la corrélation entre les sauts constatés et la variation de la constante. Cette étude a engendré de nouvelles modifications qui permettent d'aboutir au résultat de la figure 2.

Figure 2 : Ecart « Marégrammes-Totalisateur » après correction des données.



Etude des étalonnages et de la stabilité locale

Exploitation des étalonnages de 2000 à 2003 :

L'étalonnage consiste en la vérification de l'exactitude des mesures d'un instrument par comparaison avec des mesures références obtenues à l'aide d'un étalon. Pour un marégraphe cette opération permet de déterminer les variations éventuelles du zéro de l'instrument par rapport au zéro de référence et de contrôler les performances du marégraphe. Pour cela on utilise le test de Van de Castele. Ce test consiste en la comparaison, sur un cycle de marée complet, des relevés simultanés du marégraphe et de l'étalon. La différence des valeurs doit en théorie rester constante si le marégraphe est parfait et bien réglé. L'originalité de ce test réside en l'exploitation des résultats pour construire un diagramme dont la forme permettra d'apprécier les défauts éventuels du marégraphe.

Suite aux expériences d'étalonnages des deux marégraphe (Totalisateur et MCN) faites entre 2000 et 2003 on constate pour le marégraphe à flotteur un cycle d'hystérésis, cela traduit un jeu dans le système mécanique du marégraphe de l'ordre de 5 mm. En ce qui concerne le MCN on remarque à chaque fois une pente sur les diagrammes. Ce qui ressort principalement de ces analyses, c'est une interrogation sur le bon fonctionnement du MCN. Afin d'approfondir ce problème constaté sur les diagrammes de Van De Castel pour le MCN, j'ai réalisé une étude sur des constantes internes de correction des mesures du marégraphe acoustique.

Etude des performances du Marégraphe côtier numérique

Le marégraphe à ultrasons, basé sur la mesure du tirant d'air, calcule la hauteur d'eau en corrigeant la mesure tirant d'air avec un modèle de correction au second degré. Afin d'essayer d'avoir un élément de réponse à ce problème, j'ai procédé à une étude des constantes internes du marégraphe. Cette étude se base sur la détermination de nouvelles constantes internes à partir de chaque expérience d'étalonnage. Il ressort de cette étude que les modèles de correction sont significativement différents d'une expérience d'étalonnage à l'autre. Une explication possible serait la variation, d'une expérience à l'autre, du gradient de température dans le puits.

L'étude sur les données du MCN montre qu'à partir de novembre 2000 il ya un décalage temporel de 20 minutes entre la marée prédite et les observations du MCN. Une comparaison entre les données de l'échelle de marée, située à l'extérieur du puits et les données du MCN de l'expérience d'étalonnage de mars 2003 montre que le décalage de 20 minutes n'a pas comme origine le MCN. Il ressort également de la comparaison entre les données du MCN et du totalisateur un écart-type de l'ordre de 2.1 cm.

Etude de la stabilité de l'observatoire : Exploitation des opérations de nivellement

Pour cette étude on dispose d'un ensemble d'opérations de nivellement réalisées entre 1885 et 2003. L'étude se base sur la variation des altitudes des repères. J'ai fixé un repère de départ à son altitude connue, le point fondamental (1.661 mètres) puis à partir des dénivelées non compensées, calculé les altitudes de l'ensemble des autres repères. Pour finalement représenter pour chaque repère l'évolution de son altitude au cours des opérations d'observations.

Les données ne sont pas homogènes au niveau temporel, il est donc difficile d'interpréter ces informations. Il semble toutefois que le déplacement des repères par rapport au repère fondamental qui sert de référence sont dans la plus part des cas de signe positif et de faible amplitude, cependant elles sont plus importantes à l'Ouest de l'observatoire. Cela peut être interprété comme un soulèvement de cette zone par rapport à la zone située à l'Est.

Bilan sur les données du marégraphe

Les données issues des marégrammes

Il ressort d'une étude que ces données sont entachées d'un systématique de l'ordre de 7 mm. Ce systématisme doit avoir pour origine la numérisation, mais il doit également être la résultante de beaucoup d'autres phénomènes notamment mécaniques. L'autre ordre de grandeur à retenir pour cette partie est l'estimation de la précision des valeurs des hauteurs horaires des marégrammes de 12 millimètres par rapport au totalisateur.

Au niveau temporel, à partir de 1960 on constate une dérive temporelle importante allant jusqu'à une heure. Par contre entre 1885 et 1960 il y a une légère pente de l'ordre de -30 secondes par an. Cette pente peut être attribuée à une dérive de l'horloge.

Les données totalisateur

L'exploitation des expériences d'étalonnages permet de mettre en avant une estimation sur la précision du fonctionnement du marégraphe à flotteur. Ainsi, l'instrument permet de garantir une précision de l'ordre de 3 mm avec une bonne stabilité dans le temps, néanmoins cette précision est garantie à condition de faire un contrôle régulier et un calcul des nouvelles constantes du totalisateur annuellement.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	<i>II</i>
<i>Résumé</i>	<i>III</i>
<i>Table des matières</i>	<i>VII</i>
<i>Introduction</i>	<i>1</i>
Chapitre 1	3
<i>Connaissances sur la marégraphie</i>	<i>3</i>
1.1 La marée	3
1.1.1. Généralités	3
1.1.2. Les théories sur la marée	4
1.1.3. Prédiction et analyse harmonique	5
1.2 Variation du niveau de la mer	6
1.2.1 Effets atmosphériques	6
1.2.2 Effets saisonniers	6
1.2.3 Phénomènes climatiques	6
1.2.4 Surcotes - décotes :	7
1.3 Les marégraphes	7
1.3.1 Le marégraphe à flotteur	8
1.3.2 Marégraphe côtier numérique	10
1.4 Etalonnage	11
1.4.1 Principe	11
1.4.2 Test de Van de Castele	12
1.5 Etude sur la numérisation	13
1.5.1 Description des données et méthodes de contrôle qualité	13
1.5.2 Traitement des données et analyse des résultats	14
Chapitre 2	17
<i>Traitements et analyses des données marégraphiques</i>	<i>17</i>
2.1 Pratique de la numérisation : numérisation - mode opératoire – description	17
2.2 Analyse de la structure et bilan général des fichiers	19
2.3 Comparaison entre les données numérisées et les données du totalisateur	21
2.4 Utilisation de l’outil : prédiction de la marée	22
2.4.1 Limites et développement d’une nouvelle méthode	23
2.5 Problèmes dans les fichiers liés à la numérisation	28
2.6 Etude du décalage horaire par corrélation	30
2.7 Etudes des constantes du totalisateur	33

Chapitre 3	37
<i>Etude des étalonnages et de la stabilité locale</i>	37
3.1 Expérience et analyse d'un étalonnage	37
3.1.1 Participation à l'étalonnage du 19/03/2003	37
3.1.2 Exploitation des résultats des étalonnages	40
3.2 Marégraphe côtier numérique	42
3.2.1 Formule d'étalonnage	43
3.2.2 Etude des constantes internes du MCN	44
3.2.3 Etude des mesures du MCN entre 1998 et 2003	47
3.3 Stabilité de l'observatoire : Exploitation des opérations de nivellement	50
3.3.1 Les données	50
3.3.2 Précision des données	51
3.3.3 Méthode utilisée pour l'exploitation des données	51
3.3.4 Résultats	52
Chapitre 4	53
<i>Bilan sur les données Marégraphique</i>	53
4.1 Bilan sur les modifications des fichiers	53
4.2 Bilan sur les données	55
4.2.1 Données des marégrammes	55
4.2.2 Les données totalisateur	57
4.2.3 Les données du MCN	58
<i>Conclusion</i>	59
<i>Annexe A : L'observatoire et le marégraphe</i>	60
<i>Annexe B : La marée</i>	65
<i>Annexe C : Les fichiers des marégrammes numérisés</i>	66
<i>Annexe D : Liste des opérateurs de la numérisation et information sur les références de marégrammes</i>	70
<i>Annexe E : Exemples des fichiers de sortie des programmes d'analyse des fichiers numérisés.</i>	73
<i>Annexe F : Constantes de l'instrument</i>	77
<i>Annexe G : Programme de calcul des constantes internes du MCN</i>	88
<i>Annexe H: Résultats de l'exploitation des nivellements</i>	91
<i>Bibliographie</i>	103
<i>Sigles et abréviations</i>	104
<i>Table des illustrations</i>	105

Introduction

La mise en place du marégraphe de Marseille a été décidée en 1883 par le Service du Nivellement Général de la France et a eu pour but la définition de l'origine du Système Altimétrique Français. C'est en effet le niveau moyen de la mer observé par le marégraphe de Marseille entre 1885 et 1897 qui le définit. La faible amplitude de la marée de la Mer Méditerranée et la situation de Marseille, loin de tout apport d'eau douce, ont motivé le choix de l'Anse Calvo comme lieu d'implantation du Marégraphe. Aujourd'hui, l'intérêt scientifique de ces observations est d'une grande importance, notamment pour l'élévation du niveau des mers, étant donné que ces données couvrent une période d'observation de 118 années entre 1885 et 2002.

Le marégraphe à flotteur de Marseille est un appareil original mis au point au 19^e siècle par Charles LALLEMAND, le caractère original du marégraphe vient du fait qu'il fournit deux séries de mesures : Les enregistrements sur papier, appelé marégramme, qui donnent la variation temporelle du niveau de la mer. La deuxième série de mesures est constituée des moyennes temporelles du niveau de la mer, obtenues avec le totalisateur, qui fournit le niveau moyen de la mer pour une période donnée.

Concernant le marégraphe à flotteur, les mesures ont débuté en 1885 et se sont arrêtées en 1988 pour celles des marégrammes, par contre celles du totalisateur qui étaient journalières entre 1885 et 1988, sont devenues hebdomadaires et continuent encore aujourd'hui. Le besoin de données numériques horaires a conduit l'Institut Géographique National (IGN) à numériser les marégrammes et à mettre en place un Marégraphe Côtier Numérique (MCN) en juillet 1998.

Ainsi, afin de pouvoir exploiter les données des marégrammes, l'IGN en collaboration avec le Service Hydrographique et Océanique de la Marine (SHOM) a entrepris la numérisation de ces graphiques. Cette numérisation s'est achevée au cours de l'année 2001. Une première étude sur les données numérisées a été réalisée en 2001 par Anne MINEAUD à l'Université de La Rochelle. Elle a permis de constater et de soulever un certain nombre d'interrogations à propos de ces données.

Cet observatoire du niveau de la mer, ainsi que l'ensemble des données enregistrées sont sous la responsabilité de l'IGN, de plus il faut noter que l'IGN n'a pas l'expertise en marémétrie, ainsi aucun contrôle qualité n'a été appliqué sur les données numérisées. Ce Projet de Fin d'Etude a donc pour objet de faire un bilan sur la qualité des observations et des données du Marégraphe de Marseille.

Aux vues des divers instruments et types de mesures qui englobent ce sujet, les objectifs de ce stage se situent à plusieurs niveaux :

- ✓ La modélisation des erreurs dans les données numérisées.
- ✓ L'exploitation des étalonnages : analyse des conséquences sur les marégrammes.
- ✓ La comparaison entre les deux types de marégraphes.
- ✓ L'étude de la stabilité locale du marégraphe.

En premier lieu, l'objectif principal de ce stage est de réaliser une étude critique des données numérisées, c'est à dire trouver et appliquer des procédures d'analyses et de contrôles des données issues de la numérisation des marégrammes.

Dans un second temps d'exploiter les expériences d'étalonnages qui ont été menées de manière plus ou moins fréquentes et régulières au cours de l'histoire du marégraphe pour recalibrer sa référence et étudier ses performances. L'étalonnage, est également un moyen de contrôle du bon fonctionnement du marégraphe moderne à capteur ultrason.

Le marégraphe à propagation d'ondes acoustiques doit remplacer à terme le marégraphe mécanique et dans cette optique il est nécessaire d'observer une période de recouvrement d'au moins dix ans afin de pouvoir s'assurer de son bon fonctionnement, mais également pour garantir la continuité des données marégraphiques dans le temps. Une analyse comparée peut permettre de détecter d'éventuelles erreurs systématiques qui affecteraient l'un ou l'autre des instruments.

Enfin, le repère principal du marégraphe est aussi le repère fondamental du réseau du Nivellement Général de la France. Il a fait l'objet de nombreuses mesures de nivellement de précision. L'idée est de compiler ces données et de les exploiter afin d'étudier la stabilité locale du site. Les données fournies par le GPS installé en 1999 seront comparées aux résultats de l'étude des nivellements.

Ce mémoire est découpé en quatre parties principales, dont nous donnons ici une brève présentation.

La première partie fait état des connaissances sur la marégraphie nécessaires à la compréhension de cette étude. Elle apporte quelques notions générales importantes sur la marée et les marégraphes. J'expose également la démarche et les résultats de l'étude réalisée en 2001 sur les données numérisées des marégrammes.

La deuxième partie concerne l'étude des données numérisées des marégrammes. Elle met en avant l'ensemble des outils et des méthodes utilisés dans le but d'analyser et de contrôler ces données issues de la numérisation des marégrammes.

La troisième partie concerne l'évaluation des performances de l'observatoire dans sa globalité. Elle s'attache à l'étude qualitative du fonctionnement du marégraphe à flotteur et du Marégraphe Côtier Numérique et à l'étude de la stabilité locale de l'observatoire.

Enfin, la quatrième et dernière partie est consacrée à un bilan final sur les modifications faites au niveau des données numérisées et sur les données de chaque instrument.

Chapitre 1

Connaissances sur la marégraphie

Préalablement à l'étude des données et des observations faites au Marégraphe de Marseille, il est nécessaire de définir des notions comme celle de la marée ou de la variation du niveau de la mer indispensables à la compréhension de cette étude. L'importance de la connaissance des instruments de mesures et des méthodes d'analyses des données est également essentielle. C'est pourquoi elle fait l'objet de cette première partie.

1.1 La marée

1.1.1. Généralités

Définition

« La marée est le phénomène périodique de montée et de baisse du niveau de la mer dû à l'action de la lune et du soleil. » [DAR 71], c'est donc un phénomène périodique et d'origine astronomique.

La marée observée est le fruit de la combinaison entre la « mécanique céleste » et la « mécanique des fluides » par suite du milieu sur lequel elle s'exerce [DAR 71]. La complexité qui en découle explique le temps mis pour la compréhension globale du phénomène.

Le phénomène

Le but de l'étude des marées est la compréhension du phénomène de marée, c'est à dire la recherche de la relation entre le mouvement des astres et l'interaction de ces derniers avec les océans par l'intermédiaire des forces gravitationnelles qu'ils génèrent, afin de mettre en place des formules de prédiction.

Les types de marées

La marée résulte principalement de la superposition de deux composantes. Une première appelée composante diurne car elle a une période proche de 24 heures (un maximum et un minimum par jour) et la seconde appelée composante semi-diurne car elle a une période de l'ordre de 12 heures (deux maximums et deux minimums par jour). C'est à partir de ces deux composantes prédominantes et variables géographiquement que l'on définit 4 types de marées [DAR 71] :

- ✓ **marée semi-diurne** : composante diurne négligeable.
Mer ou Océan où l'on observe chaque jour deux pleines mers et deux basses mers ayant sensiblement la même hauteur.
- ✓ **marée semi-diurne à inégalité diurne** : composante semi-diurne dominante.
Mer ou Océan où l'on observe deux pleines mers et deux basses mers, mais il peut y avoir une forte inégalité entre les hauteurs des pleines et basses mers.

- ✓ **marées mixtes** : composante diurne dominante.
Mer ou Océan où l'on observe successivement une période diurne et une période semi-diurne.
- ✓ **marées diurnes** : composante semi-diurne négligeable.
Mer ou Océan où l'on observe une seule pleine mer et une seule basse mer par jour.

En Europe, le type de marée qui prédomine est la marée de type semi-diurne et c'est le cas à Marseille.

En fonction du lieu sur le globe, le type de marée et son amplitude sont variables : il n'y a pas de règle générale. L'amplitude est de l'ordre de 40 cm en Méditerranée et peut atteindre 12 mètres dans la baie du Mont Saint-Michel.

1.1.2. Les théories sur la marée

L'observation de la marée tout comme la conscience d'un lien entre la marée et la phase de la lune a été faite relativement tôt, dès les premières observations des scientifiques dans l'antiquité. Mais ce n'est qu'au XVIII^e siècle avec la découverte de la loi sur la gravitation de Newton qu'est apparue la première théorie plausible sur l'origine des marées.

Newton : la théorie Statique

Selon cette théorie, à chaque instant la surface des mers prend la figure d'équilibre correspondant à la position de l'astre attirant. Il montre que la marée trouve son origine dans l'attraction exercée sur les molécules des océans, d'une part par la lune en raison de sa proximité et d'autre part par le soleil en raison de sa masse. Il faut noter que l'influence des autres planètes est considérée comme négligeable.

Cette théorie permettait d'expliquer un certain nombre de phénomènes comme la période fondamentale de 12 heures lunaires ou la relation entre l'amplitude et les phases de la lune. Cependant, la différence constatée entre les amplitudes théoriques et observées montre les insuffisances de cette théorie statique limitée par le manque de connaissances en mécanique des fluides. Ainsi, cette théorie ne permettait pas d'expliquer le retard des vives eaux, appelé âge de la marée au moment de la pleine ou nouvelle lune. Cette théorie a néanmoins permis de poser les bases du problème.

Laplace : Théorie dynamique

Ce n'est qu'un siècle plus tard que LAPLACE introduisit le potentiel générateur de marée. Il fut ainsi le premier à considérer la marée comme un problème de mouvement de masses d'eau et non comme un problème statique. Cette théorie s'appuie sur deux principes essentiels, le premier principe est celui des Oscillations forcées, c'est à dire que les oscillations des molécules des océans sont de la même période que les forces auxquelles elles sont soumises et le second sur celui de superposition, suivant lequel le mouvement total d'un système soumis à de petites forces est la somme des mouvements partiels élémentaires périodiques. La période de chaque mouvement élémentaire correspond à la période de la force à l'origine du mouvement.

La marée est donc considérée comme la superposition d'ondes de gravité dont on connaît les périodes déduites des périodes caractéristiques des astres. Ce dernier point est fondamental puisque cela a permis de mettre en évidence trois termes distincts correspondant respectivement à une oscillation longue période, une oscillation diurne et une oscillation semi-diurne. Ce qui

permet ensuite d'obtenir empiriquement le déphasage (correspondant à l'âge de la marée) et la réponse en amplitude.

La formule de LAPLACE a servi pour le calcul de prédiction des marées pendant près de 150 ans, jusqu'à l'arrivée des ordinateurs. Mais c'est au XIX^{ème} siècle que KELVIN puis DARWIN ont apporté un progrès significatif au niveau du calcul des prédictions en poursuivant le travail de Laplace sous le nom de développement harmonique du potentiel [SIM 03].

La méthode harmonique

C'est en 1897 que Lord KELVIN a montré que l'on pouvait décomposer le potentiel générateur de la marée en une somme de termes périodiques fonction du temps, de la forme $C \cdot \cos(q \cdot t - \alpha)$. A chacun des termes correspond une marée élémentaire ayant une période caractéristique et la somme de ces marées élémentaires donne la marée réelle.

En fait, il y a eu principalement deux étapes concernant le développement des composantes harmoniques, une première formule amenée par DARWIN qui n'était pas purement harmonique puisque des facteurs correctifs doivent être apportés pour tenir compte de lentes variations (les termes peuvent être considérés comme constants sur une année et sont disponibles sous forme de tables). C'est en 1921 qu'un développement purement harmonique a été trouvé par A.T. DOODSON, qui formula un développement plus précis pour la longitude et la latitude de la lune. Ainsi le calcul ne nécessite plus de facteurs correctifs, ce qui facilite le traitement automatique.

1.1.3. Prédiction et analyse harmonique

La méthode harmonique a ainsi pu être appliquée à la marée et permet de fournir une méthode pratique et précise de prédiction de marée. Tout comme la formule de LAPLACE, la formule s'appuie sur des paramètres à déterminer expérimentalement à partir d'observations. L'obtention d'une bonne précision nécessite des observations de bonne qualité sur une année et il faut noter que les résultats sont uniquement valables là où les observations ont eu lieu.

Ainsi la formule harmonique de la hauteur de marée $h(t)$ à l'instant t peut s'exprimer de la manière suivante [SIM 03] :

$$h(t) = \text{Niveau Moyen} + \sum_i h_i \cdot \cos(V_{oi} + q_i \cdot t - G_i) \quad (\text{E.I.1})$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} h_i : \text{amplitude de la composante } i \quad (\text{en cm}) \\ V_{oi} : \text{argument astronomique à } t = 0 \text{ de la composante } i \quad (\text{en } ^\circ) \\ q_i : \text{vitesse angulaire de la composante } i \quad (\text{en } ^\circ \text{ par heure}) \\ G_i : \text{situation géographique de la composante } i \quad (\text{en } ^\circ) \end{array} \right.$$

Les amplitudes h_i et les situations G_i sont les constantes harmoniques de la marée. Une liste de ces composantes proposée par Darwin reste le plus souvent suffisante pour obtenir des résultats satisfaisants (Cf. Tableau des principales composantes en annexe B : B.I).

Pour plus de détails sur l'expression de la formule harmonique, il faut se rapporter à [DAR 71] ou [SIM 03].

1.2 Variation du niveau de la mer

Elle est soumise à diverses influences en plus du phénomène de marée, comme les phénomènes atmosphériques (les effets du vent et de la pression atmosphérique), la circulation océanique, la variation stérique (volume spécifique de l'eau) et la variation de la température de l'eau [WOP 95 b].

1.2.1 Effets atmosphériques

L'atmosphère exerce principalement sur la mer deux actions physiques distinctes. Tout d'abord la pression atmosphérique agissant verticalement sur la surface de la mer, elle est appelée effet de baromètre inversé. Une augmentation d'1 millibar de la pression atmosphérique fait baisser le niveau de la mer d'un centimètre [COI 85]. La deuxième action physique provient du vent. L'énergie mécanique entraîne les masses d'eau en surface par simple effet de frottement : La surélévation ou dépression du niveau de la mer causée par ce phénomène est appelée onde de tempête et son ordre de grandeur peut varier de 10 à 100 cm. Il faut y ajouter les mécanismes connus sous le nom de « downwelling » ou « upwelling » qui provient de l'action combinée du vent et de la force de Coriolis. Le courant marin qui en résulte est dirigé à 90° à droite de la direction du vent dans l'hémisphère Nord (90° à gauche dans l'hémisphère sud).

1.2.2 Effets saisonniers

Ces variations ont deux origines principales : tout d'abord les variations stériques qui correspondent au volume spécifique de l'eau lié aux variations du transport des courants, aux variations de température et de salinité liées au cycle évaporation - précipitation. La seconde origine est la variation saisonnière du champ de pression entraînant un effet de baromètre inversé.

1.2.3 Phénomènes climatiques

Un réchauffement général de la planète entraînera une augmentation de masse provenant de la fonte des glaciers continentaux, appelée composante eustatique et également une augmentation de volume due à la dilatation thermique des océans, appelée composante stérique.

Figure 1 : Tableau récapitulatif des signaux océaniques contenus dans les variations du niveau de la mer [WOP 95 b - LE PRO 91].

Signal	Amplitude	Périodes
Marées	100 – 200 cm	12 h, 24 h, mois, années, 19 ans
Effets de Baromètre inverse	1 à 10 cm	jour – semaine
Effet du Vent :		
Onde de Tempête	10 à 100 cm	2 à 10 jours
Upwellings Côtiers	10 à 100 cm	2 à 10 jours
Effets Saisonniers :		
Modulation des effets		
Météorologique	jusqu'à 40 cm	Annuelles
Effets stériques	jusqu'à 40 cm	Annuelles
Glaciation	1 mm/an	Très longs termes (séculaire à millénaire)
Apport de masse d'eau	1 mm/an	Très longs termes
Stérique	1 mm/an	Très longs termes

1.2.4 Surcotes - décotes :

On appelle surcotes - décotes, la différence d'amplitude qu'il y a entre des hauteurs d'eau observées et prédites. Elles ne proviennent donc théoriquement pas de la marée.

Ainsi, la prédiction des marées est entachée de variations d'hauteurs d'eau d'origine météorologique et la grande difficulté vient du fait que ces phénomènes météorologiques ne sont pas purement aléatoires, c'est à dire qu'ils peuvent suivre par exemple des rythmes saisonniers annuels dus aux variations annuelles des champs de pression atmosphérique ou des cycles diurnes provenant des vents thermiques [SIM 03]. Les phénomènes de marées ont ainsi des périodes communes avec les phénomènes météorologiques, ces derniers sont donc difficiles à distinguer de la marée.

1.3 Les marégraphes

Les marégraphes permettent la mesure instantanée de la hauteur de l'eau, au-dessus d'une référence prédéfinie, dans le temps. Les appareils les plus simples sont les échelles de marée qui consistent en une règle graduée. Les instruments à enregistrement les plus fréquents étaient les marégraphes à flotteur, remplacés maintenant par les marégraphes à capteur de pression et les marégraphes acoustiques.

Les marégraphes à flotteur ont été développés et implantés sur les côtes vers le milieu du XIX^e siècle afin de palier au travail pénible et routinier associé à l'échelle de marée qui est de plus limitée en précision et en exploitation par rapport à la continuité de la série de mesures. Je vais uniquement m'intéresser aux instruments de l'observatoire de Marseille qui sont le marégraphe à flotteur installé dans l'Anse Calvo entre 1884 et 1885 par le Service du Nivellement Général de la France (NGF) et le Marégraphe Côtier Numérique installé en 1998.

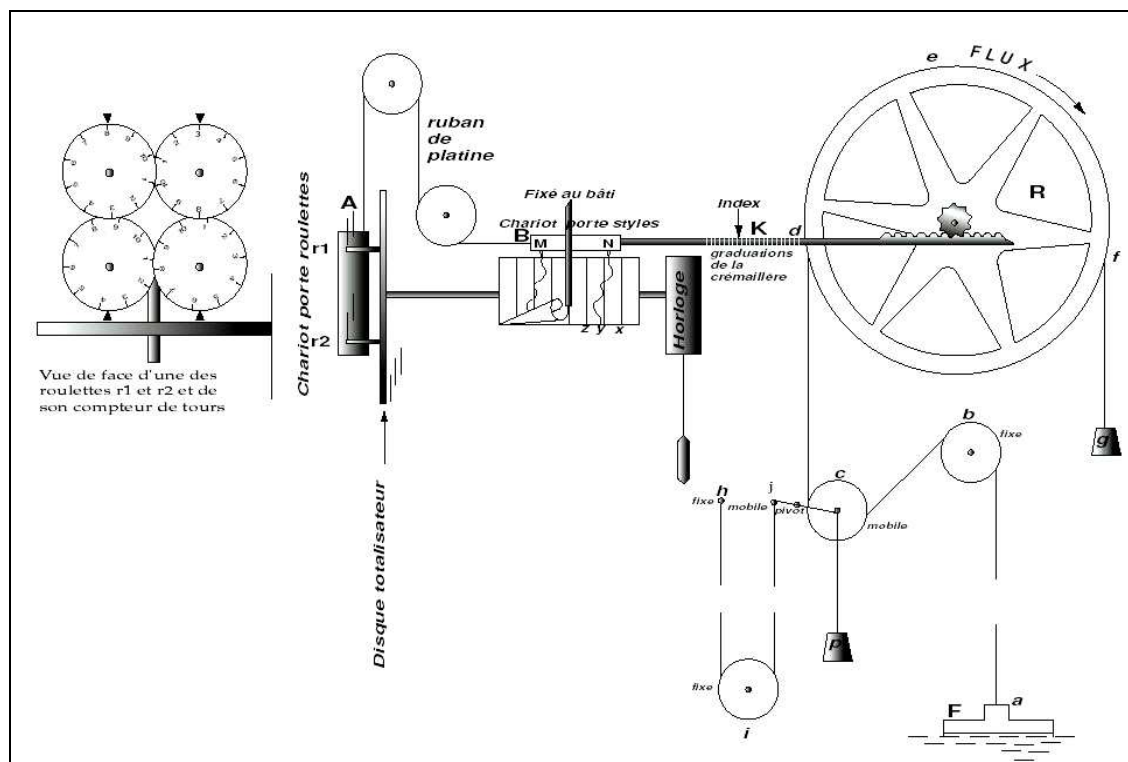
1.3.1 Le marégraphe à flotteur

Les oscillations de la marée s'exercent sur le flotteur F, situé au fond d'un puits en communication permanente avec la mer par l'intermédiaire d'une galerie (Cf. Annexe A : A.I) qui a une fonction de filtre passe bas, afin d'atténuer les phénomènes de haute fréquence comme la houle. Ainsi le flotteur n'est sensible qu'au mouvement moyen des vagues. La galerie et le puits sont théoriquement défendus contre tout apport de galet, de sable et contre la violence des vagues par divers écrans comme des grilles et une vanne, dont certains sont réglables.

Son principe de fonctionnement décrit schématiquement par la figure 2 est le suivant : Le déplacement vertical du flotteur F est transmis horizontalement, avec un rapport d'échelle de 1/10, à une crémaillère K par l'intermédiaire d'un ensemble plus ou moins compliqué de fils, poulies (i, e, c et b), contrepoids (p et g) et engrenages. Les variations thermiques des longueurs du fil de suspension f du flotteur sont compensées par les variations thermiques des fils de même nature reliés aux contrepoids. Le déplacement de la crémaillère K entraîne le chariot B du système traceur et du système enregistreur.

Concernant le système traceur, le chariot porte styles porte deux styles M et N, ces derniers inscrivent la courbe de la marée sur deux rouleaux de papier portés par un cylindre (Cf. annexe A : A.I) mû par une horloge. Le chariot comporte également trois autres styles fixes, qui tracent trois droites différentes servant de références. On obtient ainsi un enregistrement analogique, sous forme de rouleaux de papier, appelé marégramme, où la courbe représente les hauteurs d'eau instantanées en fonction du temps. On retrouve sur les marégrammes trois traits parallèles, le trait de référence étant celui du milieu.

Figure 2 : Principe de mesure du marégraphe à flotteur [WOP 97 – IGN 63].



La particularité du marégraphe de Marseille provient de sa composante Totalisateur A. Située sur la partie gauche du schéma, ce mécanisme constitué de roulettes et disques gradués permet d'obtenir le niveau moyen de la mer pendant un intervalle de temps quelconque. C'est un

intégrateur mécanique qui totalise les hauteurs d'eau, il mesure donc l'aire comprise entre les courbes des marées et l'axe des abscisses. Son fonctionnement est comparable à celui d'un planimètre qui permet de mesurer l'aire de surface plane. En divisant l'aire par l'intervalle de temps de la mesure, on obtient directement le niveau moyen de la mer.

Etant donné l'importance de cet instrument dans le cadre de cette étude, j'ai repris en annexe (CF. annexe A : A.II) la description détaillée du principe de fonctionnement du Totalisateur faite dans la thèse de Doctorat de M. WOPPELMANN [WOP 97]. Je me contenterai donc de rappeler la formule de calcul du niveau moyen de la mer :

$$f_m = h - (1.000 + \eta) - 0.1962 \times \frac{(\delta n' + \delta n'')}{\delta p} \quad (\text{en mètre}) \quad (\text{E.I.2})$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} f_m : \text{niveau moyen de la mer sur l'intervalle de temps } \delta p \\ \delta p : \text{intervalle de temps entre deux relevés des roulettes (en jours)} \\ \delta n' \text{ et } \delta n'' : \text{nombre de tour de roulette sur l'intervalle de temps } \delta p \\ h : \text{hauteur du zéro de la réglette au dessus du zéro NGF} \\ \eta : \text{le zéro du totalisateur correspond à la graduation } 1.000 + \eta \text{ de la réglette} \end{array} \right.$$

La réglette correspond à la graduation de la crémaillère sur la figure 2.

Les erreurs typiques des marégraphes à flotteur sont de divers ordres et concernent différentes parties du marégraphe [WOP 97] :

- ✓ **Le flotteur** : la variation du poids du flotteur, par exemple un problème d'étanchéité peut modifier l'équilibre du système.
- ✓ **Les fils de suspension** peuvent subir des allongements en raison des tensions perpétuelles exercées par le flotteur et les contrepoids.
- ✓ **Les rouages** : L'équilibre entre le flotteur et les contrepoids peut être modifié par grippage ou usure des rouages, ce qui peut changer le rapport de réduction et donc induire une erreur d'échelle.
- ✓ **Système d'enregistrement** : le style inscripteur peut présenter des défauts d'inertie et de retard d'un appareil mécanique
- ✓ **Le système d'horlogerie** : La rotation du tambour est commandée par un mécanisme d'horlogerie. La tension des ressorts, la température sont susceptibles d'entraîner des écarts de fonctionnement.

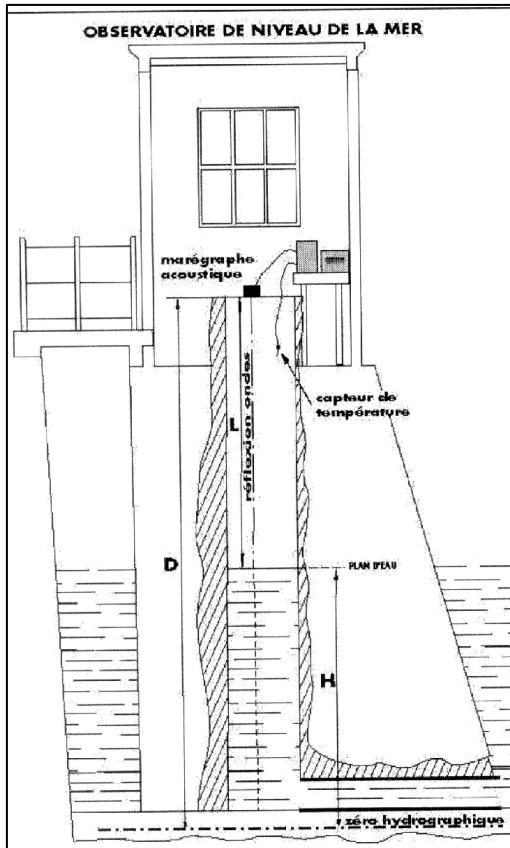
Il est important de noter que la référence de l'instrument pour la hauteur d'eau est le zéro NGF (Nivellement Général de la France). Nous allons nous intéresser maintenant au Marégraphe Côtier Numérique qui fait également partie de mon étude.

1.3.2 Marégraphe côtier numérique

On appelle Marégraphe Côtier Numérique (MCN) les marégraphes à capteur ultrasonore installés dans les observatoires permanents [ALL 97].

Le principe de fonctionnement de ce type d'appareil est le calcul du temps écoulé entre l'émission et la réception du signal sonore qui est traduit en hauteur d'eau suivant la formule de l'équation E.I.3.

Figure 3 : Principe de mesure du MCN [JAR 02]



$$H = D - \left(\frac{c \cdot \Delta t}{2} \right) \quad (\text{E.I.3})$$

avec

- h : hauteur d'eau mesurée (en m)
- d : cote du transducteur au dessus de la référence de l'observatoire (m)
- c : célérité acoustique dans l'air ($m \cdot s^{-1}$)
- Δt : intervalle de temps (s)

La célérité de l'onde acoustique dans l'air dépend essentiellement de la température (Cf. E.I.4), or cette condition est très variable que se soit à l'échelle de la journée ou de l'année. C'est pourquoi, cette grandeur est mesurée pour chaque mesure par un capteur de température afin de calculer la célérité de l'onde acoustique par la formule suivante :

$$c = 331.2 \times \left[1 + 0.97 \times \frac{U}{P} + 1.9 \cdot 10^{-3} \times T \right] \quad (\text{E.I.4})$$

avec

- c : célérité acoustique dans l'air ($m \cdot s^{-1}$)
- P : pression atmosphérique (hPa)
- U : humidité relative de l'air
- T : température de l'air ($^{\circ}C$)

On constate que la célérité de l'onde est beaucoup plus sensible aux erreurs introduites par les variations de température que par celles causées par les variations de la pression atmosphérique et de l'humidité. En effet des variations extrêmes de l'humidité et de la pression ($\Delta U = 90\%$ et $\Delta U = 300$ hPa) introduisent des erreurs millimétriques alors que des variations de température de quelques degrés engendrent des erreurs centimétriques [WOP 97].

Le zéro hydrographique est la référence altimétrique des cartes marines. Il correspond approximativement au niveau des plus basses mers possibles [GUE 01]. Cette référence est locale, en effet elle est déterminée pour chaque port à partir d'observations marégraphiques.

1.4 Etalonnage

1.4.1 Principe

L'étalonnage est l'action d'étalonner, cela consiste en la vérification de l'exactitude des mesures d'un instrument par comparaison avec des mesures références obtenues à l'aide d'un étalon. Ainsi, le principe de l'étalonnage est la comparaison entre les mesures indépendantes d'une même grandeur obtenues par l'intermédiaire de deux instruments : l'étalon qui sert de référence et le marégraphe qui doit être contrôlé.

Pour un marégraphe cette opération a un double objectif. Il permet de déterminer les variations éventuelles du zéro de l'instrument par rapport au zéro de référence, c'est à dire de mesurer la position de référence interne du marégraphe par rapport au repère de marée de l'observatoire. Cette opération a également pour but le contrôle des performances du marégraphe et en particulier sa précision et son bon fonctionnement.

Pour cela, on compare un grand nombre de fois sur un cycle de marée les mesures instantanées du marégraphe à contrôler avec celles faites par un étalon précis et indépendant. L'étalon est théoriquement considéré comme parfait, ainsi les erreurs sont attribuées au marégraphe. Toutefois, ce qui semble le plus important pour les mesures d'un instrument étalon, c'est l'exactitude ou la justesse des mesures, ainsi l'absence d'erreur systématique est primordiale. D'ailleurs l'échelle de marée est encore utilisée comme étalon, même si la précision des lectures est de l'ordre de quelques centimètres, cette précision provient d'erreurs d'observations ou d'erreurs accidentelles, toutes deux aléatoires. Si ces erreurs accidentelles sont nombreuses, indépendantes, indifféremment positive ou négative et ou chacune d'elle est petite par rapport à la somme de toutes les autres, on admet qu'elles suivent une loi de probabilité normale de moyenne nulle et d'écart type σ . Cela explique donc la nécessité de réaliser un grand nombre de mesures. Cela explique également le fait que l'opération d'étalonnage s'effectue sur un cycle complet de marée, en espaçant les mesures sur toute l'amplitude de cette dernière, afin d'assurer l'hypothèse d'indépendance des erreurs et d'explorer la plus grande plage de mesure possible et contrôler la stabilité du système. L'écart moyen obtenu de la comparaison est alors imputable à un biais du marégraphe, la précision de cette moyenne est de l'ordre de $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ avec N le nombre de mesures [WOP 97].

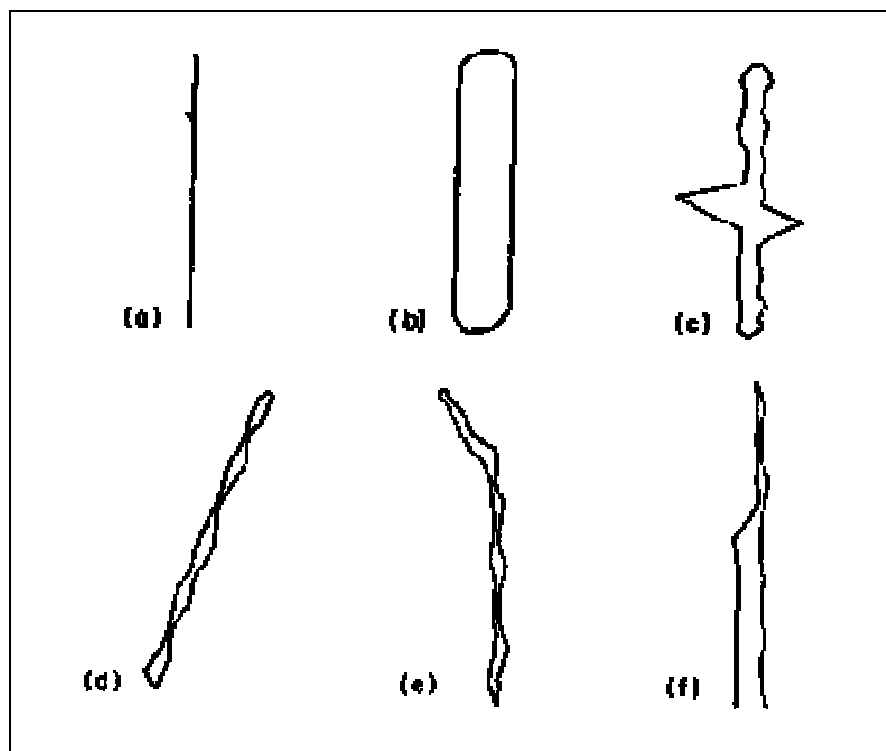
Ainsi, cette opération permet de calculer la référence interne du marégraphe, il permet également d'obtenir un diagramme de Van De Casteele à interpréter.

1.4.2 Test de Van de Castele

Selon Van de Castele, Ingénieur en chef Géographe de l'IGN, en plus de la vérification du calage du zéro, il est possible d'apprécier la qualité et la marche du marégraphe par un test qui porte maintenant son nom. Le test consiste en la comparaison sur un cycle de marée complet des relevés simultanés du marégraphe et de l'étalon. La différence des valeurs doit en théorie rester constante si le marégraphe est parfait et bien réglé. L'originalité de ce test réside en l'exploitation des résultats pour construire un diagramme dont la forme permettra d'apprécier les défauts éventuels du marégraphe.

Le diagramme se construit de la manière suivante : les écarts marégraphe-étalon sont en abscisses et les hauteurs d'eau en ordonnées. Un marégraphe parfait donne une courbe droite et parallèle à l'axe des ordonnées. L'interprétation de l'allure des diagrammes met en évidence les imperfections du marégraphe, la figure 4 donne l'allure caractéristique de quelques défauts type du marégraphe à flotteur :

Figure 4 : allures caractéristiques de défauts typiques du marégraphe à flotteur [COI 85]



- (a) marégraphe parfait.
- (b) Jeu dans le mécanisme du marégraphe : se traduit par un cycle d'hystérésis.
- (c) Frottements dans le mécanisme du marégraphe.
- (d) Erreur d'échelle : pouvant être causé par un rapport d'engrenage erroné.
- (e) Erreur d'échelle partielle.
- (f) Décalage dans le mécanisme du marégraphe.

1.5 Etude sur la numérisation

Alors que la numérisation des marégrammes n'était pas encore finie, une étude sur les données issues des marégrammes numérisés a été réalisée à La Rochelle au Centre Littoral de Géophysique (CLDG) par Anne MINEAUD. Ce travail rend compte d'un certain nombre de problèmes au niveau des marégrammes et constitue une bonne base pour mon étude.

Cette étude s'articule autour de deux parties, la première décrit les données et des méthodes possibles pour le contrôle qualité de ces données. Tandis que la deuxième partie se focalise sur la mise en œuvre d'une des méthodes et l'analyse des résultats.

1.5.1 Description des données et méthodes de contrôle qualité

Anne MINEAUD a identifié quatre sources de données : Les données issues du Totalisateur, les marégrammes numérisées, les données du MCN et les expériences d'étalonnage.

Données issues du totalisateur :

Concernant les données du totalisateur, elles proviennent du PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) qui est un organisme scientifique international, créé en 1933, chargé de la collecte, de la publication, et de la distribution des données des niveaux moyens annuelles et mensuelles dans le monde. En fait, l'ensemble des calculs des moyennes mensuelles a été réalisé et validé par l'IGN qui les transmet ensuite au PSMSL. A l'IGN les données du totalisateur ne sont pas disponibles entièrement en format numérique, c'est pourquoi elles ont été récupérées sur le site Internet du PSMSL (<http://www.nbi.ac.uk/psmsl/>). Elles couvrent une période allant de février 1885 à décembre 1999, cependant il existe des lacunes dans ces données, elles correspondent à des pannes ou à des périodes de maintenance de l'appareil. En effet, selon les critères du PSMSL, un minimum de quinze jours de mesures par mois est nécessaire pour avoir une moyenne mensuelle significative.

Les marégrammes :

Lors de son stage Anne MINEAUD disposait des données numérisées couvrant une période allant de février 1897 à juillet 1988. Des lacunes sont également présentes, cette fois-ci elles peuvent s'expliquer par le manque de lisibilité de certains marégrammes (les années 1921 et 1924 par exemple). Malgré le double archivage fait à Marseille et à Saint Mandé, des courbes ont été perdues comme l'année 1913.

Les données numérisées se trouvent sous forme de fichiers, chaque fichier correspond aux données d'une année. Il y a deux formats de fichier. Dans les deux cas, chaque ligne représente une journée de données, les espaces entre les données sont la principale différence entre les deux types formats. Voici deux extraits de la même année 1885 sous les deux formats :

Format « Marseille », j'ai pris l'habitude de les nommer « format IGN » :

```
85524050027023019017013014017021026032036037034031027024024023024027031037040040
85524051038035032031031029029032037043047049048045043038036034033034037041043044
85524052041039037034032028024025026029034035034031031028023020019017018021025028
```

Les deux premiers chiffres sont les chiffres de l'année des données : ici 85 pour 1885.
 Les trois chiffres suivants correspondent au numéro du port où se trouve le marégraphe : 524 pour Marseille.
 Les trois chiffres suivants sont le numéro du jour des données, ici du 50 au 52ème jour.
 La série de 3 fois 24 chiffres sont l'ensemble des valeurs (en cm) saisies pour chaque journée.
 Chaque ligne peut donc être découpée en vingt-sept parties.

Format « Général », j'ai pris l'habitude de les nommer « format SHOM » :

```
1885 524 50 27 23 19 17 13 14 17 21 26 32 36 37 34 31 27 24 24 23 24 27 31 37 40 40
1885 524 51 38 35 32 31 31 29 29 32 37 43 47 49 48 45 43 38 36 34 33 34 37 41 43 44
1885 524 52 41 39 37 34 32 28 24 25 26 29 34 35 34 31 31 28 23 20 19 17 18 21 25 28
```

On retrouve bien les mêmes données, mais elles sont plus complètes puisque l'année apparaît entièrement et sous ce format les données sont beaucoup plus lisibles.

MCN : Marégraphe à ultrasons

Ce marégraphe est en service et fournit des données depuis juillet 1998. Cet instrument fournit des hauteurs d'eau toutes les dix minutes.

Expérience d'étalonnage :

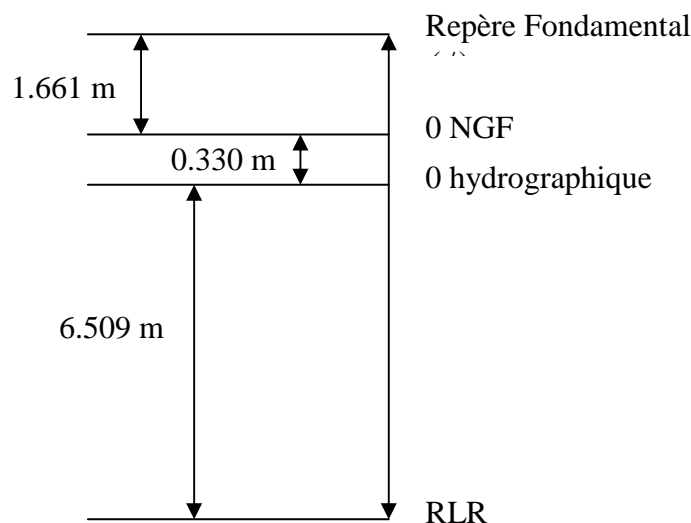
Suivant les recommandations internationales [COI 85], elles doivent être réalisées au moins une fois par an, dans la pratique, il semble qu'il en soit autrement puisque si depuis 1993 elles ont été faites annuellement, antérieurement on retrouve des traces uniquement en 1985 ou en 1970 et les informations se résument le plus souvent uniquement à la valeur de h (Cf. E.I.2).

Deux méthodes comparatives ont été avancées pour le contrôle des données, la première consiste en la comparaison entre deux sources différentes de la même grandeur, étant donné la période de recouvrement entre les données, la comparaison entre les données issues du totalisateur et des marégrammes semble la plus appropriée. La seconde approche consiste en l'étude d'un modèle théorique de la marée et les observations. Etant donné la grande quantité de données et la durée limitée du stage, c'est la première méthode qui a été choisie.

1.5.2 Traitement des données et analyse des résultats

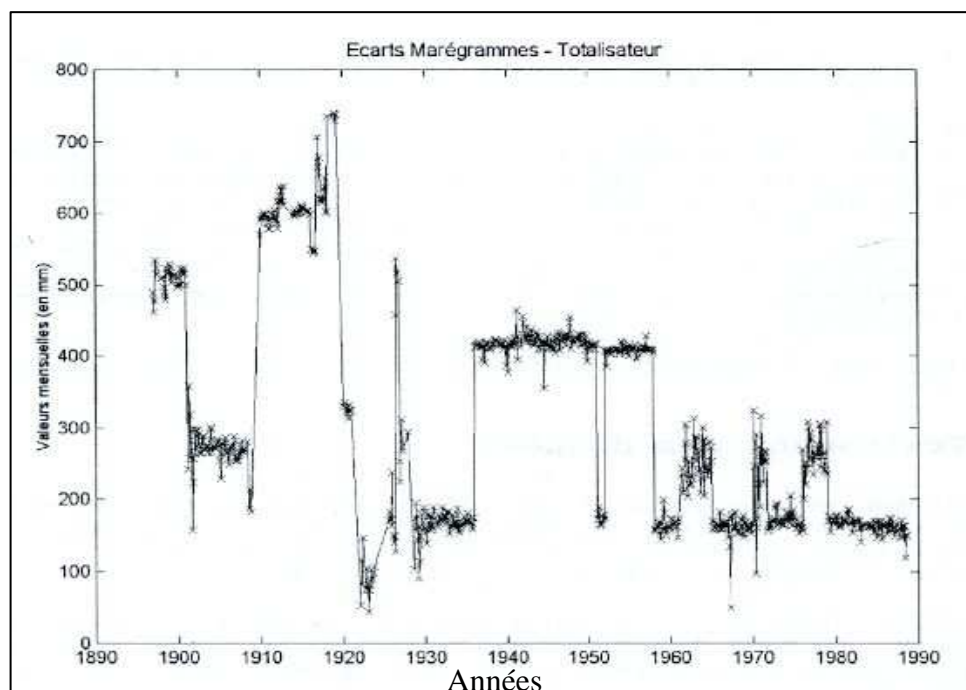
Après avoir choisi Matlab, un logiciel de programmation et de calcul, pour la mise en œuvre d'un programme de comparaison entre les deux types de données, il a fallu ramener les données à une même référence. En effet, les données de l'IGN sont exprimées par rapport au zéro NGF qui est situé à 1.661 m en dessous du repère fondamental. Alors que les données du PSMSL sont exprimées par rapport à leur propre référence RLR (Revised Local Référence) se trouvant à 6,84 mètres en dessous du zéro NGF. Les valeurs horaires des marégrammes étant numérisées par rapport au trait du bas (Cf. figure 7 page 17) qui correspond à 0.5 mètre en dessous du zéro des marégrammes qui est supposé être en correspondance avec le zéro NGF.

La référence RLR est une référence locale produite par le PSMSL, elle est définie par rapport à un repère de marée donné, le TGBM (Tide Gauge Bench Mark) suivant un choix arbitraire effectué à l'origine pour que toutes les données du niveau marin, passé et à venir, aient une valeur positive au-dessus de celle-ci et pour qu'il n'y ait aucune ambiguïté possible avec d'autres références locales du marégraphe (Cf. figure 5).

Figure 5 : Graphique récapitulant la position des différentes références [MIN 01]

Pour les calculs servant à la comparaison, l'ensemble des données a été ramené au zéro NGF et l'unité choisie est le millimètre.

Le programme est constitué de plusieurs sous-programmes indépendants. Dans une première étape, il lit les données et calcule des moyennes mensuelles et annuelles à partir des deux formats de fichier et compare ensuite les moyennes totalisateur et marégrammes, pour finalement visualiser le résultat sous forme d'un graphique (Cf. figure 6). A priori, on devrait s'attendre à obtenir une constante de 500 millimètres qui correspond à la différence entre la référence des marégrammes numérisés et du zéro NGF, ce qui est le cas uniquement pour les premières années entre 1897 et 1901.

Figure 6 : Différences mensuelles observées entre les marégrammes et le totalisateur (en mm) [MIN 01]

La lecture des données et les premiers calculs des moyennes ont permis de déceler un certain nombre de problèmes dans les fichiers comme des problèmes de numérotation. J'ai repris l'ensemble de ces constats en annexe C (Cf. C.I). En ce qui concerne le graphique, étant donné que les références du totalisateur et des marégrammes sont mécaniquement liées, l'idée que les constantes de calages soient uniquement appliquées aux données du totalisateur est avancée. L'hypothèse peut être étudiée en reprenant les constantes utilisées pour le calcul des moyennes, pour ensuite corréler les événements dans le temps avec les sauts du graphique. Les sauts sont donc supposés être dus à un changement important et les plus petits écarts à des problèmes mécaniques, de mise en place des marégrammes (sur le tambour ou lors de la numérisation).

Chapitre 2

Traitements et analyses des données marégraphiques

Cette deuxième partie concerne l'analyse et le contrôle des données issues de la numérisation des marégrammes. Dans un premier temps j'aborde la description et l'analyse du mode opératoire de la numérisation, pour ensuite contrôler et corriger les données à l'aide de méthodes comparatives.

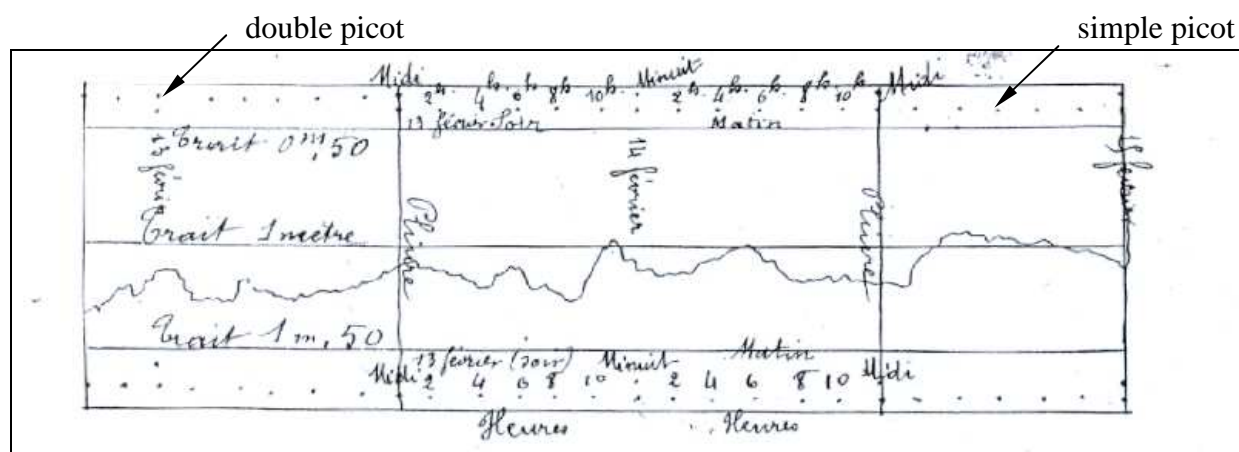
2.1 Pratique de la numérisation : numérisation - mode opératoire – description

Préalablement à tout travail sur les données, j'ai expérimenté la numérisation d'une année de données, ce qui m'a permis de me rendre compte des conditions de travail, notamment des contraintes engendrées par la numérisation de données.

Les marégrammes se présentent sous la forme de rouleau de papier de 9 mètres de longueur, pour une largeur de 17 cm. Chaque rouleau correspond à un mois de mesures, des doubles picots symbolisent le 0 heure et le 12 heure de chaque journée et entre chaque picot double des picots simples sont présents toutes les deux heures. Il faut noter que trois traits, servant de référence pour la hauteur, sont également représentés sur le diagramme, le trait du milieu correspond au zéro de la réglette qui se trouve sur la crémaillère (mais il est appelé Trait 1 mètre car il se situe à un mètre du zéro de la crémaillère), les deux autres traits symbolisent +0.5 m et -0.5 m en hauteur d'eau par rapport au zéro du marégramme ou « zéro des courbes », c'est pourquoi ils sont nommés respectivement trait 0,50 m et 1,50 m. Chaque rouleau débute systématiquement vers la mi-journée du 1^{er} jour du mois pour finir à la mi-journée du 1^{er} jour du mois suivant.

Ces rouleaux se présentent sous deux formes, l'une en rouleau et l'autre en papier plié par échantillon de 24 heures avec au milieu le 0 heure de chaque journée (Cf. figure 7 et annexe A : A.I). Il y a des cas particuliers où le 0 heure se trouve à l'extrémité gauche.

Figure 7 : schéma d'un extrait de marégramme (document issu des archives de l'IGN).



C'est le SHOM qui a mis en place les procédures et méthodes de numérisation, alors que les accessoires ont été fournis par l'IGN :

- ✓ Une table à digitaliser avec pointeur.
- ✓ Un ordinateur avec programme de digitalisation fourni par le SHOM.
- ✓ Une grille horaire couvrant 3 jours de marégramme fait par l'IGN.

La grille horaire est préalablement posée et fixée sur la table à digitaliser, c'est cette grille qui sert à initialiser en temps et en hauteur. Ainsi, l'opérateur doit pointer les 3 points caractéristiques suivant : le point se situant à « 0 cm et 1 heure », ensuite le point « 0 cm et 24 heure » et enfin le point « 1 m et 1 heure ». Les trois jours sont initialisées successivement et l'initialisation est conservée jusqu'à ce que la numérisation soit finie, c'est à dire jusqu'à ce que l'opérateur arrête le logiciel.

Une fois que le marégramme est bien calé, la digitalisation peut commencer. L'opérateur voit instantanément sur l'écran la valeur du dernier point numérisé, ainsi que la ou les courbes des dernières journées numérisées. L'affichage des courbes se fait par cycle de 3 journées, il correspond à la grille de 3 jours. Le logiciel affiche une journée, puis deux et enfin trois, avec à chaque fois en bleu la journée qui vient d'être digitalisée. Ces courbes permettent de contrôler visuellement l'aspect des 24 derniers points numérisés par visualisation de l'allure générale de la courbe et par comparaison avec les courbes précédentes. Ce qui permet, si l'opérateur est assez attentif, d'éviter un grand nombre de mauvaises saisies. La date de la journée numérisée apparaît également à l'écran, ce qui permet d'éviter les éventuels problèmes de saisies probables, étant donné le caractère répétitif de la tâche demandant une grande concentration de la part de l'opérateur.

Cet exercice met également en avant un certain nombre d'erreurs possibles. Ces erreurs possibles concernent des problèmes de référence en hauteurs.

Lors de la numérisation le trait choisi comme zéro pour la numérisation ne correspond pas au zéro de la règle, c'est à dire au trait 1 mètre sur les marégrammes. C'est pourquoi il est important de noter que cela n'a pas d'importance puisque l'essentiel est d'avoir une référence commune pour l'ensemble des marégrammes numérisés.

Ainsi j'ai constaté au cours de mon étude que deux références différentes ont été utilisées lors de la numérisation. Si au début je croyais que le trait 1,50 m servait de référence en hauteur, ce n'est pas le cas pour l'ensemble des marégrammes. Notamment les marégrammes numérisés par le SHOM et par un des opérateurs de l'IGN, ils ont utilisé les picots qui se trouvent à 25 mm en dessous du trait 1,50 m. Ce problème de référence permet d'expliquer une grande partie des sauts constatés sur le graphique des comparaisons entre le totalisateur et les données numérisés (Cf. figure 6 page 13), ces sauts qui sont de l'ordre de 25 cm pour le passage de 1935 à 1936 et pour l'année 1951.

Des problèmes de référence en temps sont également envisageable, comme un changement de système horaire au cours des années (par exemple la mise en place du Temps Universel). On peut également supposer des problèmes possibles lors de la numérisation comme un décalage de 12 ou 24 heures. Ce qui est tout à fait pensable puisque la marque au niveau des picots est la même pour 12 heures et 0 heure.

2.2 Analyse de la structure et bilan général des fichiers

Le SHOM possède un programme informatique appelé MAS qui permet de faire diverses études à partir des hauteurs horaires observées comme le calcul des constantes harmoniques ou la comparaison entre une prédiction de la marée et des hauteurs horaires observées. Il faut d'ailleurs noter que la marée prédite qui correspond à une marée théorique est calculée à partir des constantes harmoniques. Ce programme permet également de manipuler et donc de modifier le format des fichiers.

Les deux formats possibles des fichiers ont été explicités dans la première partie du rapport. L'origine de l'existence de ces deux formats est la suivante :

Le format de sortie des fichiers après la numérisation est systématiquement du format dit « IGN », ainsi les marégrammes numérisés à l'IGN n'ont pas été modifiés et sont restés dans leur format de départ, c'est pourquoi ils sont nommés fichier au format IGN. Alors que le SHOM qui a toujours travaillé sur des données au format « général », car le premier format ne permet pas d'avoir des marées supérieures à 10 mètres, les a modifiées en format dit « format SHOM ». Ainsi pour une question de rigueur, de simplification et d'homogénéité du format des fichiers des marégrammes numérisées par l'IGN et le SHOM, j'ai décidé de tout uniformiser, ce qui permet également de simplifier la manipulation et l'étude globale des données.

Cette manipulation des fichiers a de plus été bénéfique, elle a en effet permis de déceler des problèmes dans les fichiers « marégrammes numérisés ». Ces problèmes sont des conséquences directes de la numérisation, il concerne principalement des doublons. Ces doublons font suite à des journées digitalisées deux fois par l'opérateur. Il y a beaucoup de cas de figures différents, mais je suppose que dans la plupart des cas l'opérateur s'est aperçu d'une erreur ou d'un problème dans la digitalisation et a recommencé correctement celle ci mais sans corriger cette erreur sur le fichier de sortie. Par exemple l'oubli du déplacement du marégramme pour passer aux journées suivantes, ce type d'erreur est facilement décelable par comparaison des doublons avec les 3 lignes qui les précèdent.

Exemple 1 : extrait de l'année 1987

```
87524347049048048047045045046047048052055058060059060058056054053051050052053055
87524348055057058057058058057057058060062064065065064063060057055052048047048050
87524349049053053053051049048047045045047048050050051050050048045040037036036038
87524350043045046049049048047046045047044045046048051052051049046043038036034033
87524351035037041044044045045043040038037036037038041042043042042037033030027027
87524352026031035040044045045045043038036036034036039041045046045043037034030028
87524353040043045047049046045046044046043044045047051051050047045042037035032032
87524354034034039043044044044042038036035035036038040043042041041036033030027026
87524353028029032041045049051049046042041038036033033037038042041039034028025021
87524354019019021027035040043043042039036033029027027028032036038036032029025022
87524355020018019021028037042045045043037034030026024025028032034036033029027024
87524356022020019020025033041046048046044039035030027024024028031034035031028025
```

Les deux lignes 350 et 351 sont similaires respectivement à 353 pour 350 et 354 pour 351. Un calcul d'écart type entre les lignes qui sont semblables donne les résultats suivants :

$$\text{Moy}(350) - \text{Moy}(353) = 1.21 \text{ cm}$$

$$\text{Moy}(351) - \text{Moy}(354) = 0.96 \text{ cm}$$

$$E(350-353) = \pm 1.40 \text{ cm}$$

$$E(351 - 354) = \pm 1.27 \text{ cm}$$

Ainsi, on peut constater qu'il y a un systématisme de l'ordre du centimètre entre les deux séries de mesures supposées redondantes. On peut expliquer ce systématisme par une différence de calage du marégramme ou à un déplacement du marégramme entre les deux séries de mesures (il faut ajouter également la précision du pointé). On peut considérer que les deux séries sont des mesures de la même grandeur. Par conséquent ce sont les lignes correspondantes aux deux premiers 353 et 354 qui ont été supprimées.

Il faut bien noter que cet exemple est un cas particulier comme presque toutes les redondances. Ainsi dans la plupart des cas, par comparaison entre les lignes, il a été possible de comprendre et donc corriger les redondances. Dans un certain nombre de cas, trouver et comprendre l'origine du problème est impossible en regardant uniquement le fichier. Ainsi le constat de ces redondances m'a obligé à regarder en détail les marégrammes.

Programme de détection de lacunes et doublons

L'idée de concevoir un programme qui fait un bilan sur les fichiers a ainsi germé. Le but premier de ce programme est de faire un bilan, c'est à dire de détailler année par année les lacunes et les doublons en les situant dans le fichier, ainsi que le nombre de jours saisis entièrement dans le fichier. J'ai réalisé ce programme en « fortran », un des grands avantages de ce langage, c'est qu'il permet de créer un programme exécutable utilisable à la fois avec Windows et Unix sans avoir besoin d'un autre logiciel pour le mettre en œuvre. Ce programme crée un fichier de sortie, qui répertorie l'ensemble des lignes posant un problème en précisant s'il s'agit d'une lacune ou d'un doublon et présente à la fin un bilan global (Cf. Annexe E : E.I).

Programme de détermination du type d'erreur

Un deuxième programme permet par comparaison d'une ligne avec les autres lignes numérisées qui la précède de donner une idée sur le type d'erreur et la cause probable de l'erreur. Il permet de donner rapidement une idée sur l'origine du doublon. Il faut noter que ce programme est uniquement un outil d'aide et qu'il ne peut pas résoudre tous les cas rencontrés. Le principe est relativement simple, il consiste en la comparaison des doublons entre eux et également avec les lignes qui les précèdent. Cette comparaison se fait au niveau de la moyenne et du calcul de l'écart type (Cf. Annexe E : E.II). Cependant, il n'empêche pas l'incompréhension de certains cas de doublons.

On retrouve bien dans l'exemple l'annexe E (Cf. E.II), en rouge, ce qui a été constaté auparavant dans l'exemple 1 (page 19).

Le fait de regarder les marégrammes en détail m'a permis de constater divers problèmes dus à la numérisation comme principalement :

- ✓ Références différentes en fonction des marégrammes qui implique une erreur systématique de 25 cm entre les observations.
- ✓ L'hypothèse d'un décalage de 12 heures pour certains marégrammes.

Dans certains cas il semblait impossible de comprendre ce qui s'était passé lors de la numérisation, puisque la référence paraissait instable. L'hypothèse selon laquelle il était possible que dans certains cas la numérisation se soit faite avec le marégramme à l'envers a été envisagée mais pas constatée. Tous ces constats permettent d'expliquer une partie des décrochements constatés sur le graphique comparant les moyennes mensuelles des marégrammes et du totalisateur (Cf. figure 6 page 13).

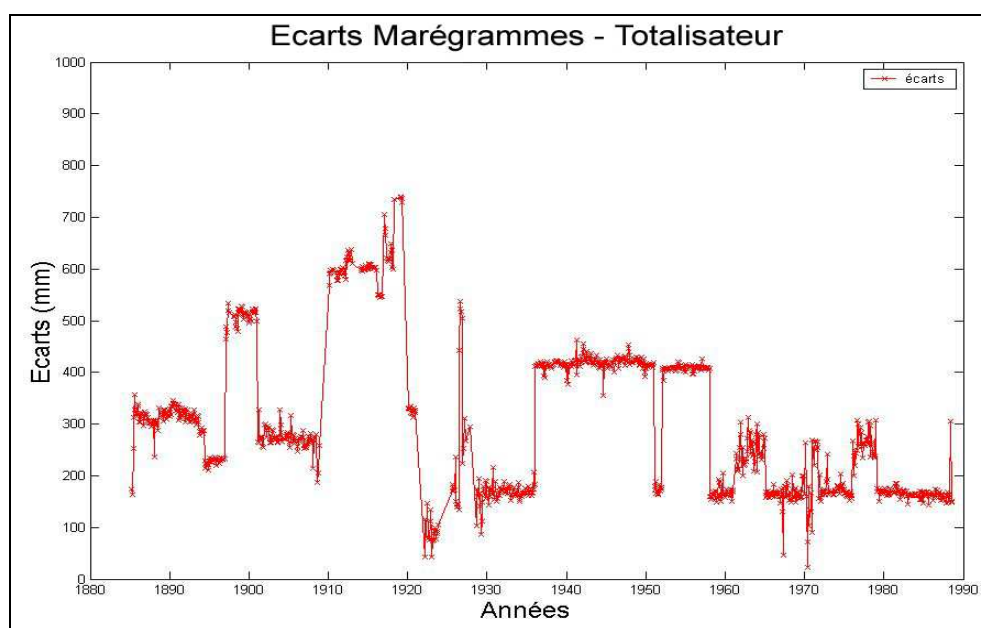
2.3 Comparaison entre les données numérisées et les données du totalisateur

La méthode comparative suggérée dans l'étude de Anne MINEAUD semble être dans le cadre de ce travail, une méthode très efficace pour le contrôle qualité. En effet, l'utilisation du totalisateur comme référence semble être pertinente puisque les étalonnages successifs du marégraphe avaient pour but la détermination de nouvelles constantes de fonctionnement du totalisateur ou un contrôle du fonctionnement. Ces déterminations faisant suite à une modification du dispositif du marégraphe. De plus, les données du totalisateur ont toujours été suivies et contrôlées par l'IGN, depuis le début de son fonctionnement. Cette étude permet en particulier de mettre en avant les problèmes de référence des hauteurs d'eau. Etant donné que les données du totalisateur sont mensuelles, la comparaison se fait à un niveau mensuel.

Le choix des données issues du totalisateur comme références est également justifié par le fait que le totalisateur et le chariot porte style sont sensés correspondre à la mesure de la même grandeur, c'est à dire le déplacement de la crémaillère. Ainsi, la différence entre les données issues du Totalisateur et les données issues des marégrammes devraient être théoriquement égale à une constante fixe.

Cette comparaison ayant déjà été mise en œuvre, j'ai dans un premier temps repris et fait une vérification du programme tant au niveau des possibilités qu'au niveau des lacunes de ce dernier. J'ai ainsi fait quelques modifications, notamment sur la prise en compte par le programme des lacunes au niveau des mesures horaires. En effet, lors de la digitalisation les valeurs horaires sans courbe sur le diagramme, ont été mises par défaut à la valeur '0', afin de pouvoir les identifier, puisque la mesure d'une valeur était nécessaire dans le fichier de sortie pour chaque valeur horaire. Il a donc fallu identifier ces mesures et les modifier en leur attribuant la valeur 9999 pour chacune d'elles, afin d'être certain de ne pas les confondre avec les mesures effectives. Ainsi, toutes les journées ayant une lacune ont été retirées pour le calcul de la moyenne mensuelle et annuelle. Ce qui m'a permis d'obtenir finalement la figure 8. Comme il est impossible de regarder tous les marégrammes, il m'a semblé nécessaire de reprendre les calculs qui comparent les données du totalisateur et des marégrammes dans le but de regarder en détail les années et les mois qui semblent suspects.

Figure 8 : Ecarts Mensuel entre les données « marégrammes » et « Totalisateur ».



On retrouve bien le même graphique avec des données en plus puisque le graphique commence à l'année 1885 au lieu de 1897 pour la figure 6 (page 13). Ainsi l'hypothèse de l'écart constant de 500 mm entre les données est à exclure puisque cette constante n'est pas constatée avant 1897. Par contre il est intéressant d'étudier le problème de référence. Dans le but d'avoir rapidement un bilan sur les sauts des écarts j'ai également ajouté dans le programme Matlab une fonction qui répertorie les sauts supérieurs à 100 mm puis supérieurs à 50 mm, d'un mois à l'autre. L'intérêt de cette fonction réside en la possibilité d'identifier clairement et rapidement les périodes concernées par les sauts.

Ce programme m'a ainsi permis de constater que dans la plupart des cas les sauts se font au niveau du changement d'année, ce qui laisse supposer qu'ils sont dans un grand nombre de cas liés à la numérisation. L'exemple 3 de l'annexe E (Cf. E.III) met en évidence ce phénomène, il y a un saut de l'ordre de 230 mm entre le mois de décembre 1935 et le mois de janvier 1936 et un autre saut du même ordre de grandeur mais dans le sens opposé entre les années 1950 et 1951. Il faut savoir que les marégrammes numérisés entre 1936 et 1950 ont été faits par le SHOM, ces sauts sont tous simplement les conséquences du problème de choix de la ligne de référence 0 lors de la numérisation des marégrammes abordé auparavant qui engendre un écart de 250 mm entre les données.

La méthodologie de la numérisation a été mise en place par le SHOM qui a gardé pour la période qui le concernait toujours la même référence. Par contre, en ce qui concerne les autres années numérisées par l'IGN, le changement de référence se produit dans la plupart de cas lors d'un changement d'opérateur (Cf. annexe D). Ainsi, la méthodologie du SHOM a été suivie pour certaines années par le même opérateur, ce qui n'a pas été le cas pour les deux autres opérateurs. Il y a plusieurs explications possibles. Une des explications est tout simplement le fait que le choix de prendre la ligne 1,50 m semble plus naturel et instinctif, d'ailleurs lors de mon expérimentation de la numérisation les opérateurs m'ont indiqué que la référence hauteur était bien le trait 1,50 m et je n'ai eu aucun doute sur la possibilité d'utiliser une autre référence. D'ailleurs les trois traits du diagramme coïncident avec le quadrillage ce qui n'est pas le cas en utilisant les picots comme référence. L'autre possibilité serait que sur certains marégrammes le fait que les picots soient très peu visibles ait obligé les opérateurs à prendre le trait comme référence. La première possibilité me semble la plus probable, un oubli ou une mauvaise compréhension du choix de la référence hauteurs peut être à l'origine de ce choix différent.

2.4 Utilisation de l'outil : prédiction de la marée

La prédiction de la marée est un outil très efficace qui revient à faire la comparaison entre une marée théorique et des observations. Cependant, il faut avoir conscience que cette marée théorique est déterminée à partir d'observations, ainsi si la période d'observation est affectée d'un systématisme, on retrouvera ce dernier dans la marée prédite. De plus, la qualité de la solution des constantes harmoniques dépend du nombre d'observations, c'est à dire de la longueur de la période d'observation et du nombre de lacunes.

Pour avoir une première analyse harmonique de la marée de Marseille, j'ai utilisé la série d'observations faite par le marégraphe acoustique entre juillet 1998 et février 2003. Ce choix permet d'avoir une marée théorique indépendante des observations faites avec le marégraphe à flotteur. Par contre, ces mesures sont affectées des possibles imperfections, problèmes et erreurs systématiques provenant du marégraphe moderne.

Le programme MAS permet d'avoir les constantes harmoniques de la marée et à partir de ces constantes le programme détermine une marée prédite et peut la comparer à des observations. Le programme crée un fichier de comparaison journalière en temps et en hauteur (Cf. Annexe E : E.IV).

Ainsi, on retrouve dans ce fichier les écarts en hauteur (écart d'amplitude en centimètre) et également des écarts en temps (en minute). Afin de pouvoir analyser le fichier de sortie du programme MAS qui donne les résultats de la comparaison entre les observations et la marée prédite (les écarts sont journaliers), j'ai donc implémenté un programme sous Matlab qui fait une moyenne mensuelle des écarts en temps et des écarts sur les hauteurs. Les écarts en amplitude n'apportent rien de nouveau par rapport à la comparaison entre le totalisateur et les données numérisées. Par contre, la moyenne des écarts en temps permet de mettre en évidence des écarts variables au cours des mois et des années. D'ailleurs il faut remarquer que l'écart type des décalages en temps est de l'ordre de 24 minutes, ce qui est important. Cette ordre de grandeur de l'écart type provient notamment des bruits agissant sur les hauteurs d'eau, c'est à dire des phénomènes autres que la marée comme les effets météorologiques qui influent sur les hauteurs d'eau et donc sur la qualité de la comparaison journalière.

2.4.1 Limites et développement d'une nouvelle méthode

Les premières corrections sur le problème de référence en hauteur, ont permis de faire le calcul de nouvelles constantes harmoniques de la marée sur une très grande période d'observations. Ce qui permet de ne pas introduire d'autres sources d'erreurs qui viendraient du marégraphe acoustique.

La comparaison, au niveau temporel, entre la nouvelle marée théorique et les observations a permis de constater des successions de périodes avec des référentielles temporelles différentes, sans pouvoir en expliquer la cause. Avec la méthode utilisée par MAS dans ce programme, les écarts constatés ne peuvent être qu'inférieurs à 12 heures (Ces écarts sont de l'ordre de -1 à 2 heures). Cela vient du fait qu'il calcul à midi de chaque jour les phases des composantes diurnes, d'une part de la marée observée, et d'autre part de la marée prédite. Les déphasages sont traduits en décalages horaires.

Ce calcul ne permet pas de détecter les déphasages de 12 heures et plus puisque le calcul se fait sur une journée. En effet, le nombre et le temps d'observations permettent de calculer uniquement la phase du groupe d'onde semi-diurne et ne peuvent donc pas faire une séparation entre les ondes d'une même espèce. Par exemple, pour séparer les ondes solaires moyennes S_2 et lunaire moyenne M_2 il faut environ 14 jours [DAR 71, pp. VIII 11]. Il faut noter que l'ensemble des marégrammes sont supposés avoir le Temps Universel (T.U) comme référence. Afin, de palier à ce problème, on a procédé à une étude harmonique détaillée de chaque année, c'est à dire que l'on détermine les constantes harmoniques pour chaque année d'observation, ce qui permet de déterminer les années numérisées où le déphasage est de 12 heures ou plus comme je l'ai supposé lorsque j'ai regardé les marégrammes. Il est à noter que l'étude des observations par année entière est justifiée, si il y a un déphasage de cette importance, alors il est très probable que celui-ci soit une conséquence de la numérisation donc répercuté sur l'année entière. De plus une année d'observations permet d'obtenir une bonne précision sur la détermination des constantes harmoniques.

Les constantes harmoniques obtenues pour l'ensemble la période d'observation intégrale, servant comme références, ont ensuite été comparées à celles calculées individuellement pour chaque année d'observations.

Ce sont les composantes harmoniques K_1 , M_2 et S_2 auxquelles je me suis intéressé. Le choix de ces trois composantes n'est pas un hasard. L'onde K_1 est une des ondes diurnes principales avec O_1 , le déphasage d'un jour sur l'autre entre ces deux ondes est relativement important (1 heure et 50 minutes), ce qui permet d'étudier l'onde K_1 séparément. Cette étude permet de constater des déphasages de 12 heures (modulo 24 heures) sans pouvoir distinguer les différents cas. En ce qui concerne les deux composantes M_2 et S_2 , L'onde M_2 est prédominante par rapport aux autres ondes semi-diurne et c'est surtout S_2 qui vient modifier le retard de la pleine mer. Ainsi,

l'étude de ce retard permet de constater d'éventuels retards temporels et cette fois quel que soit le cas de figure.

K_1 est une composante solaire diurne qui a pour période 23.934 heures.

M_2 est une composante lunaire semi-diurne de période 12.421 heures

S_2 est une composante solaire semi-diurne de période 12 heures

Le premier calcul concernant K_1 est très simple, il s'agit de récupérer la phase de la composante harmonique et de la convertir en heure. Le deuxième calcul concerne la différence entre la phase M_2 et S_2 . Le principe est de calculer l'intervalle de temps qu'il y a entre l'action des astres et la réaction sur la marée, c'est à dire par exemple l'intervalle de temps qu'il y a en un lieu donné entre l'instant où il y a la nouvelle ou pleine lune et l'instant où l'on constate la vive eau.

Pour comprendre le calcul, il faut revenir à l'expression de la composante harmonique de M_2 et de S_2 [DAR 71, pp. IX 9].

En posant $k(t)$ la combinaison linéaire de ces deux composantes, on a :

$$\boxed{k(t) = A_{M_2} \cdot \cos(V_{M_2} - G_{M_2}) + A_{S_2} \cdot \cos(V_{S_2} - G_{S_2})} \quad \text{(E.II.1)}$$

A la nouvelle lune ou pleine lune on a $V_{M_2} = V_{S_2} = 0$

A la vive eau qui suit la nouvelle ou pleine lune les ondes M_2 et S_2 sont en phase, on a donc la relation : $V_{M_2} - G_{M_2} = V_{S_2} - G_{S_2}$ ou $V_{M_2} - V_{S_2} = G_{M_2} - G_{S_2}$.

Ainsi le temps entre l'action et la réaction est le temps que met $V_{M_2} - V_{S_2}$ pour passer de 0 à $G_{M_2} - G_{S_2}$. Ce temps T_2 s'exprime de la manière suivante :

$$\boxed{T_2 = \frac{(G_{M_2} - G_{S_2})}{\frac{d}{dt}(V_{M_2} - V_{S_2})}} \quad \text{(E.II.2)}$$

Or $\frac{d}{dt}(V_{M_2} - V_{S_2}) \approx -1.0159 \text{ } \# \text{ } -1.0159$ degrés par heure

Les composantes harmoniques nous donnent G_i , ce qui nous permet de calculer le retard entre l'origine et l'action de la force au lieu d'observation et donc de détecter d'éventuels problèmes de référence temporelle.

Afin de faire les deux calculs, pour K_1 où il s'agit de convertir G_{K_1} en heure et pour $T_{M_2-S_2}$, j'ai implémenté un programme en Fortran qui fait ces calculs pour l'ensemble des années, le fichier résultat se présente sous la forme de l'exemple 2 :

Exemple 2 : Résultats de l'exploitation du calcul des phases des constantes harmoniques K_1 , M_2 et S_2 .

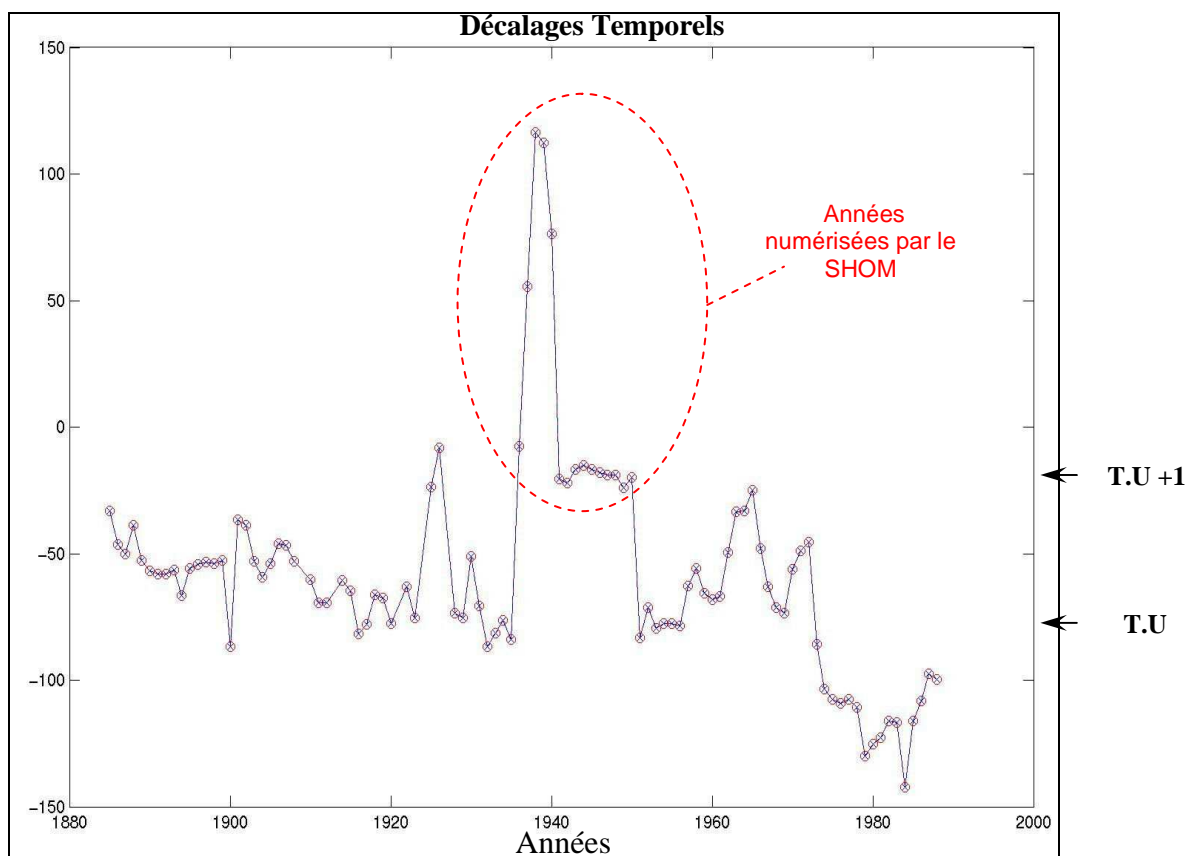
Année	G_{K_1} (en degré)	G_{M_2} (en degré)	G_{S_2} (en degré)	G_{K_1} (en heure)	$T_{M_2-S_2}$ (en heure)
1885	178.4900055	212.8000031	247.9900055	11.8662672	33.9148026
1886	183.0299988	229.3899994	246.8899994	12.1680918	16.8658428
1887	180.2100067	227.5700073	246.8300018	11.9806147	18.5620594
1888	183.2599945	234.2700043	250.8000031	12.1833820	15.9309931
1889	176.3099976	225.9299927	242.0899963	11.7213364	15.5744057
1890	179.1699982	224.3699951	245.0200043	11.9114733	19.9017048
1891	179.6900024	223.5000000	243.3399963	11.9460440	19.1210442
1892	178.8099976	223.3099976	241.8200073	11.8875399	17.8392525
1893	176.5800018	224.6100006	243.1300049	11.7392874	17.8488846
1894	178.3200073	218.8999939	243.8000031	11.8549652	23.9976940
1895	177.4499969	225.2299957	244.8099976	11.7971258	18.8704720
1896	181.1600037	224.0500031	242.5000000	12.0437717	17.7814159
1897	183.6000061	251.3999939	240.3000031	12.2059870	-10.6977549
1898	359.7300110	212.9900055	244.6499939	23.9153576	30.5127087
1899	357.6000061	213.9830017	243.0599976	23.7737522	28.0233173
1900	5.8499999	197.0299988	246.1999969	0.3889162	47.3881989
1901	181.6799927	232.8899994	253.0800018	12.0783415	19.4583664
1902	182.5279999	232.7700043	251.7599945	12.1347179	18.3018398
1903	178.3399963	226.0000000	244.4199982	11.8562937	17.7525024
1904	176.6499939	222.8800049	241.4400024	11.7439404	17.8874302
1905	180.2500000	225.4299927	242.0000000	11.9832735	15.9695511
1906	182.6499939	229.1300049	248.6900024	12.1428289	18.8511925
1907	182.7100067	229.5200043	248.4799957	12.1468182	18.2729282
1908	171.7400055	210.7799988	234.9499969	11.4175177	23.2941380
1910	357.5700073	211.1699982	239.9900055	23.7717571	27.7756424
1911	355.0199890	205.7299957	236.2700043	23.6022282	29.4333153
1912	353.9899902	206.2799988	236.1799927	23.5337524	28.8164921
1914	2.7600000	209.6699982	241.8000031	0.1834887	30.9656944
1915	359.9599915	207.6100006	238.5899963	23.9306469	29.8573570
1916	175.1000061	211.3099976	228.8699951	11.6408949	16.9236679
1917	176.8899994	213.7899933	230.8399963	11.7598963	16.4321537
1918	180.8000031	219.8999939	237.1999969	12.0198383	16.6730938

Rouge : déphasage de 12 h Bleu : déphasage de 24 h Vert : déphasage de -24 h

Ainsi, les comparaisons des phases pour les ondes K_1 , M_2 et S_2 ont permis d'identifier une grande partie des problèmes de référence temporelle. Ainsi pour le fichier de l'année 1885 et une partie du fichier 1900 le déphase est de 24 heures, ce déphasage est identifiable avec le second calcul mais pas le premier. Pour les fichiers de 1998,1999 et 1910 à 1915, il est de 12 heures, ce qui peut se constater sur les deux calculs.

Une fois ces nouvelles données corrigées, j'ai déterminé de nouvelles constantes harmoniques sur l'ensemble de la période afin de faire une nouvelle comparaison entre une marée prédite et les observations. J'ai ainsi pu obtenir la courbe suivante des moyennes mensuelles et annuelles des écarts en temps (Cf. figure 9 et 10).

Figure 9 : Courbe de la variations des moyennes annuelles des décalages temporels entre 1885 et 1988.

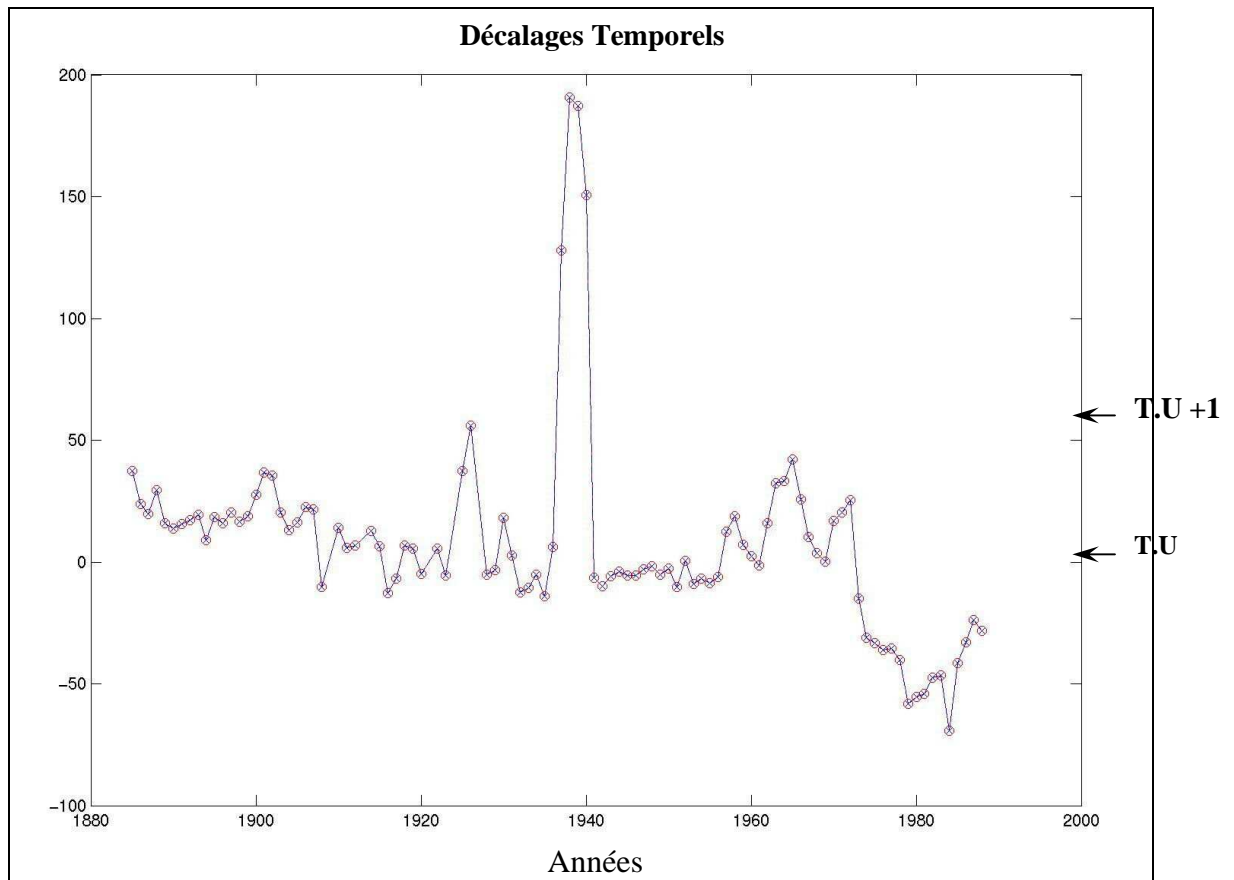


Pour la figure 9 les prédictions ont comme référentiel temporel le temps TU+1 car les constantes harmoniques ont été calculées dans ce même référentiel.

Si l'on ne tient pas compte des années 1937, 1938 et 1939, on peut remarquer que l'ensemble des années numérisées au SHOM sont en référentiel temps TU+1 au lieu du T.U supposé des marégrammes. Cela vient du fait que le SHOM a la possibilité de modifier le référentiel temps et que l'ensemble de ses données marégraphiques sont en TU +1, ce qui est d'ailleurs le cas pour le Marégraphe Côtier Numérique (MCN). Ainsi, lorsque le SHOM a modifié le format des fichiers (Cf. § 2.2 : Analyse de la structure et Bilan général des fichiers), il a également changé le référentiel temps des fichiers.

C'est pourquoi j'ai modifié le référentiel temporel des fichiers numérisés de 1941 à 1950, en les faisant passer du référentiel TU+1 au référentiel T.U. Suite à ces modifications j'ai procédé à une nouvelle détermination de constantes harmoniques et une nouvelle comparaison des observations avec cette nouvelle marée théorique, on obtient le graphique de la figure 10. En notant que les nouvelles constantes harmoniques ont comme référentiel temporel le temps TU.

Figure 10: Courbe de la variations des moyennes annuelles des décalages temporels entre 1885 et 1988 des nouveaux fichiers

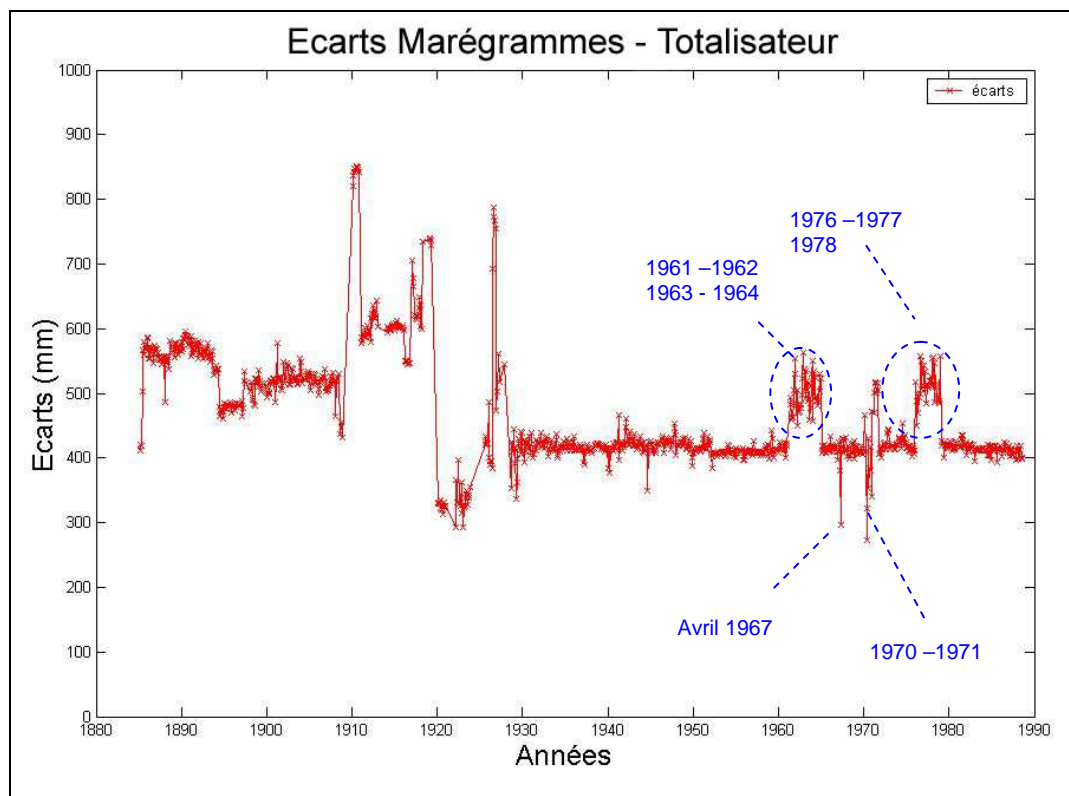


Une partie des variations de la référence temporelle, malgré une vérification des données numérisées est cependant toujours inexplicable. Une dérive de l'horloge ou des changements sur le système de filtrage de l'eau dans la galerie sont peut-être à l'origine de des décalages temporels constatés sur la période [1957-1988]. On peut d'ailleurs remarquer qu'il y a une légère pente si l'on s'intéresse à ce graphique d'une manière globale. Si cela vient d'un phénomène extérieur au marégraphe, seule la même étude avec un autre marégraphe de la Méditerranée pourrait le confirmer. Par contre une dérive dans le temps de l'horloge est envisageable.

2.5 Problèmes dans les fichiers liés à la numérisation

Etant donné la régularité des écarts en hauteur entre les données numérisées et le totalisateur entre 1931 et 1988, je me suis intéressé aux années qui semblaient suspectes car sur l'ensemble de ces années le phénomène à l'origine de l'erreur sur les écarts en hauteur semble identique (Cf. figure 11). Ces années sont les périodes 1961 à 1964, 1970 à 1971 et 1976 à 1978. Il faut également ajouter le mois d'avril 1967 qui s'écarte temporairement de 10 cm.

figure 11 : Ecart Mensuel entre les données « marégrammes » et « Totalisateur ».



Je me suis tout d'abord intéressé au mois d'avril 1967, puisque dans le rapport de stage d'Anne MINEAUD, une partie du rapport s'était focalisé sur cette anomalie sans pouvoir apporter de réponse. Ce saut est localisé uniquement au niveau du mois d'avril pour 1967, je me suis donc intéressé aux marégrammes de mars, avril et mai 1967, sans remarquer un saut au niveau du diagramme.

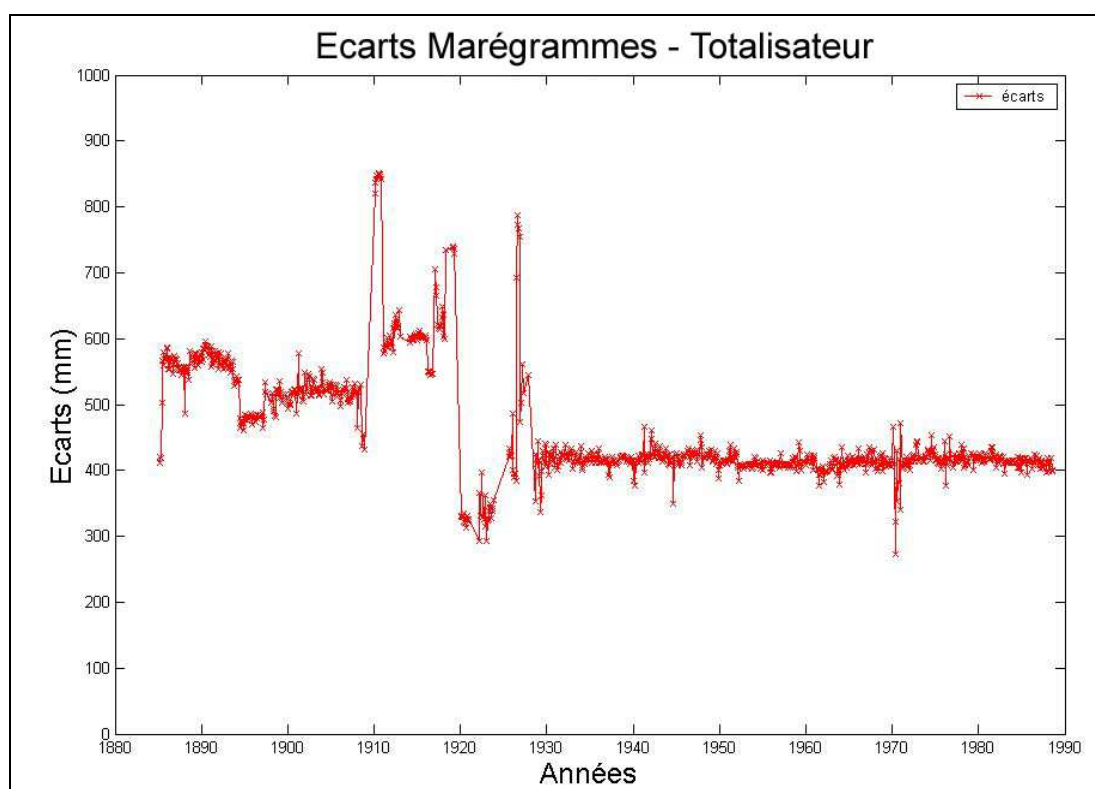
Par contre en comparant les valeurs numérisées (fichier brut issu de la numérisation) et les valeurs sur le marégraphe, je me suis aperçu qu'il y avait un facteur multiplicatif de 0.5 entre les deux données. C'est surtout le fait que plus la valeur était proche de zéro plus l'écart diminuait qui m'a fait penser à ce type d'erreur. Ce qui m'a permis de trouver une explication très probable sur l'origine du problème. Ainsi, le facteur 0.5 entre les données viendrait d'un problème dans la procédure d'initialisation lors de la numérisation. Lors de la phase d'initialisation, le calage sur la référence hauteur se fait en pointant le point (1 mètre, 1 heure) du quadrillage (Cf. § 2.1 : expérimentation de la numérisation). Ce pointé a dû se faire sur le point (0.5 mètres, 1 heure), ce qui a engendré un facteur 0.5 sur les données. Il est cependant étonnant que l'opérateur ne se soit pas aperçu du problème, puisque les valeurs horaires pointées s'affichent à l'écran. Etant donnée que la grille est conçue pour la numérisation de trois jours consécutifs, l'initialisation se fait indépendamment pour les 3 parties de la grille, ainsi

l'opérateur a répété l'erreur pour les trois initialisations. Il est à signaler qu'elle a commencé le 25 Mars 1967 pour finir à la fin du mois d'avril de la même année.

Le constat d'un écart de facteur 0.5 m'a amené à faire une étude plus poussée sur les années 1961 à 1978, où les écarts totalisateurs – données du marégraphe laissent envisager un problème du même type, sur certaines années de cette période.

Fort du constat fait sur le mois d'Avril 1967, la comparaison entre les données numérisées et les marégrammes m'a rapidement laissé soupçonner un problème du même ordre, même si cette fois si le rapport entre les données n'était pas un facteur deux. Afin, de confirmer cette hypothèse, j'ai comparé les données sur deux jours successifs. Ce qui m'a permis d'en conclure que cette fois le facteur était de 0.75 entre les données du marégrammes et les données numérisées. L'origine de ce facteur est le même que celle du facteur 0.5, c'est un problème d'initialisation de la part de l'opérateur. Ce dernier a dû pointer le point (0.75 mètres, 1 heures). Ce constat étant fait sur l'ensemble des années 1961, 1962, 1963, 1964, 1970, 1971, 1976, 1977 et 1978. J'ai donc implémenté un programme en fortran qui permet de corriger le problème de facteur. Une fois ces corrections apportées, une nouvelle comparaison entre les données du totalisateur et des données corrigées issues du marégrammes permet d'obtenir la figure 12.

Figure 12 : Ecart Mensuel entre les données « marégrammes » et « Totalisateur ».



L'année 1970 même après correction ne semble pas cohérente avec le totalisateur, la comparaison avec la deuxième numérisation laisse apparaître quelques écarts, il semblerait que ces écarts soit des conséquences du fonctionnement du marégraphe puisque les deux numérisations faites par deux opérateurs différents n'apportent pas de changement au niveau des anomalies constatées sur les écarts entre les moyennes mensuels des hauteurs d'eau.

2.6 Etude du décalage horaire par corrélation

Principe

Le décalage en temps entre une marée théorique et les observations des hauteurs horaires des marégrammes a toujours été obtenu à partir du logiciel MAS, qui calcul un déphasage par comparaison entre la phase d'une des composantes harmoniques. Il est donc intéressant d'essayer de déterminer ces décalages par une autre méthode, c'est à dire par autocorrélation. A partir de MAS, il est possible avec des constantes harmoniques d'obtenir un fichier avec les hauteurs horaire d'une marée théorique. Le principe est le suivant : à partir d'un échantillon donné de la marée théorique, d'une journée par exemple (donc 24 mesures), on compare cet échantillon, qui est pris comme référence, aux hauteurs horaires des observations par calcul du coefficient de corrélation. On réitère le calcul du coefficient de corrélation pour plusieurs positions de l'échantillon référence par rapport aux observations.

On recherche donc le déphasage temporel ΔT qu'il y a entre les hauteurs d'eau théoriques h_1 et les hauteurs d'eau observées h_2 .

On a la relation $h_1(x) = h_2(x + \Delta T)$ avec x correspondant à la position commune au niveau de la référence et des observations et ΔT correspondant au déphasage temporel entre la marée théorique et les observations.

Soit g_1 un échantillon d'une certaine période T_{ref} des hauteurs d'eau de h_1 servant comme référence et g_2 l'échantillon des hauteurs d'eau de h_2 à comparer avec la période de référence.

La formule du coefficient de corrélation est la suivante :

$$R = \frac{\sum (g_1 - \bar{g}_1) \cdot (g_2 - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum (g_1 - \bar{g}_1)^2 \cdot \sum (g_2 - \bar{g}_2)^2}} \quad \text{(E.II.3)}$$

avec $\begin{cases} \bar{g}_1 : \text{valeur moyenne des } g_1 \\ \bar{g}_2 : \text{valeur moyenne des } g_2 \end{cases}$

Figure 13 : courbe de l'échantillon référence g_1

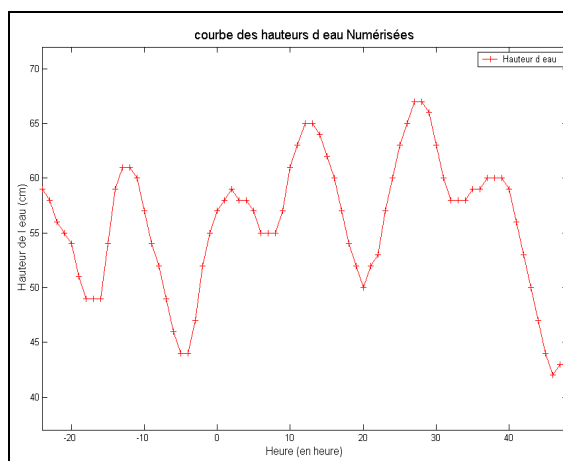


Figure 14 : courbe de l'échantillon des observations g_2

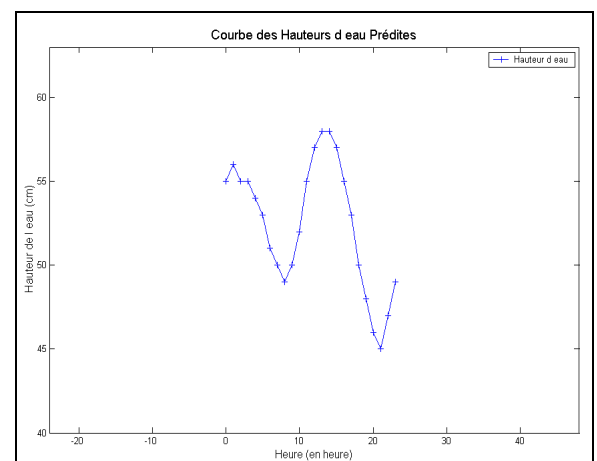
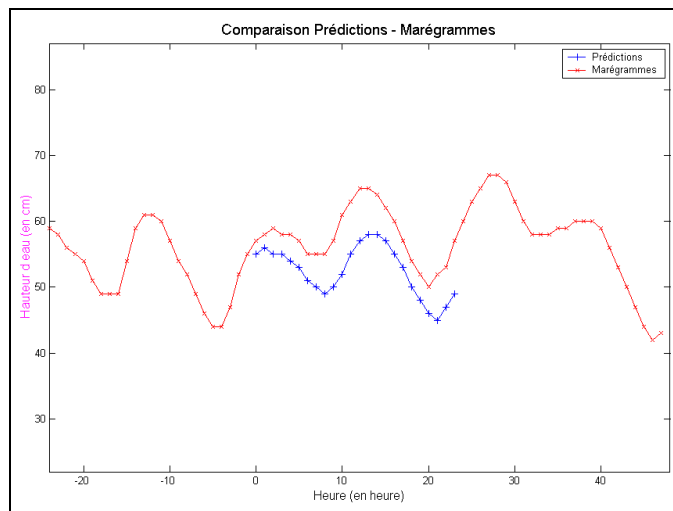


Figure 15 : Comparaison entre g_1 et g_2 

Une fois la position du maximum de corrélation trouvée, on connaît ainsi au niveau horaire la position de la marée théorique par rapport aux hauteurs horaires observées (Cf. figure 13, 14 et 15). Ce qui permet également d'avoir le déphasage approximatif en heure ronde que j'appelle H . Dans un deuxième temps on procède à une corrélation au niveau « sub-horaire » afin de déterminer un décalage en minute. Pour cela, il faut mettre en place un modèle de relation entre la marée théorique et les hauteurs d'eau observées. J'ai utilisé deux modèles. Soit « a » le décalage en minutes, dans les deux cas la relation de base est la suivante : $g_2(x') = g_1(x'+a)$.

On peut modéliser l'écart avec la relation :

$$v + g_2(x') = g_1(x'+a) + c \text{ ou avec la relation } v + g_2(x') = g_1(x'+a) = g_1(x') + a \cdot g_1'(x')$$

$$v + g_2(x') = (g_1(x') + g'(x') \cdot a) + c$$

finalement :

$$\text{Pour la première modélisation : } v + g_2(x') = g_1(x') + a \cdot g_1'(x') + c \quad (\text{E.II.4})$$

$$\text{Pour la deuxième modélisation : } v + g_2(x') = g_1(x') + a \cdot g_1'(x') \quad (\text{E.II.5})$$

Le coefficient c permet de modéliser un systématisme entre la marée théorique et les hauteurs d'eau observées.

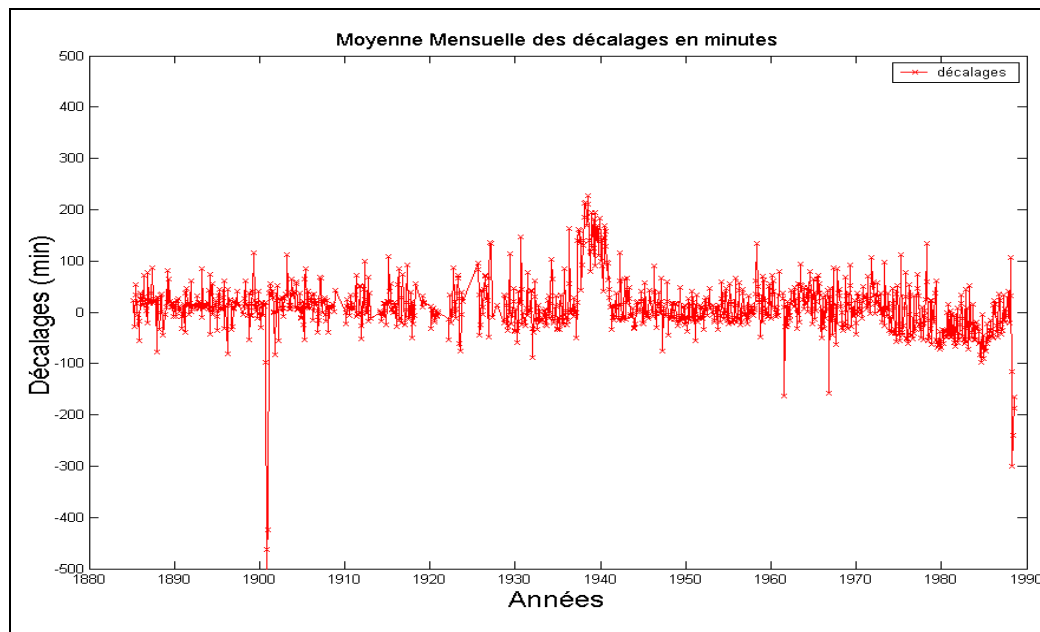
Ainsi en appliquant le principe des moindres carrés à ces équations, cela permet d'obtenir les inconnues et donc de calculer le décalage qui vaut $\Delta T = H + a$.

Application

Dans le cadre de cette étude, j'ai envisagé le calcul pour une période de référence T_{ref} de 24 heures, c'est à dire pour une journée de mesures. Pour $T_{\text{ref}} = 24$ heures, la recherche de corrélation se fait sur une période de 3 jours.

Après avoir implémenté un programme qui fait le calcul des décalages temporels (H , a) pour une unique journée, j'ai mis en place un ensemble de programmes qui permet le calcul des décalages pour chaque journée d'un fichier d'hauteurs horaires, pour ensuite exploiter ces résultats sous forme graphique (Cf. figure 16).

Figure 16 : évolution des moyennes mensuelles des décalages temporels déterminés par autocorrélation.



Ainsi, cette étude permet de voir qu'il y a des problèmes de référence temporelle au niveau du fichier 1900, malgré les corrections préalablement faites. Par contre pour les années 1937 à 1940, on retrouve bien des décalages temporels constatés lors de l'étude des décalages temporels faite avec le logiciel MAS (Cf. Figure 10 page 27).

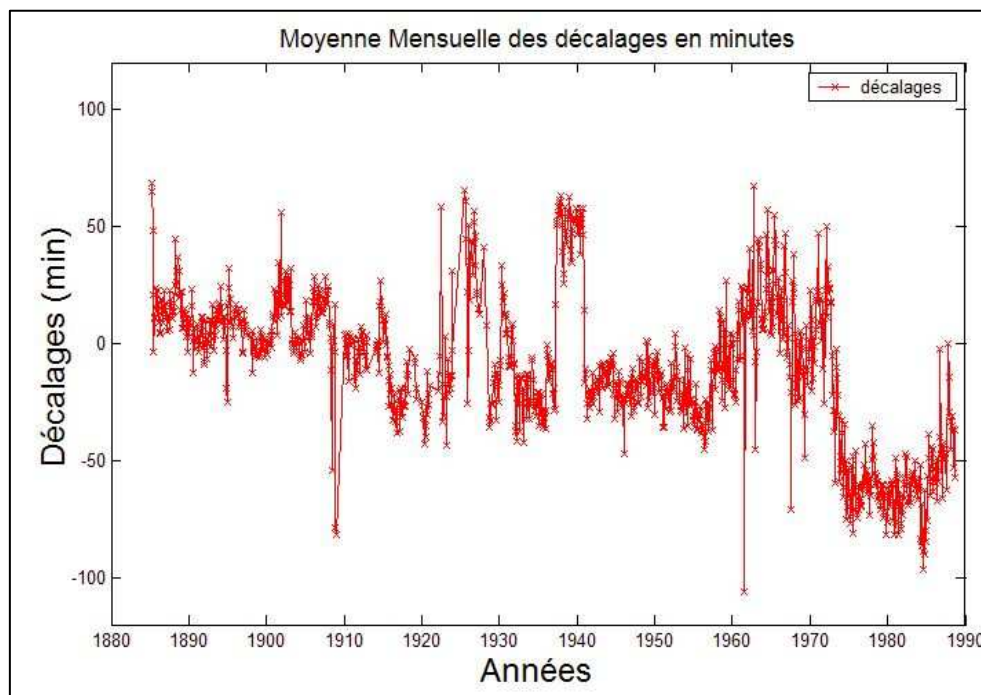
Les corrections faites sur l'année 1900 étant visiblement incorrectes, j'ai repris le fichier de l'année 1900 de départ, donc sans aucune modification. J'ai ensuite comparé le décalage temporel du fichier aux prédictions par auto corrélation. Ce qui m'a permis de mettre en évidence 3 périodes distinctes au niveau des décalages et donc de comprendre l'origine de ces différents décalages en regardant les marégrammes et les feuilles d'observation du marégraphe. Une première période du 1^{er} janvier au 1^{er} mars sans problème de décalage, puis une deuxième du 1^{er} mars au 17 septembre où le décalage est de 24 heures et enfin une troisième du 18 septembre au 31 décembre où le décalage est de 36 heures.

Cette étude de décalages temporels permet d'avoir des résultats satisfaisants pour étudier des déphasages supérieurs à une heure. La période de référence est en fait trop faible pour avoir une bonne appréciation de l'ordre de grandeur du déphasage, elle représente en effet que 24 mesures. Ainsi, les écarts types sur le déphasage temporel est de l'ordre de 15 minutes. Dans le but d'avoir un ordre de grandeur des décalages temporels plus pertinent, j'ai implémenté le calcul du déphasage temporel pour un mois de mesures mais uniquement à un niveau « sub-horaire ». Cette étude est également justifiée par le fait que les marégrammes se présentent sous la forme de rouleaux d'un mois de mesures, ainsi on peut supposer que si il y a une dérive au niveau temporel dans les données, cette dérive sera constante sur l'ensemble du mois.

A la différence du précédent programme, je suppose qu'il n'y a plus les problèmes temporels supérieurs à 1 heure, même s'il est évident que pour un certain nombre d'années comme la période 1937 à 1940 ce déphasage est supérieur à 1 heure, le calcul concerne donc uniquement la détermination du déphasage temporel « a ». Par contre, ce calcul permet d'avoir au maximum 744 observations et permet d'envisager une meilleure précision pour la détermination du décalage temporel.

L'exploitation graphique des résultats des calculs est représentée sur la figure 17.

Figure 17: évolution des décalages temporels déterminés par autocorrélation sur un mois.



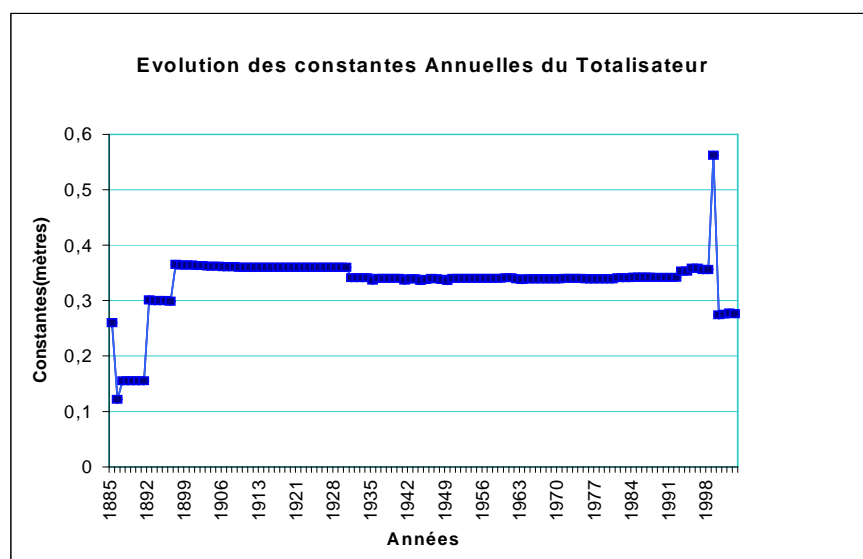
L'allure de ce graphique est semblable au graphique de la figure 10. Ainsi, les résultats des calculs des déphasages temporels par corrélation et par comparaison de la phase des ondes semi-diurne sont similaires. Concernant, la précision de la détermination des déphasages, ils ne sont pas aussi bons que ce que l'on aurait pu espérer. En effet, l'erreur moyenne quadratique sur la détermination du déphasage temporel mensuel « a » est de l'ordre de 7 minutes. Cette imprécision vient sûrement du fait que les hauteurs d'eau réelles sont la résultante de la marée et de résidus météorologiques (Cf. Figure 1 page 7) qui induisent un bruit non négligeable dans le signal. En effet, l'amplitude de la marée étant de l'ordre 30 cm, il semblerait que l'amplitude du bruit puisse être de l'ordre d'une dizaine de centimètres. Je consacrerai une étude plus précise sur ce problème dans la partie bilan du mémoire.

2.7 Etudes des constantes du totalisateur

Le but de cette partie est de trouver une possible explication des sauts constatés entre 1885 et 1931 sur le graphique «comparaison entre le totalisateur et les marégrammes» de la figure 12. Je suppose en effet que l'origine vient des changements des constantes du totalisateur qui n'ont pas été pris en compte sur les marégrammes. Cette hypothèse a été avancée dans le rapport de stage d'Anne MINEAUD.

Cette étude consiste en la collecte des constantes du totalisateur. Cette collecte s'est faite en deux étapes. Il est important de noter, que sur l'ensemble de la période de fonctionnement, la quantité, le type et la qualité des données sont très variables.

Dans un premier temps, j'ai recueilli sur les cahiers de calculs les moyennes mensuelles et annuelles du totalisateur, qui précisent notamment les constantes appliquées aux calculs de moyennes mensuelles et annuelles du totalisateur (Cf. Annexe F : F.I).

Figure 18: Graphique de l'évolution des constantes du totalisateur entre 1885 et 2003

On retrouve bien une évolution au niveau des constantes, cependant à chaque fois les constantes sont marquées dans le registre pour l'année entière. Or ces constantes ne peuvent être systématiquement valables pour les années entières, si un changement de constante intervient en cours d'année, le changement n'apparaît pas sur ces constantes. De plus, selon ces cahiers il apparaît qu'entre 1897 et 1931 les constantes n'aient pas été modifiées, or sur cette période il y a eu plusieurs ruptures du fil du flotteur et même une modification de la longueur du ruban en platine, ce qui laisse supposer que ces données ne sont pas suffisantes pour cette étude et notamment pour la période qui nous intéresse entre 1885 et 1931.

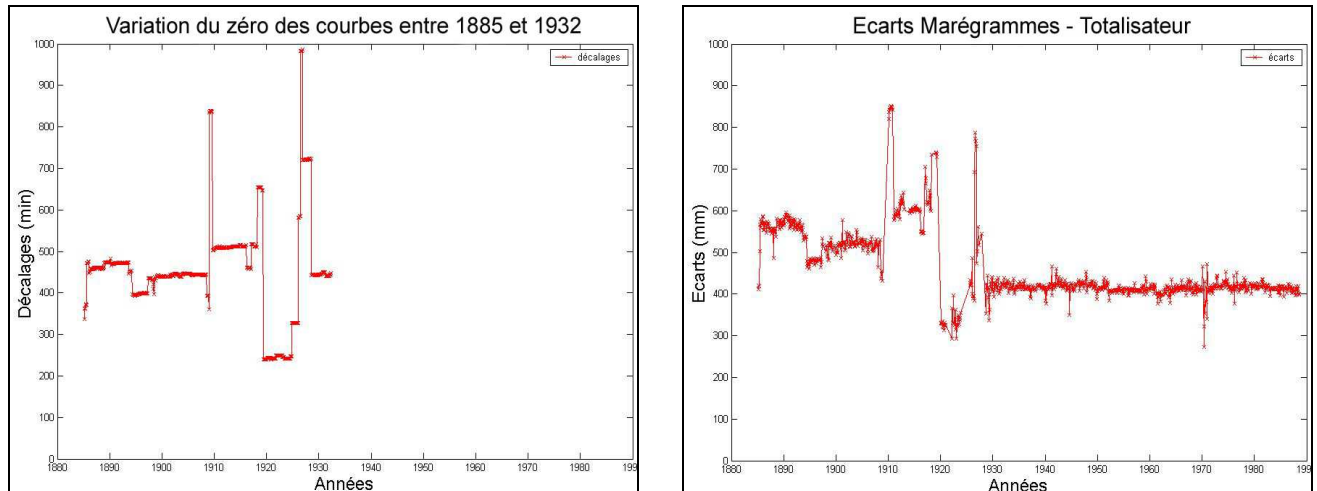
Ainsi, j'ai entrepris la saisie des observations qui concernent le calcul de la profondeur du zéro des courbes dans les feuilles d'observations. Ces documents ont une grande importance, chaque feuille correspond à un mois d'une année et regroupe l'ensemble des observations journalières : lectures totalisateur, baromètre, état de mer, réglage de la pendule, Calcul de la profondeur du zéro des courbes et observations sur le fonctionnement de l'appareil. Ce qui nous intéresse particulièrement, ce sont les données se rapportant au calcul de la profondeur des courbes. Au cours des années, cette feuille type a été modifiée à plusieurs reprises et la périodicité des mesures a également été variable, notamment en ce qui concerne le calcul de la profondeur du zéro des courbes. Cette périodicité a beaucoup évolué, en effet, si elle était au départ mensuelle, le calcul fut à partir de 1931 uniquement annuel et s'arrête en 1960. D'ailleurs il existe des feuilles d'observations uniquement pour la période allant de 1885 à 1968 (les observations concernant la dérive de l'horloge s'arrêtent en 1964).

Le principe du calcul du zéro des courbes était le suivant : à partir de la différence entre la mesure de la profondeur de la virole (partie du flotteur) au-dessus du repère A (rivet sur la margelle du puits) et la lecture sur l'échelle de la crémaillère, on en déduit la hauteur du zéro de la crémaillère. Enfin la distance entre le zéro de l'échelle de la crémaillère et le zéro des courbes nous permet de déterminer la profondeur du zéro des courbes.

Dans le cahier des observations, on retrouve le calcul de la profondeur du zéro des courbes entre février 1885 et avril 1932, ensuite entre avril 1932 et mars 1933, c'est uniquement la hauteur du zéro de la crémaillère qui est inscrite. A partir d'avril 1933, la méthode utilisée pour le calcul de la hauteur du zéro de la crémaillère est différente : c'est la différence entre la mesure faite à la sonde lumineuse et la lecture sur l'échelle de la crémaillère. Il y a une trace de ces mesures jusqu'en octobre 1960. Afin de faire un comparatif entre la variation de la profondeur du zéro des courbes et les écarts entre les données des Marégrammes et les données du totalisateur, j'ai

fait un graphique qui représente l'évolution de la profondeur du zéro des courbes entre 1885 et 1932 (Cf. Figure 19).

Figure 19 : Comparaison des graphiques «variation du zéro des courbes» et «Ecart Marégrammes Totalisateur».



Il semble bien qu'un parallèle puisse être fait entre les sauts constatés sur les écarts « Marégrammes - Totalisateur » et les mesures faites pour la détermination des constantes du marégraphe. Ce qui permet de confirmer le fait que les modifications intervenues sur le marégraphe aient été prises en compte pour le totalisateur mais pas pour les marégrammes. Ce constat va permettre de faire de nouvelles modifications sur les fichiers numérisés des marégrammes.

J'ai ainsi fait un parallèle entre des événements notés dans la colonne des observations sur le fonctionnement du marégraphe dans les cahiers d'observation et les sauts, afin de pouvoir déterminer au jour près les différentes périodes où l'on doit appliquer les différentes corrections. Les différentes corrections sont calculées de la manière suivante : pour chaque période identifiée (Annexe C) la correction est égale à la différence entre la constante « zéro des courbes » de cette période moins la constante « zéro des courbes » d'avril 1932. Ainsi je prends la constante « zéro des courbes » de 1932 comme référence.

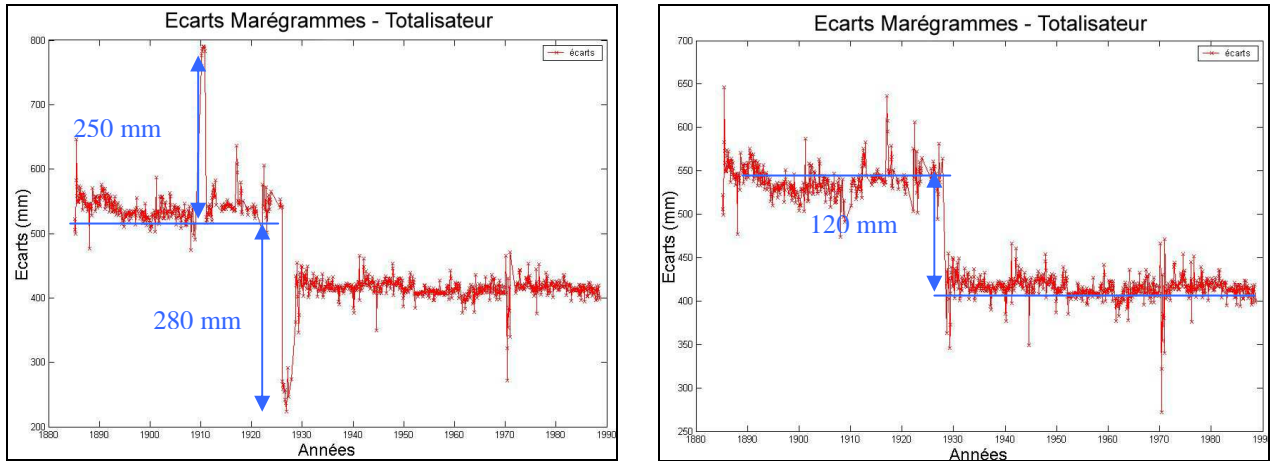
Une fois les différentes périodes identifiées et après avoir tronqué les fichiers (Cf. Annexe C : C.II), j'ai implémenté en fortran un programme de modification des fichiers. Suite à une première modification, je me suis aperçu qu'il y avait des problèmes sur certains fichiers. En effet, comme on peut le remarquer sur la figure 19, il y a un saut sur l'ensemble de l'année 1910 et sur l'année 1926, 1927 et une partie de l'année 1928.

Pour l'année 1910, le saut de 25 cm vient d'une erreur que j'ai faite lors de la modification réalisée préalablement, en effet lors de la numérisation la référence en hauteur a été les picots alors que je croyais que c'était le trait 1,50 m.

Pour ce qui est de la période janvier 1926 à juin 1928, on constate un saut de 28 centimètres. Ce saut provient d'un problème au niveau des données sur la profondeur du zéro des courbes, issues du cahier d'observations. En effet, en faisant entre 1926 et 1931 un parallèle sur les variations des deux séries de données : la première série est la différence entre la mesure de la profondeur de la virole au-dessus du repère A et la lecture sur l'échelle de la crémaillère et la deuxième série est la hauteur du zéro de la crémaillère, on remarque qu'à partir de janvier 1926, l'évolution des deux séries est incohérente, alors qu'elle devrait être identique (Cf. Annexe F : F.II).

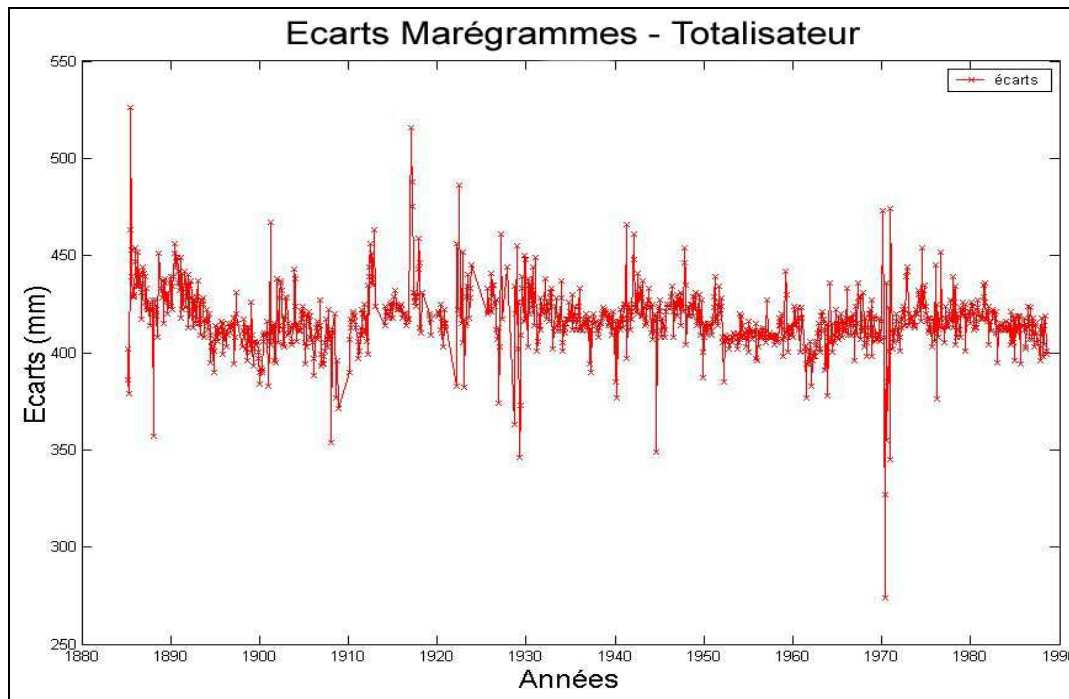
En faisant une comparaison entre les deux séries, on constate une différence de variation de 28 centimètres entre janvier 1926 et juin 1928. Ainsi l'écart de 28 cm est clairement identifié, la profondeur du zéro des courbes est erronée entre janvier 1926 et juin 1928, les données peuvent ainsi être corrigées. Après correction, on obtient comme résultat sur l'étude de l'écart Marégrammes Totalisateur la figure 20.

Figure 20 et 21 : Evolution du graphique « Ecart Marégrammes Totalisateur » suite aux corrections des données.



Ce résultat met en avant un autre décalage en hauteur, avec une cassure en deux parties qui se situe en juillet 1928. Or cette date correspond à l'allongement du ruban de platine qui a été opéré lors du nettoyage complet de l'appareil et la mise en concordance de tous les zéros entre juin et juillet 1928. Il apparaît sur les feuilles d'observations que le zéro de la crémaillère a été déplacé de 12 cm. Une comparaison entre les valeurs des écarts avant et après la cassure corrobore également le décalage de 12 cm. A l'aide des programmes de modification des fichiers, j'ai procédé à une nouvelle série de modifications, ce qui permet d'obtenir finalement la figure 22.

Figure 22 : Ecart « Marégrammes-Totalisateur » après correction des données.



Chapitre 3

Etude des étalonnages et de la stabilité locale

Après avoir contrôlé et corrigé les données numérisées, il est intéressant d'exploiter les expériences d'étalonnages afin de pouvoir évaluer qualitativement le fonctionnement du marégraphe à flotteur et du MCN. L'étude de la stabilité locale est également importante dans l'optique d'une étude globale sur la qualité des données.

3.1 Expérience et analyse d'un étalonnage

Le but de l'étalonnage est la détermination de la position de référence interne du marégraphe par rapport au repère de marée de l'observatoire, c'est à dire l'altitude de l'index de la crémaillère et les constantes du totalisateur. Cette opération a également pour but le contrôle des performances du marégraphe et en particulier sa précision et son bon fonctionnement.

Le principe de l'étalonnage est la comparaison entre les mesures indépendantes d'une même grandeur obtenues par l'intermédiaire de deux instruments : l'étalon qui sert de référence et le marégraphe qui doit être contrôlé. Pour le marégraphe de Marseille l'étalon utilisé est une sonde lumineuse et les instruments contrôlés sont le marégraphe à flotteur, le Marégraphe Côtier Numérique et l'échelle de marée.

3.1.1 Participation à l'étalonnage du 19/03/2003

L'« expérimentation » d'un étalonnage sur les marégraphes de Marseille m'a permis d'avoir une vue globale du fonctionnement de l'appareil et de son mode de réglage.

L'ensemble des opérations se déroule sur trois jours et les principales opérations sont les suivantes :

Premier jour :

- ✓ Vérification du matériel.
- ✓ Mise en place du porte sonde et du ruban invar.
- ✓ Détermination de l'altitude du zéro du curseur porte ruban (cette opération sera répétée plusieurs fois au cours des trois jours) (figure 24)

Deuxième jour :

- ✓ Mesures simultanées de hauteur d'eau toutes les 20 minutes, sur tous les instruments.
- ✓ Opération de nivellement dans la crypte et remonté du nivellement de la crypte.

Troisième jour :

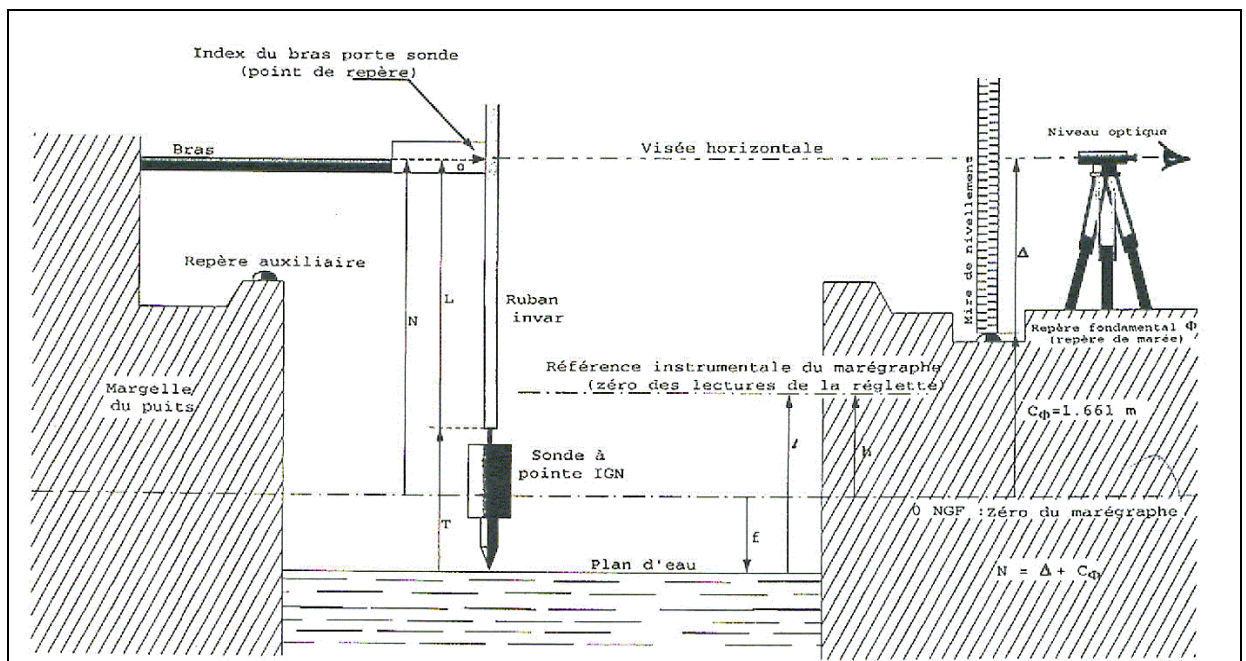
- ✓ Fin des opérations de nivellement à l'extérieur du marégraphe.

Matériel Utilisé :

- ✓ 2 niveaux : un N 3 et un NA 2 avec micromètre.
- ✓ 1 mire centimétrique IGN de 3 mètres du type 52 - 82.
- ✓ 1 ruban de 20 mètres étalonné
- ✓ 1 sonde lumineuse.
- ✓ 1 support avec curseur orientable
- ✓ 1 ruban invar.

Détermination de l'altitude du zéro du curseur porte ruban**Figure 23 : photo du repère fondamental**

L'obtention de l'altitude du zéro (Cf. figure 24) est déterminée à partir du repère fondamental sur une dénivelée (Cf. figure 23). Le ruban est fixé de manière à faire coïncider une de ses graduations rondes avec le zéro de l'index porte sonde. Le niveau est lui placé de façon à viser en dessous de l'index. La mire est placée sur le repère fondamental (Φ), on fait ensuite une lecture sur la mire et sur le ruban, ce qui nous donne la dénivelée.

**Figure 24 : Principe de l'étalonnage du marégraphe de Marseille (document issu des archives de l'IGN)**

L'instrument utilisé pour cette mesure est un N 3 et elle est répétée plusieurs fois sur les trois jours, ce qui permet de garantir une précision de l'ordre du dixième de millimètre sur l'altitude du zéro (pour l'expérience de 2003, sur les 5 mesures l'écart type est de ± 0.1 mm). Le fait que la distance minimale entre l'instrument et la mire pour une observation est plus petite pour le N 3 que pour le NA 2, justifie le choix du N 3 pour les observations dans la crypte (Cf. Figure 25) car les distances de mesures sont courtes dans la Crypte.

Mesures des hauteurs d'eau

Ces mesures doivent se faire en simultané sur tous les instruments : à la fois sur le ruban porte sonde par rapport à l'index, sur la réglette de la crémaillère du marégraphe à flotteur, sur l'écran de visualisation de la centrale d'acquisition du MCN et sur l'échelle de marée si l'état de la mer le permet.

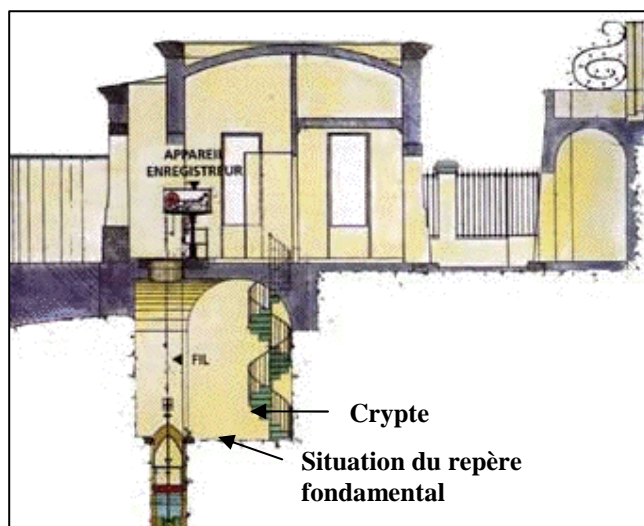
Ces mesures sont réalisées toutes les 20 minutes et sur un cycle de marée de 12 h 25. En fait, l'expérience n'a pas d'intérêt lorsque la mer est étale, les mesures peuvent donc se réaliser sur une durée de 11h30 à 12 heures. La simultanéité des mesures est rythmée par le MCN qui enregistre une nouvelle valeur toutes les dix minutes aux heures rondes. Cela permet également d'avoir une marge en cas de problème sur une mesure car elle peut être recommencée 10 minutes plus tard.

La mesure à la sonde se fait par l'intermédiaire d'un voyant lumineux qui s'allume lorsque la pointe de la sonde est en contact avec l'eau. Ainsi, le compte à rebours est important afin que l'opérateur puisse établir le contact le plus fin possible entre la pointe et le niveau de l'eau par une alternance entre voyant allumé et voyant éteint. Pour réaliser une mesure à la sonde, il faut descendre la sonde en faisant glisser le ruban dans le curseur.

L'ensemble des mesures est directement saisi et enregistré dans un fichier informatique Excel, ce qui permet de construire le diagramme de Van De Casteele au fur et à mesure de l'expérience pour chacun des instruments. Ainsi, cela aide à détecter des fautes de lecture et à éventuellement les corriger. Une courbe de marée se construit, ce qui permet de se situer dans le cycle de la marée.

Nivellement :

Figure 25: Vue en coupe de l'observatoire



Ce nivellement a pour objet le contrôle de la stabilité des repères situés sur le site de l'observatoire.

Chaque cheminement entre les repères est fait en aller retour et seul le fil niveleur est lu sur les deux échelles de la mire. Les observations des repères se situant dans la crypte sont faites en boucle à partir du repère fondamental. L'opération la plus délicate étant le passage de la crypte au niveau supérieur, où cette opération s'effectue par visée simultanée avec les deux niveaux (N 3 et NA 2) aux deux extrémités du ruban de 5 mètres.

L'ensemble des mesures est exploité au fur et à mesure des observations, avec la détermination des nouvelles dénivelées afin de les comparer entre elles et avec les précédentes opérations.

3.1.2 Exploitation des résultats des étalonnages

A partir des mesures, on peut tracer les diagrammes de Van de Castele qui permettent d'avoir une approche visuelle sur le bon fonctionnement du marégraphe. Ces graphiques sont importants, mais pas suffisants, il faut donc faire une étude statistique rigoureuse des données qui donne un ordre de grandeur sur les performances des marégraphes.

Méthode d'exploitation

Un précédent stage réalisé à l'université de La Rochelle par Antoine JARNY avait pour but l'évaluation des performances de marégraphes par étalonnage. Elle s'appuie sur deux séries d'expériences réalisées au SHOM à Brest en 2000 et 2002, et met en œuvre le test de Van de Castele. Au cours de ce stage il a réalisé un programme qui met en place la représentation du diagramme de Van de Castele d'une série de mesures, ainsi qu'une analyse statistique permettant d'étudier les performances du marégraphe étalonné à partir de la série de mesures : cette analyse consiste principalement à un calcul de régressions linéaires (pour le flux et le reflux) et au calcul d'indicateurs sur la qualité des ajustements (écart types).

Ainsi, ce programme faisait les opérations suivantes : la première fonction a pour but d'enlever les valeurs aberrantes, toute observation qui ne se situe pas dans l'intervalle, centré sur la moyenne et de rayon 4 fois l'écart type de l'ensemble des observations, est retirée. Ensuite, il procède au calcul de la nouvelle constante du marégraphe, ainsi qu'à une estimation sur la précision de cette dernière et sur l'appareil. La deuxième partie du programme sépare les observations en deux : flux et reflux afin de distinguer la marée montante et la marée descendante. Le flux correspondant au niveau de la mer qui monte et reflux au niveau de la mer qui descend. Une première représentation graphique du Diagramme de Van De Castele est affichée, avant de donner la possibilité de modifier la plage des mesures et de faire une régression linéaire avec écart type du flux et du reflux sur la plage de mesure choisie. Pour finir, il calcule l'erreur moyenne quadratique entre les observations et la régression linéaire et l'hystérésis, avec une deuxième représentation graphique du diagramme avec les régressions linéaires.

Une vérification du programme m'a amené à faire quelques modifications. La première concerne l'utilisation d'une plage réduite des données, elle entraîne une modification de la taille des données initiales, ce qui engendre des erreurs sur les tailles des matrices car ces modifications des tailles des données n'ont pas été prises en compte dans le programme. Les changements dans la plage des données n'étaient pas non plus pris en compte dans la deuxième représentation graphique. Ces modifications ont eu pour but de régler le problème suivant : pouvoir modifier la plage de mesure dans tous les cas possibles et non pas dans l'unique cas où la nouvelle plage de mesures est strictement incluse dans la plage Flux et dans la plage Reflux.

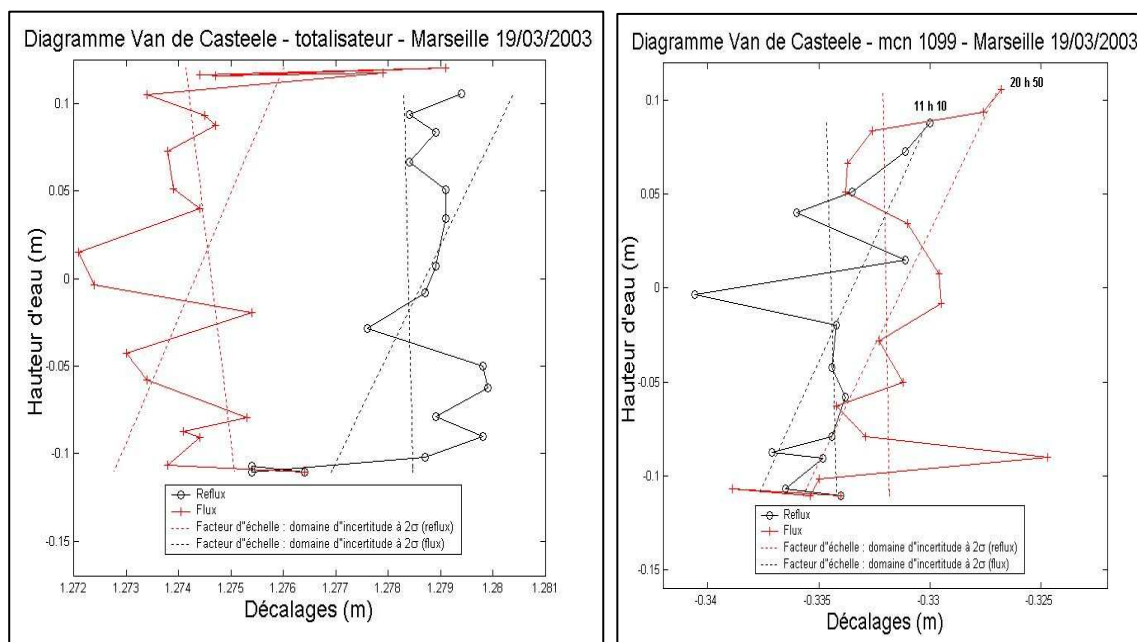
Concernant, la régression linéaire, ne comprenant pas l'origine des formules utilisées pour le calcul de la précision de la régression, j'ai programmé le calcul de la régression par la méthode des moindres carrés. Au final, les résultats étaient les mêmes et j'ai retrouvé les formules utilisées dans un ouvrage de mathématiques.

Les modifications finies, l'ensemble des résultats sont regroupés dans une fiche (Cf. Annexe F : F.III). Il y a une fiche par étalonnage et par instrument, ce qui permet d'avoir un suivi sur les données.

Exploitation des étalonnages de 2000 à 2003

J'ai ensuite travaillé sur l'ensemble des expériences d'étalonnages des deux marégraphe (Totalisateur et MCN) faites entre 2000 et 2003. Pour ce qui est du marégraphe à flotteur, on constate un cycle d'hystérésis (Cf. Figure 26) qui traduit un jeu dans le système mécanique du marégraphe de l'ordre de 5 mm pour l'expérience de 2003. On constate également un jeu d'échelle statistiquement non significatif de l'ordre de 1 mm par mètre pour l'expérience de 2003 avec un niveau de confiance de 95% .

Figure 26 : Les diagrammes de Van de Castele des marégraphe de Marseille des étalonnages de mars 2003.



Par contre, en ce qui concerne le MCN on constate une erreur d'échelle de l'ordre de 20 mm par mètre (Cf. Figure 26). Comme on peut le voir dans le tableau récapitulatif (Cf. Figure 27), cette pente est variable et peut être même très importante.

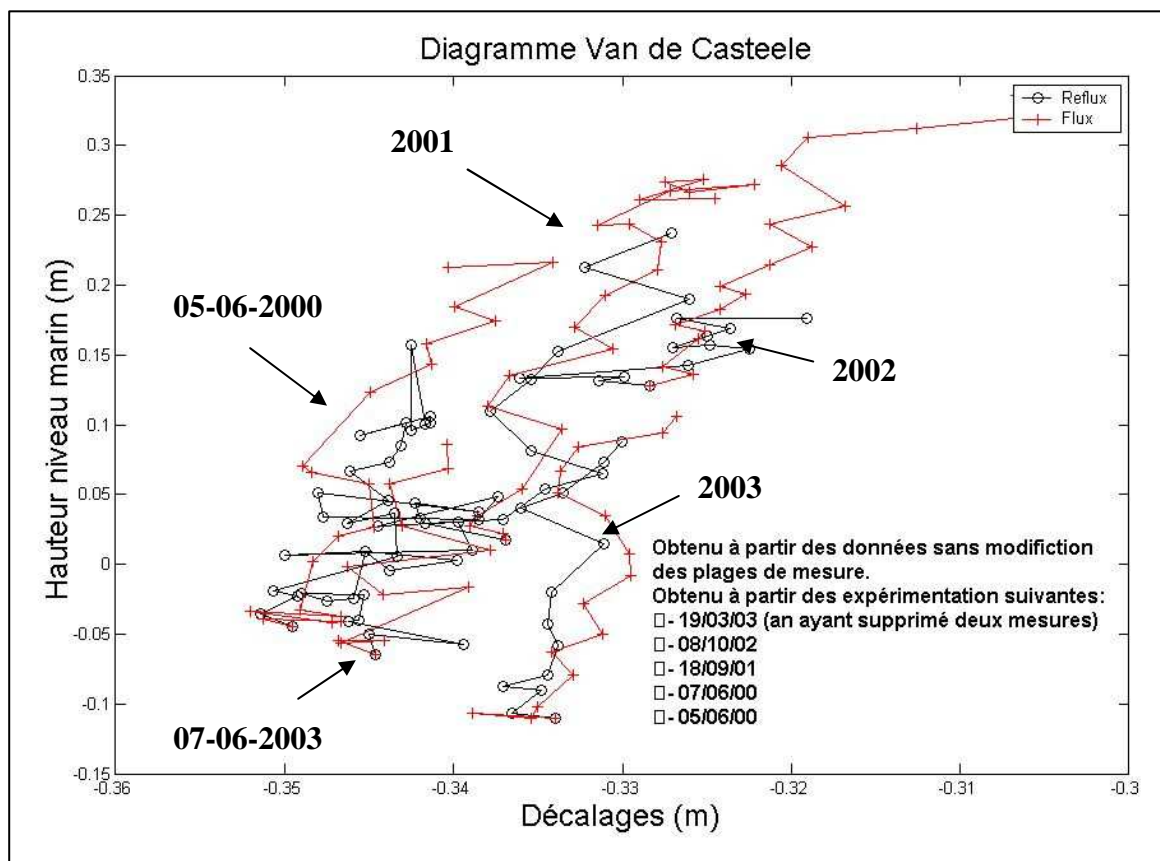
Figure 27 : Tableau récapitulatif des pentes observées sur les diagrammes de Van de Castele du MCN au cours des expériences d'étalonnages de 2000 à 2003.

Etalonnage	Flux		Reflux	
	Pente (mm/m)	σ pente (mm/m)	Pente (mm/m)	σ pente (mm/m)
05/06/00	43,5	5,7	47,4	7,6
07/06/00	31,5	15,3	30,4	21,2
18/09/01	48,3	4,9	44,1	12,5
08/10/02	90,4	11,3	187,3	53,5
19/03/03	19,6	10,4	18,0	10,2

Ainsi, ce qui ressort particulièrement de ce travail d'analyse des expériences d'étalonnages, ce sont des interrogations sur la présence systématique d'une pente de valeur variable sur les diagrammes du marégraphe acoustique. Il faut également noter que mise à part l'expérience de 2002 les pentes entre flux et reflux sont statistiquement cohérentes.

Comme la plage de mesure de chaque étalonnage est différente, j'ai ensuite implémenté un programme afin d'obtenir une représentation des diagrammes des étalonnages sur un même graphique (Cf. Figure 28), ce qui a permis de visualiser les expériences d'étalonnages d'une manière globale.

Figure 28 : Graphique de l'ensemble des expériences d'étalonnage du MCN.



Mise à part l'expérience de 2003, au vu du graphique (Cf. figure 28) et du tableau (Cf. figure 27), les pentes des diagrammes semblent similaires, par contre il semblerait qu'il y ait une dérive du zéro de l'instrument. Afin d'approfondir ce problème constaté sur les diagrammes de Van De Castel pour le MCN, j'ai réalisé une étude sur des constantes internes de correction des mesures du marégraphe acoustique.

3.2 Marégraphe côtier numérique

Installé en juillet 1998 dans le but de remplacer le marégraphe à flotteur et d'obtenir à nouveau des hauteurs horaires, le contrôle des performances du Marégraphe Côtier Numérique est essentiel afin de garantir son bon fonctionnement. D'ailleurs, le PSMSL recommande une période de recouvrement de 10 ans.

Le marégraphe à ultrasons, basé sur la mesure du tirant d'air, calcul la hauteur d'eau en corrigeant la mesure tirant d'air avec un modèle de correction au second degré (Cf. E.III.1). Comme le montre la partie sur l'étalonnage, on constate une pente significative sur les diagrammes des expériences faites entre juin 2000 et octobre 2002. Afin d'essayer d'avoir un élément de réponse sur le problème, j'ai procédé à une étude des constantes internes du marégraphe. Cette étude se base sur la détermination de nouvelles constantes internes à partir de chaque expérience d'étalonnage.

3.2.1 Formule d'étalonnage

La formule d'obtention de la hauteur d'eau du MCN avec des facteurs correctifs est la suivante :

$$H = D - (a + b \cdot x + c \cdot x^2) \tag{E.III.1}$$

avec $\begin{cases} H : \text{hauteur d'eau} \\ x : \text{tirant d'air mesuré par le MCN} \\ D : \text{dis tance entre le capteur et le zéro hydrographique} \\ a, b, c : \text{coefficients d'étalonnage} \end{cases}$

Sans correction les valeurs attribuées aux différentes constantes sont 0 pour a et c et 1 pour b, on retrouve bien la formule (E.I.3) avec $x = c \cdot \frac{\Delta T}{2}$

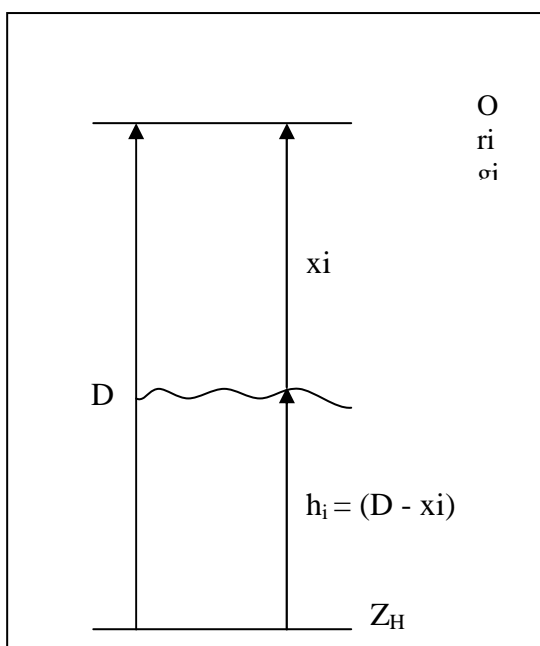
Pour obtenir la formule d'étalonnage, on considère les mesures d'indice i de la sonde et du MCN. Soit f_i la lecture faite sur la sonde lors de l'expérience d'étalonnage, cette lecture étant rapportée au zéro NGF et h_i la mesure sans correction de la hauteur d'eau du MCN.

On pose $f_i' = f_i + 0.33$ (en mètre) pour ramener toutes les mesures par rapport au zéro hydrographique. En effet on a $Z_{\text{éRO}_{\text{NGF}}} = Z_{\text{éRO}_{\text{HYDRO}}} + 0.33$ (en mètre).

Ainsi, les mesures de la sonde correspondent aux hauteurs d'eau que devraient donner le MCN, donc les f_i' sont les hauteurs d'eau H_i théoriques.

Soit h_i la mesure brut du MCN (sans correction), cette mesure étant sans correction, on peut donc en déduire directement de ces mesures le tirant d'air x_i , on a en effet $x_i = D - h_i$ (Cf. Figure 29).

Figure 29 : Principe de la mesure du MCN



Ainsi, en posant $\begin{cases} a' = d - a \\ b' = -b \\ c' = -c \end{cases}$

On obtient la formule d'étalonnage suivante :

$$f_i' = a' + b' \cdot x_i + c' \cdot x_i^2 \tag{E.III.2}$$

(Z_H : Zéro hydrographique)

Lors de l'étalonnage, les lectures faites sur la centrale d'acquisition du MCN sont corrigées, il est donc important d'obtenir ces mêmes mesures, mais non corrigées, afin que les données traitées soient brutes. Le SHOM qui récupère toutes les semaines via un modem l'ensemble des enregistrements du MCN, a la possibilité d'obtenir les mesures du marégraphe acoustique sans les corrections pour les périodes correspondantes aux expériences de 2000 à 2002. Je me suis donc intéressé à la détermination des constantes pour chaque expérience correspondant à ces périodes.

3.2.2 Etude des constantes internes du MCN

Les constantes appliquées aux mesures ont toujours été les mêmes. Ces dernières avaient été calculées à partir de l'étalonnage réalisé en 1999 par M. WOPPELMANN. J'ai ainsi validé la méthode utilisée en 1999 pour le calcul des constantes par les moindres carrées et implémenté un programme sous Matlab pour automatiser ce calcul (Cf. Annexe G).

Ce calcul permet d'obtenir les constantes a, b et c à partir des inconnues a', b' et c' déterminées par calcul et des relations existantes, ainsi que les écarts types sur le calcul des inconnues. Les résultats sont les suivants :

Expérience du 05/06/2000

$$\begin{aligned} a &= 160.870503 \text{ +/- } 45.444824 \text{ (cm)} \\ b &= -0.377294 \text{ +/- } 0.371531 \\ c &= 0.002954 \text{ +/- } 0.000759 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \\ \text{cov}(a,b) &= 539.220846 \end{aligned}$$

Expérience du 07/06/2000

$$\begin{aligned} a &= 114.107928 \text{ +/- } 267.535876 \text{ (cm)} \\ b &= 0.005359 \text{ +/- } 2.126242 \\ c &= 0.002166 \text{ +/- } 0.004224 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \\ \text{cov}(a,b) &= 15.493135 \end{aligned}$$

Expérience du 18/09/2001

$$\begin{aligned} a &= 112.288857 \text{ +/- } 46.462127 \text{ (cm)} \\ b &= 0.026694 \text{ +/- } 0.390530 \\ c &= 0.002100 \text{ +/- } 0.000820 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \\ \text{cov}(a,b) &= 432.372572 \end{aligned}$$

Expérience du 08/10/2002

$$\begin{aligned} a &= 94.725997 \text{ +/- } 108.393066 \text{ (cm)} \\ b &= 0.143490 \text{ +/- } 0.936715 \\ c &= 0.001906 \text{ +/- } 0.002022 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \\ \text{cov}(a,b) &= 67.017325 \end{aligned}$$

Ainsi, on peut remarquer que les écarts types des inconnues sont très importants. Ce qui amène un certain nombre d'interrogations à propos de la formule d'étalonnage puisqu'il y a une incohérence entre l'ordre de grandeur des écarts types obtenus lors des étalonnages et par le calcul des constantes internes du marégraphe. D'ailleurs les écart-types des 3 coefficients (constante, dérive, accélération) sont toujours supérieurs aux valeurs estimées de ces paramètres. Ainsi, en calculant, à partir des Matrices Normales du calcul par les moindres carrées, de la covariance entre les inconnues a et b, on remarque qu'il y a en fait une très forte corrélation entre ces deux inconnues a et b (la constante et la dérive), c'est à dire que l'information apportée par l'une et l'autre sont donc équivalentes. Il est donc possible de pouvoir supprimer l'une ou l'autre des deux constantes.

J'ai ainsi modifié le programme afin de pouvoir faire le calcul pour les deux cas de figures : le premier cas correspond à imposer la valeur 0 pour a et l'autre à imposer la valeur 1 pour b. On arrive à obtenir des paramètres correctement estimés avec des écarts types petits devant les valeurs des paramètres.

Cas 1 : $b = 1$

$$H = D - x - (a + c \cdot x^2)$$

Expérience d'étalonnage du 05/06/2000

$$\begin{aligned} a_1 &= -7.577815 \text{ +/- } 0.797010 \text{ (cm)} \\ c_1 &= 0.000141 \text{ +/- } 0.000013 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Expérience d'étalonnage du 07/06/2000

$$\begin{aligned} a_2 &= -11.039801 \text{ +/- } 2.013599 \text{ (cm)} \\ c_2 &= 0.000190 \text{ +/- } 0.000032 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Expérience d'étalonnage du 18/09/2001

$$\begin{aligned} a_3 &= -3.497227 \text{ +/- } 0.667221 \text{ (cm)} \\ c_3 &= 0.000057 \text{ +/- } 0.000012 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Expérience d'étalonnage du 08/10/2002

$$\begin{aligned} a_4 &= -4.380226 \text{ +/- } 1.173163 \text{ (cm)} \\ c_4 &= 0.000057 \text{ +/- } 0.000021 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Cas 2 : $a = 0$

$$H = D - (b \cdot x + c \cdot x^2)$$

Expérience d'étalonnage du 05/06/2000

$$\begin{aligned} b_1 &= -1.400167 \text{ +/- } 0.006081 \\ c_1 &= 0.005043 \text{ +/- } 0.000025 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Expérience d'étalonnage du 07/06/2000

$$\begin{aligned} b_2 &= -1.360714 \text{ +/- } 0.016051 \\ c_2 &= 0.004879 \text{ +/- } 0.000064 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Expérience d'étalonnage du 18/09/2001

$$\begin{aligned} b_3 &= -1.433278 \text{ +/- } 0.006180 \\ c_3 &= 0.005163 \text{ +/- } 0.000026 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Expérience d'étalonnage du 08/10/2002

$$\begin{aligned} b_4 &= -1.509372 \text{ +/- } 0.010560 \\ c_4 &= 0.005474 \text{ +/- } 0.000045 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Concernant le modèle de correction à adopter, il me semble que le modèle avec les paramètres (a, c) est le modèle le plus pertinent. En effet, en supposant qu'il n'y ait pas de correction à appliquer, on retrouve la relation $H = D - x$.

D'une expérience à l'autre, on peut remarquer que les constantes sont variables, il est donc intéressant de faire un test de Fischer, afin de savoir s'il est possible de faire une détermination des constantes internes pour l'ensemble des mesures de toutes ou plusieurs expériences d'étalonnages.

Posons (a_i, c_i) le couple solution de l'expérience d'étalonnage i , avec i allant de 1 à 4 pour les quatre expériences.

Le principe du test de Fisher est le suivant :

Il a pour but de vérifier un ensemble de contraintes. Dans notre cas, on va vérifier par exemple les contraintes $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a_{1234}$ et $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = c_{1234}$ qui constituent une hypothèse de départ. Cette hypothèse peut être traduite de la manière suivante : on se demande si pour l'ensemble des observations des 4 expériences d'étalonnages le comportement du MCN, donc le modèle correcteur (a, c), est le même ou bien, si au contraire des différences marquées sont constatées entre les différentes expériences.

A partir de des hypothèses on calcul Q à l'aide de la formule suivante [CRE 03]:

$$Q = \frac{SCR_c - SCR}{SCR} \cdot \frac{N - (k + 1)}{p} \quad \text{(E.III.3)}$$

$$\text{avec } \begin{cases} N : \text{Nombre d'observations} \\ p : \text{Nombre de contrainte} \\ k+1 : \text{Nombre d'inconnues} \end{cases}$$

SCR est la somme des carrés des résidus estimés sans contrainte et SCRc est la somme des carrés des résidus avec contraintes.

Si l'on revient à notre exemple, on calcule SCR₁, SCR₂, SCR₃, SCR₄ pour chaque expérience, en les sommant on en déduit SCR₁₂₃₄ qui est la somme des carrés des résidus estimés sans contrainte. Le regroupement des observations de l'ensemble des expériences permet de calculer SCRc.

$$\text{SCR} = 11.859852 \quad \text{SCRc} = 48.444142$$

On a 6 contraintes et 8 inconnues, ce qui permet d'en déduire $Q_{1234} = 64.78$ à comparer à la fractile d'ordre 0.05 de la loi F(p,N-(k+1)) que l'on note F(0.05). Or $2.16 < F(6,126) < 2.19$, ainsi $Q_{1234} > F(6,126)$, l'hypothèse est donc rejetée.

L'ensemble des possibilités a été envisagé, les résultats sont récapitulés dans la figure 30.

Figure 30 : Tableau récapitulatif du test de Fisher

Expériences étudiées	Q	N	k+1	p	Intervalle pour F(0.05)
1, 2, 3, 4	64.78	134	8	6	[2.16-2.19]
1, 2, 3	33.39	105	6	4	[2.46-2.47]
1, 2, 4	64.34	101	6	4	[2.46-2.47]
1, 3, 4	105.80	99	6	4	[2.46-2.47]
2, 3, 4	55.31	97	6	4	[2.46-2.47]
1, 2	13.19	72	4	2	[3.13-3.15]
1, 3	75.04	70	4	2	[3.13-3.15]
1, 4	137.13	66	4	2	[3.13-3.15]
2, 3	29.13	68	4	2	[3.13-3.15]
2, 4	38.42	64	4	2	[3.13-3.15]
3, 4	62.88	62	4	2	[3.15-3.18]

D'après la comparaison entre le fractile d'ordre 0.05 de loi F(p, N - (k+1)) pour les différents cas et les valeurs de Q pour ces mêmes cas, il apparaît clairement que la somme des carrés des résidus estimés sous contraintes diffère trop de celles des carrés des résidus estimés sans contrainte.

Ce test montre que les modèles de correction sont significativement différents d'une expérience d'étalonnage à l'autre. Ainsi d'une expérience d'étalonnage à l'autre, les constantes internes de correction des mesures doivent être différentes si l'on veut obtenir un diagramme de Van De Castel parfait à chaque expérience. Une explication possible serait la variation d'une expérience à l'autre du gradient de température dans le puits. En effet, un rapport d'étude du SHOM [GON 02] met en avant la sensibilité importante des marégraphes acoustiques à la température et notamment met en avant l'influence de l'évolution diurne de la température dans le puits et également son évolution au cours des saisons. Un autre rapport du SHOM qui s'est intéressé à la « Mesure du gradient de température dans le puits du Marégraphe de Penfeld (BREST) » [DEV

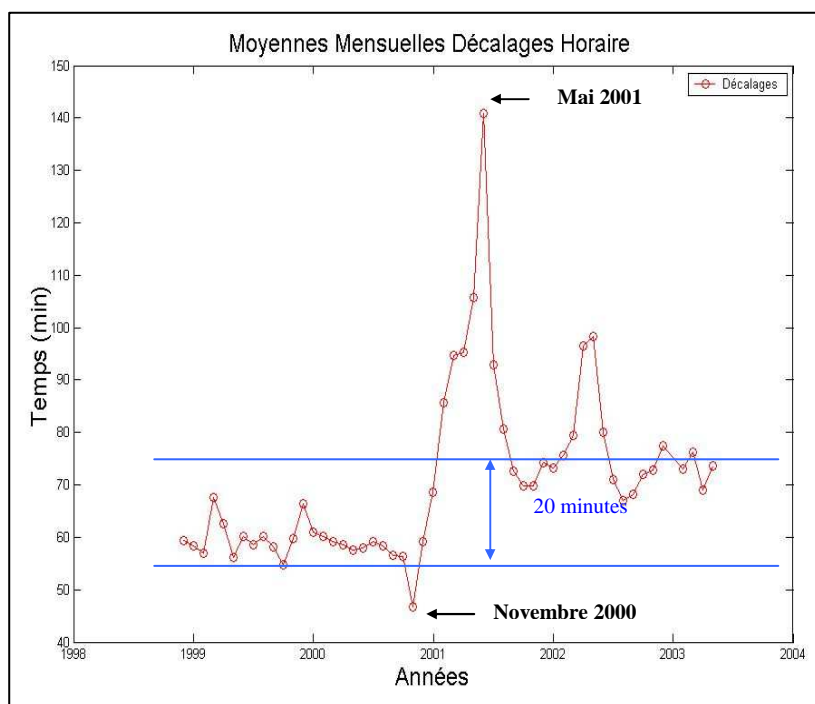
02] met en avant le fait que l'existence d'un gradient de température dans un puits de tranquillisation pouvait induire des erreurs sur la mesure marégraphique de l'ordre du centimètre. Les facteurs correctifs (a, b, c) ont en fait comme fonction de corriger les défauts internes, essentiellement électroniques, du MCN. Ainsi, elles n'ont pas été prévues pour corriger un facteur extérieur comme la température. Le MCN a un capteur de température pour calculer la célérité de l'onde sonore et en déduire le tirant d'air. Ainsi, il semblerait que l'origine de ces défauts proviennent du gradient de température puisque la sonde mesure la température uniquement à un point fixe, cela peut aussi être un problème venant de capteur température.

Il me semble qu'une étude supplémentaire serait à faire, comme des étalonnages successifs du MCN sur plusieurs jours, afin de pouvoir mieux analyser et comprendre le phénomène. La forte corrélation entre paramètre constant et dérive du modèle de correction pourrait venir d'une différentielle trop petite de la hauteur (tirant d'air ou niveau d'eau).

3.2.3 Etude des mesures du MCN entre 1998 et 2003

L'ensemble des corrections faites et explicitées dans le chapitre sur les données des marégrammes a permis de calculer de nouvelles constantes harmoniques et il est donc intéressant de comparer les mesures du MCN avec une marée théorique. Ainsi, une comparaison au niveau horaire donne les résultats représentés sur la figure 31.

Figure 31 : Graphique Comparaison des moyennes mensuelles des décalages horaires entre marée prédite et mesures MCN obtenu à partir du programme MAS.

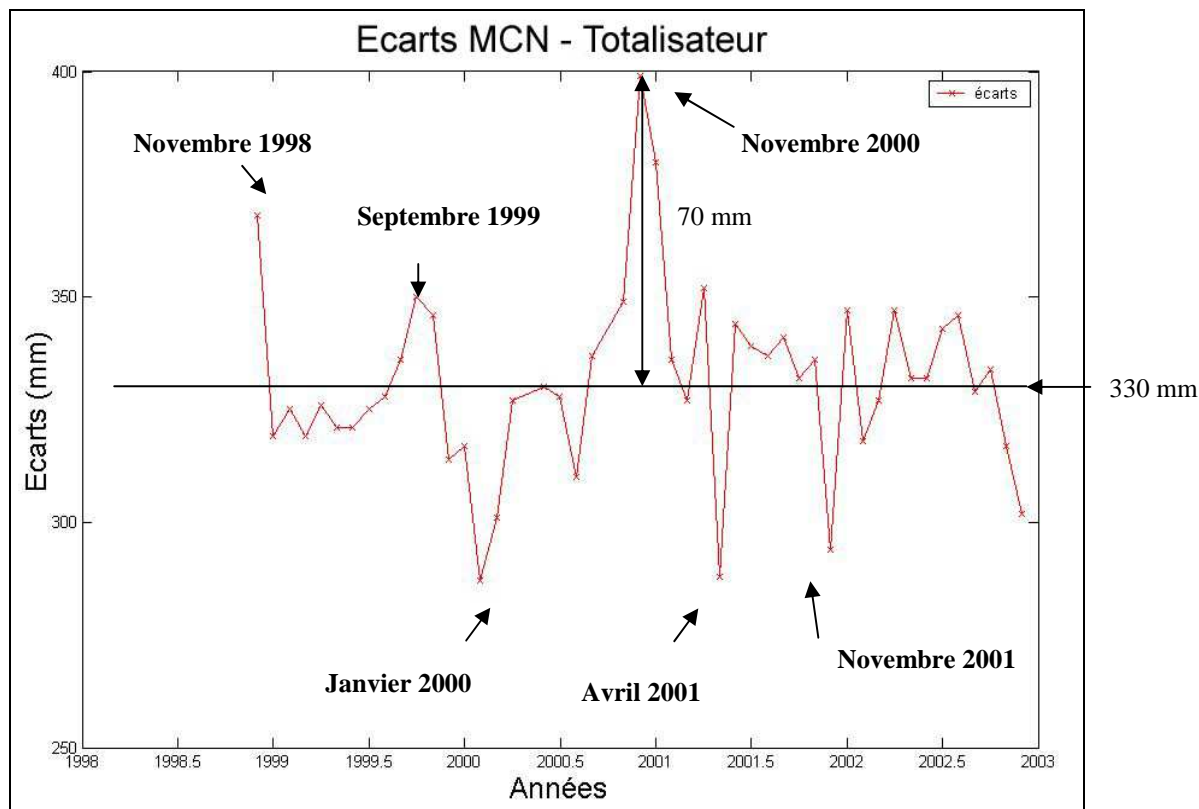


Cette étude a permis de déceler un problème au niveau du MCN. On constate en effet à partir de Novembre 2000 une variation de la référence temporelle, avec un pic en Mai 2001 puis une stabilisation avec un décalage de 20 minutes avec la marée théorique.

Une comparaison entre les données du Totalisateur et du MCN est également intéressant à regarder (Cf. Figure 32). Théoriquement, les écarts en amplitude entre le totalisateur et le MCN

devrait être de 33 cm, ce qui correspond à la différence entre les systèmes de référence de chaque appareil.

Figure 32 : Graphique Comparaison des moyennes mensuelles entre les mesures du totalisateur et du MCN



Les écarts en amplitude sont stables sauf pour novembre 2000 où l'écart est de 70 mm. Les écarts entre le MCN et le totalisateur semblent tout de même importants avec un écart type de l'ordre de 2.1 centimètres.

Concernant le problème au niveau temporel, il peut avoir deux origines, cela peut être soit un problème au niveau de l'instrument, cette hypothèse est peu probable, puisque lors des étalonnages la centrale d'acquisition qui affiche la mesure donne également l'heure de la mesure. De plus avec cette hypothèse on aurait dû constater sur les diagrammes de Van de Castele un cycle d'hystérésis due au décalage dans le temps entre la mesure à la sonde et la mesure relevée du MCN. D'ailleurs, la figure 33 est la représentation graphique de l'expérience d'étalonnage de 2003 avec un décalage volontaire de 20 minutes entre des mesures du MCN et les mesures faites à la sonde étalon. On constate bien le cycle d'hystérésis sur le graphique.

La deuxième origine possible serait la conséquence d'une modification au niveau de l'observatoire qui induirait un retard entre les mesures faites avant et après la modification. D'ailleurs, Les changements de référentiel temporel semblent être liés à des modifications faites au niveau du marégraphe, comme le changement de la grille à l'entrée de la galerie en novembre 2000 et à des travaux en mai 2001. Si le pic de mai 2001 est très probablement lié aux travaux, le changement n'est pas forcément la cause du retard. On constate d'ailleurs aussi un pic sur les écarts en amplitude au mois de mai 2001.

Pour répondre à cette interrogation, on peut utiliser les mesures réalisées lors du dernier étalonnage de Mars 2003, en effet les mesures faites sur l'échelle de marée qui se trouve à

l'extérieur de l'observatoire, juste devant l'entrée de la galerie, ont été prises car la mer était dans un état très calme et donc propice à ce type de relevé. Ces mesures qui sont faites à l'extérieur du marégraphe peuvent ainsi être comparées aux mesures faites avec la sonde, ce qui permettrait de détecter un éventuel retard entre la marée mesurée à l'extérieur et à l'intérieur de l'observatoire.

Ainsi, pour un retard de 20 minutes, en considérant l'amplitude de la marée de l'ordre de 30 cm en moyenne l'évolution du niveau de l'eau est donc de 2.5 cm par heure. En fait, la variation du niveau de la mer n'est pas constante, avec la loi des douzièmes (Cf. Annexe B : B.II), on considère qu'à mi-marée cette variation est de l'ordre de 7.5 cm par heure, ce qui correspond à 2.5 cm pour 20 minutes. Ainsi, avec ces hypothèses, pour un retard de 20 minutes, on devrait constater un cycle d'hystérésis de l'ordre de 5 cm.

L'exploitation des mesures faites sur l'échelle de marée donne le diagramme de Van de Castele de la figure 34.

Figure 33 : Diagramme de Van de Castele du MCN avec un décalage de 20 minutes.

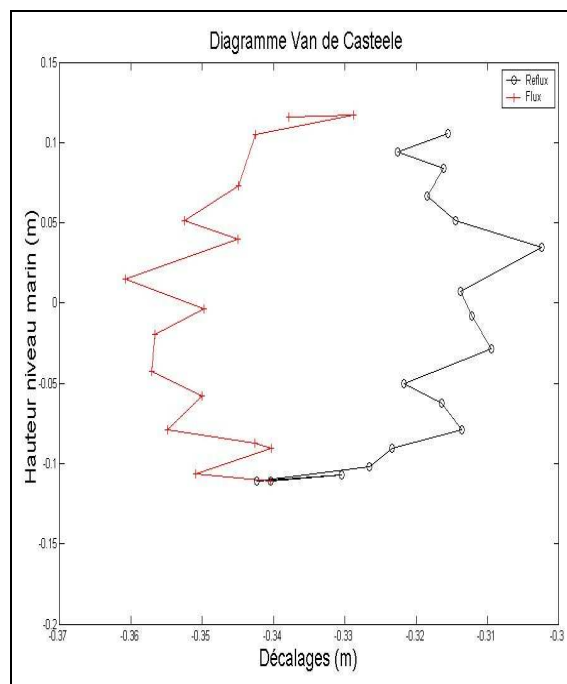
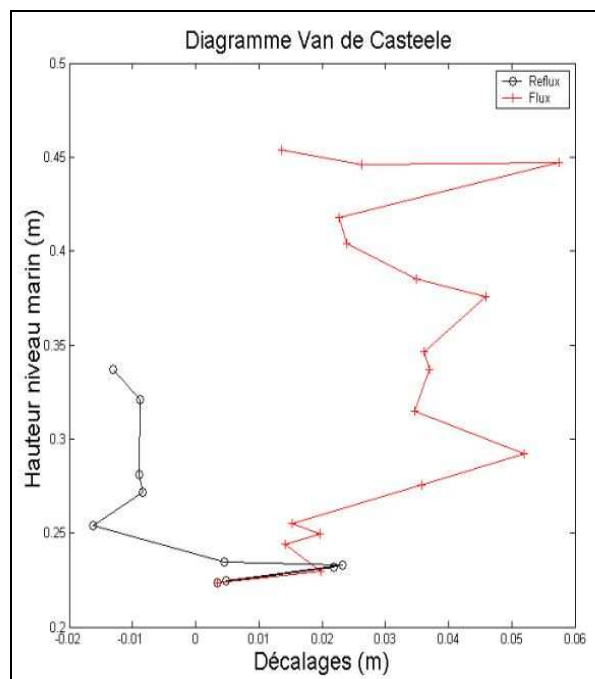


Figure 34 : Diagramme de Van de Castele de l'échelle de marée.



Le test de Van de Castel entre l'échelle et la sonde confirme le décalage de 20 minutes entre les mesures faites à l'extérieur et avec le marégraphe acoustique. C'est pourquoi il est très probable que ce soit une modification au niveau de l'observatoire qui ait entraîné ce retard. Le changement de la grille de la galerie pourrait être à l'origine de ce retard, cependant il semblerait que la nouvelle grille utilisée soit une réplique exacte de celle présente préalablement. C'est pourquoi, on suppose que c'est une modification au niveau de la vanne qui a engendré ce retard.

3.3 Stabilité de l'observatoire : Exploitation des opérations de nivellement

Si les opérations de nivellement ont pour principal but le contrôle de la stabilité des repères situés sur le site et autour de l'observatoire, elles peuvent également servir à faire une étude plus globale sur la stabilité de l'observatoire.

3.3.1 Les données

Pour cette étude on dispose d'un ensemble d'opérations de nivellement réalisées entre 1885 et 2003. Les données peuvent être séparées en deux : une première partie concerne l'ensemble des repères qui se trouvent dans l'observatoire et une deuxième partie concerne des repères éloignés. L'ensemble des données disponibles est résumé dans un tableau (Cf. figure 35).

Figure 35 : Récapitulatif historique des observations de nivellement disponibles pour l'étude de la stabilité locale de l'observatoire

Repères de l'observatoire	Repères extérieur à l'observatoire
Observations de 1885	Observations de 1946
Observations de 1946	Observations de 1959
Observations de 1959	Observations de 1968
Observations de 1968	Observations de 1974
Observations de 1974	Observations de 1981
Observations de 1993	Observations de 1993
Observations de 1996	Observations de 1994
Observations de 1997	Observations de 1996
Observations de 1999	Observations de 1997
Observations de 2000	Observations de 1999
Observations de 2001	Observations de 2000
Observations de 2002	Observations de 2001
Observations de 2003	Observations de 2002
	Observations de 2003

La liste de l'ensemble des repères est la suivante et, pour la plupart des repères, leur situation est représentée dans l'annexe H (Cf. H.III et H.IV).

Repères de l'observatoire : M.ac-O-I, M.ac-O-II, M.ac-O-IIbis, M.ac-O-III, M.ac-O-IV, M.ac-O-V, M.ac-O-VI, M.ac-O-VII, M.ac-O-VIII (ϕ), M.ac-O-IX, M.ac-O-XI, M.ac-O-XIII, M.ac-O-XIV, M.ac-O-XV.

Repères extérieurs à l'observatoire : M.abc, M.ab-1, M.ab-2, M.ab-3, M.bc-67, M.bc-68, M.bc-68 I, M.bc-68 II.

Concernant les observations disponibles, d'une année à l'autre on ne dispose pas rigoureusement des mêmes observations puisque les repères n'ont pas été observés dans le même ordre. Par contre je considère que l'ensemble des données est homogène car les méthodes d'observations n'ont pas changé entre 1885 et 2003. Et si les instruments n'étaient pas les mêmes, les dispositions prises pour les observations étaient faites afin de d'obtenir le meilleur résultat. La précision des données peut être considérée comme homogène.

Concernant la précision des observations, on peut encore les séparer en deux groupes. En effet, les repères de l'observatoire sont proches les uns des autres (20 mètres au maximum), ainsi

dans la plupart des cas une à deux dénivelées sont suffisantes pour rattacher deux repères entre eux. Par contre les nivelées entre repères extérieurs sont nécessairement moins précises car demandent plus de dénivelées pour être déterminées.

3.3.2 Précision des données

Avec un niveau NA2 avec micromètre et une mire invar, l'écart type sur une lecture est de ± 0.2 mm. Etant donné que la dénivelée se fait en aller-retour, on peut estimer la précision d'une dénivelée à ± 0.2 mm. Pour les plus longs cheminements la précision est de l'ordre de $\pm 1.5 \text{ mm} / \sqrt{km}$.

3.3.3 Méthode utilisée pour l'exploitation des données

J'ai séparé les calculs en deux parties, une première partie pour le calcul des altitudes des repères de l'observatoire et une seconde partie pour le calcul des altitudes des repères qui sont à l'extérieur de l'observatoire. J'ai fixé un repère de départ à son altitude connue, le point fondamental (1.661 mètres) puis à partir des dénivelées non compensées, calculé les altitudes de l'ensemble des autres repères. Pour finalement représenter pour chaque repère l'évolution de son altitude au cours des opérations d'observations.

Pour le calcul des altitudes des repères situés dans l'observatoire, j'ai utilisé le repère fondamental (M.ac-O-VIII) qui est la référence de l'ensemble du réseau de nivellement NGF. Par contre, pour ce qui est des repères situés à l'extérieur de l'observatoire, je suis parti de l'altitude du point M.abc obtenue par le premier calcul, M.abc étant le point central de départ des deux branches ab et bc. Lorsque je ne disposais pas d'observation pour le premier calcul, je prenais l'altitude de l'année précédente pour M.abc.

A partir du nombre de dénivelées utilisées pour les cheminements, on peut déterminer une précision attendue sur l'altitude non compensée de chaque repères (Cf. Figure 36) :

Figure 36 : Précision attendue sur l'altitude non compensée de chaque repères

Repères	Nombre de dénivelées depuis M.ac-O.VIII	Précision sur l'altitude brute (mm)
M.ac-O-I	9	0.6
M.ac-O-II	5	0.5
M.ac-O-IIbis	5	0.5
M.ac-O-III	2	0.3
M.ac-O-IV	1	0.2
M.ac-O-V	1	0.2
M.ac-O-VI	1	0.2
M.ac-O-VII	1	0.2
M.ac-O-IX	7	0.5
M.ac-O-XI	9	0.6
M.ac-O-XIII	10	0.6
M.ac-O-XIV	12	0.7
M.ac-O-XV	4	0.4
M.abc	10	0.6
Repère	Distance depuis M.abc (km)	Précision sur l'altitude brute (mm)
M.ab-1	0.3	1.0
M.ab-2	0.6	1.3
M.ab-3	0.67	1.3
M.bc-67	0.91	1.5

M.bc-68	0.4	1.5
M.bc-68 I	0.04	0.7
M.bc-68 II	0.04	0.7

3.3.4 Résultats

L'ensemble des résultats est regroupé sous forme de graphique dans l'annexe H (Cf. H.I et H.II).

Concernant le premier graphique du repère M.abc (Cf. annexe H.I), il y a un saut de l'ordre de 5 centimètres entre 1885 et 1946, en consultant les archives de l'IGN, on arrive facilement à expliquer ce saut. Son origine vient de la disparition du repère entre 1885 et 1946, il a ensuite été remplacé en 1946. D'ailleurs il faut noter que les noms utilisés pour l'ensemble des repères n'ont pas toujours été les mêmes, pour le repère M.abc, en 1885, son numéro était le M.bc 17 qui est devenu le M.bc 17bis en 1946. Finalement au cours de la réfection en 1959 il, devient le M.abc.

Concernant l'altitude de M.ac-O-III : l'écart entre 1885 et 1959 peut provenir du rattachement de 1885. Il est impossible de savoir si les opérateurs avaient utilisé à l'époque un fil invar.

Concernant l'altitude du repère M.ac-O-II : l'écart de 12 mm entre 1885 et 1946 provient d'un aplatissement du rivet qui a été signalé à l'époque par l'opérateur.

Pour les observations de 2002, on peut remarquer que pour l'ensemble des repères qui sont sur la partie supérieure de l'observatoire (Cf. Annexe H : H.I) il y a un saut de l'ordre d'1mm. Il semblerait que cela provienne d'une erreur faite au niveau de la mesure lors de la remontée du nivellement de la crypte, car l'écart apparaît uniquement à partir du repère M.ac.O.III. Cette erreur peut avoir comme origine un problème de lecture sur le fil invar ou un déplacement accidentel du crapaud.

Après avoir pris en compte l'ensemble des remarques précédentes, j'ai représenté, sur deux plans de situations des repères, les variations des altitudes des repères de l'observatoire entre 1885 et 2003 (Annexe H : H.III) et les variations des altitudes des repères extérieurs entre 1946 et 2003 (Annexe H : H.IV). Les repères M.ac-O-IV, M.ac-O-V, M.ac-O-VI et M.ac-O-VII sont des repères situés autour du puits de tranquillisation. La variation de leurs altitudes dans le temps est faible, de l'ordre de 0.3 à 0.4 mm et ils sont proches du repère fondamental, c'est pourquoi ils ne sont pas importants pour cette partie de l'étude.

Concernant les repères de l'observatoire, mis à part le repère M.ac-O.I, en tenant compte de la précision estimée sur les altitudes brutes les autres déplacements ne sont pas significatifs. En tout cas pour les repères où l'on dispose d'une longue période d'observation. Les déplacements du repère M.ac-O.I peuvent être imputés à l'instabilité de son support. Il faut maintenant faire une étude sur les repères plus éloignés du site.

Etant donné que les données ne sont pas homogènes à un niveau temporel, il semble difficile d'interpréter les informations sur les variations des altitudes des repères. Il semble toutefois que les déplacements des repères par rapport au repère fondamental qui sert de référence sont dans la plus part des cas de signe positif et leur amplitude est plus importante vers le Nord. Cela peut être interprété comme un soulèvement de la zone couverte par le cheminement M.bc par rapport à la zone couverte par les cheminements M.ab et M.ac. Il est difficile d'en dire d'avantage.

Le site semble globalement stable, une étude des données GPS permettrait d'avoir une idée plus précise sur les déplacements du site dans un référentiel absolu.

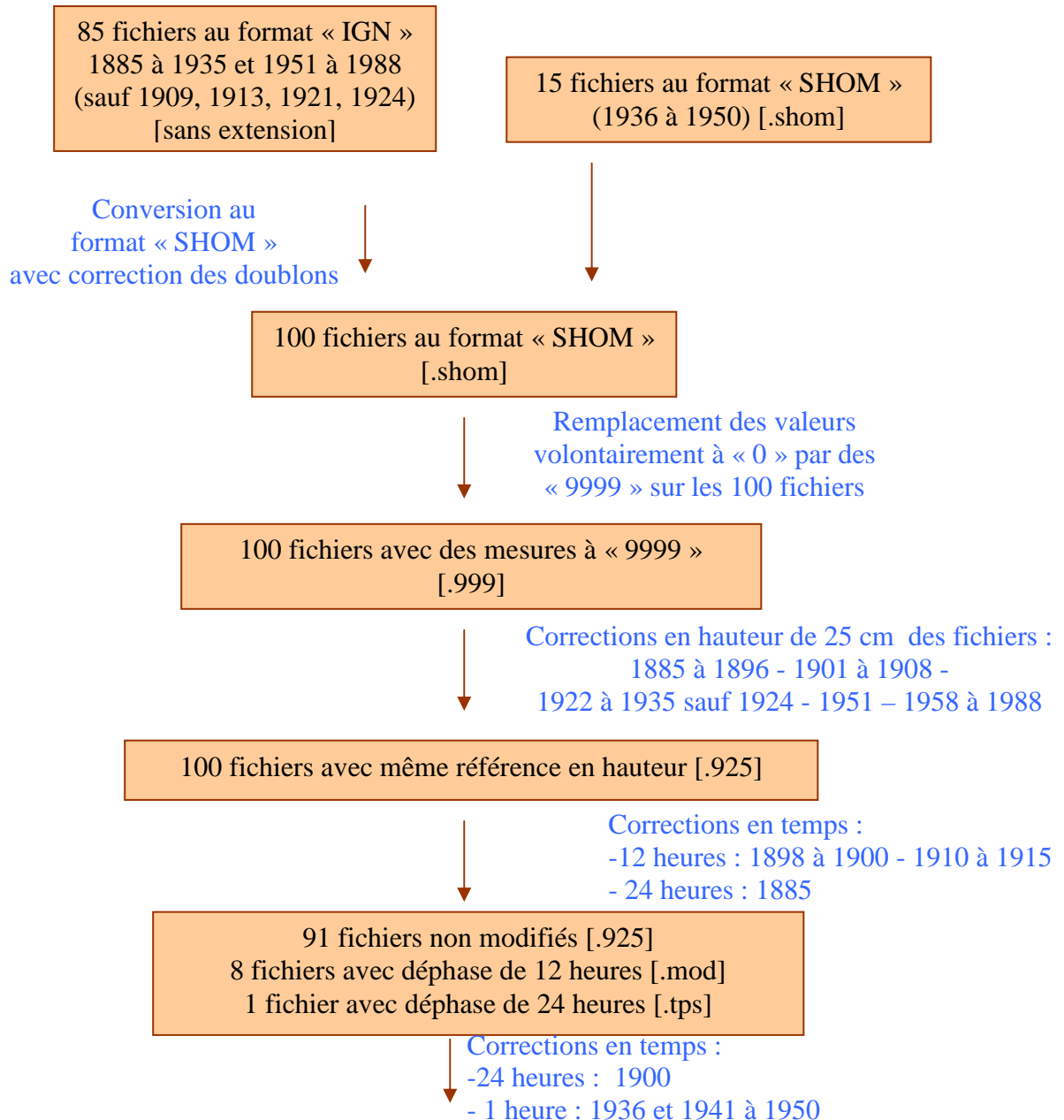
Chapitre 4

Bilan sur les données Marégraphique

4.1 Bilan sur les modifications des fichiers

Le but de cette partie de l'étude est de faire un récapitulatif sur l'ensemble des modifications faites au niveau des fichiers, afin d'avoir une vue globale, des différentes étapes qui ont amené aux fichiers finaux. Je vais présenter ce bilan sous la forme d'un organigramme (Cf. Figure 37) qui récapitule : le nombre de fichiers de départ dans les différents formats, les modifications faites aux fichiers, en précisant les fichiers modifiés avec leurs extensions associées qui permettent de les identifier.

Figure 37 : Organigramme récapitulatif des modifications faites aux niveau des fichiers



80 fichiers non modifiés [.925]
 7 fichiers déphasés de 12 heures [.mod]
 1 fichier déphasé de 36 heures [.mod.tps]
 1 fichier déphasé de 12 heures [.tps]
 11 fichiers passant de TU+1 à TU [.mod2]

↓ Corrections : d'un coefficient multiplicatif
 ×0.5 : pour le mois d'avril 1967
 × 0.75 : 1961 à 1964 –1970-1971- 1976 à 1978

70 fichiers non modifiés [.925]
 7 fichiers déphasés de 12 heures [.mod]
 1 fichier déphasé de 36 heures [.mod.tps]
 1 fichier déphasé de 12 heures [.tps]
 11 fichiers passant de TU+1 à TU [.mod2]
 10 fichiers multipliés par un coefficient [.975]

↓ Corrections : dissociation des fichiers et
 correction en hauteur en fonction de la
 constante « zéro des courbes »

37 fichiers non modifiés [.925]
 10 fichiers multipliés par un coefficient [.975]
 11 fichiers passant de TU+1 à TU [.mod2]
 60 fichiers corrigés en hauteur [.mod3]

↓ Corrections en hauteur pour tenir
 compte du changement du ruban en
 platine

37 fichiers non modifiés [.925]
 10 fichiers multipliés par un coefficient [.975]
 11 fichiers passant de TU+1 à TU [.mod2]
 3 fichiers corrigés en hauteur [.mod3]
 57 fichiers corrigés en hauteur [.mod4]

↓ Corrections : en temps des années
 numérisées par le SHOM : 1937, 1938,
 1939, 1940 . TU+1 → TU

32 fichiers non modifiés [.925]
 10 fichiers multipliés par un coefficient [.975]
 11 fichiers passant de TU+1 à TU [.mod2]
 3 fichiers corrigés en hauteur [.mod3]
 57 fichiers corrigés en hauteur [.mod4]
 5 fichiers passant de TU+1 à TU [.mod5]

4.2 Bilan sur les données

Cette partie permet d'avoir une vue critique et globale sur la qualité des données issues des divers instruments que comprend l'observatoire marégraphique de Marseille. Il est donc indispensable après avoir procédé à diverses modifications et corrections de faire un bilan sur les données finales.

4.2.1 Données des marégrammes

Exploitation de la double numérisation des marégrammes de 1970

L'année 1970 a été numérisée deux fois, il est donc intéressant de faire une comparaison entre ces deux numérisations, ce qui permettrait d'avoir un ordre de grandeur sur les erreurs induites par la numérisation.

La comparaison des moyennes journalières des hauteurs d'eau entre les deux numérisations donne le résultat suivant :

La moyenne $m(d_j)$ des écarts des moyennes journalières d_j sur l'année 1970 est de 0.91 centimètre et la moyenne des mêmes écarts en valeur absolue des différences d_j $m(|d_j|)$ est elle égale à 1.27 cm. Par contre si l'on exclut de ce calcul les différences d_j supérieures à une tolérance de $2.7 \times 1.27 = 3.4$ cm, que l'on peut considérer comme la conséquence d'une faute dans la numérisation, alors cette moyenne annuelle devient de l'ordre de 0.56 centimètre et 0.82 centimètre en valeur absolue. Cette deuxième estimation me semble plus représentative de l'imprécision due à la numérisation. Par contre, la comparaison au niveau mensuel (figure 38) montre que la différence des moyennes mensuelles est souvent du même signe. Cette erreur ne peut donc pas être assimilée à une erreur aléatoire, elle serait plutôt systématique, avec un systématisme de l'ordre de 0.6 centimètre. L'ordre de grandeur de 0.6 centimètre vient de la moyenne annuelle des écarts journaliers de 0.56 qui devrait, être sans systématisme, de 0.

Figure 38 : Moyennes Mensuelles des écarts

Année	Mois	Moyenne Mensuelle numérisation 1 (cm)	Moyenne Mensuelle numérisation 2 (cm)	Moyenne Mensuelle des écarts journaliers	Nombre de jours
1970	1	71.72	72.33	0.61	31
1970	2	53.78	54.89	1.10	23
1970	3	51.63	52.23	0.60	28
1970	4	45.88	46.62	0.74	29
1970	5	48.56	49.05	0.49	30
1970	6	54.02	54.89	0.87	29
1970	7	45.84	45.51	-0.33	28
1970	8	51.14	51.30	0.16	29
1970	9	49.01	49.65	0.64	27
1970	10	48.50	49.54	1.04	30
1970	11	49.67	50.38	0.71	29
1970	12	52.08	52.16	0.08	28

Ainsi, on peut estimer que la numérisation peut induire un systématisme de l'ordre de 0.6 centimètres.

Exploitation de la comparaison entre le Totalisateur et les Marégrammes

Dans le premier Chapitre, concernant la comparaison entre les moyennes mensuelles du totalisateur et les moyennes mensuelles des marégrammes, on s'attendait à avoir une constante de 500 mm qui correspond à la différence entre la référence des marégrammes numérisés et le zéro NGF. L'erreur qui a été faite c'est de considérer que le zéro des marégrammes correspond au zéro NGF, ce qui n'est pas le cas puisque la hauteur du zéro de l'échelle de la crémaillère, qui correspond au zéro des courbes, est déterminée à chaque étalonnage et change à chaque modification de l'instrument.

C'est pourquoi à partir des constantes du « zéro des courbes », j'ai modifié les hauteurs horaires des marégrammes afin d'avoir une référence commune pour l'ensemble des marégrammes qui est 340 mm pour l'altitude du zéro de l'échelle de la crémaillère. Etant donné que la référence commune sur les marégrammes c'est les picots qui se trouve à 25 mm en dessous du trait 1m,50, on peut en déduire que la constante entre les données Totalisateur et les marégrammes est de $750 - 340 = 410$ mm, ce qui correspond bien à la valeur de la figure 22 (page 36).

Ainsi, on peut faire une étude des écarts entre les moyennes mensuelles de la comparaison et cette constante théorique de 410 mm.

Soit y_i la valeur d'un écart « Marégramme-Totalisateur » mensuel. La valeur moyenne des écarts « Marégrammes – Totalisateur » donne 416.9 mm, avec un écart type de 16.1 mm.

$$m(y_i) = \frac{\sum_i y_i}{N} = 416.9 \text{ mm} \text{ et } \sigma(y_i) = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - m(y_i))^2}{N - 1}} = 16.1 \text{ mm}$$

Afin d'avoir un ordre de grandeur sur la précision des écarts y_i , on va introduire une tolérance T de $2.7 \times \sigma(y_i)$ qui correspond à une probabilité de non dépassement de 0.993. Ainsi T = 43.5 mm. Ce qui implique la suppression de 24 valeurs y_i sur 1098. On obtient ainsi :

$$m(y_i) = 416.6 \text{ mm} \text{ et } \sigma(y_i) = 12.2 \text{ mm} .$$

Par rapport, à la valeur théorique de 410 mm, on obtient comme valeur moyenne 416.6 mm, ce qui laisse supposer qu'il y a une erreur systématique résultante de l'ordre de 7 mm. Ce systématisme doit avoir pour origine la numérisation d'après le constat fait au paragraphe précédent. Mais il doit également être la résultante de beaucoup d'autres phénomènes notamment mécaniques. Il ne peut s'agir uniquement des systèmes mécaniques du totalisateur et du système de traçage puisque les deux systèmes sont dépendants du même déplacement de la crémaillère, ainsi les défauts mécaniques des fils, du système d'engrenage ne peuvent pas être compris dans cette étude comparative, ils concernent plus l'exploitation des expériences d'étalonnage.

L'ordre de grandeur à retenir pour cette partie est l'estimation de la précision des valeurs des hauteurs horaires des marégrammes de 12 millimètres par rapport au totalisateur. Tout en ayant conscience que les mesures de ces deux instruments sont entachées d'autres sources d'erreurs citées au paragraphe précédent. D'ailleurs, pour l'année 1951 la hauteur moyenne annuelle de la mer est anormalement haute et l'on retrouve cette anomalie à la fois sur les données du totalisateur et les données issues des marégrammes (Cf. Annexe A : A.III). Or cette anomalie est en corrélation avec des problèmes au du fils du flotteur (rupture en novembre 1950 et en août 1951). Ainsi, le défaut de calage de l'appareil n'apparaît pas à travers cette comparaison.

Exploitation de la comparaison entre des hauteurs horaires prédites et les hauteurs horaires des marégrammes

Il est ressorti des diverses exploitations que j'ai menées, que la comparaison entre des prédictions et des observations pour l'étude qualitative des performances d'un marégraphe situé dans une mer avec une marée de faible amplitude, comme c'est le cas à Marseille, a son utilité uniquement pour l'étude de la référence temporelle des données. En effet, l'amplitude des bruits, c'est à dire les variations de la hauteur d'eau ayant comme origine un autre phénomène que la marée, est trop importante à Marseille pour pouvoir être utile à cette étude. Par contre, cela peut servir pour l'étude de ces bruits. En plus des problèmes de bruit, il est important de noter que la hauteur moyenne de la mer a augmenté d'une dizaine de centimètres

Par contre, l'étude du déphasage temporel entre les observations et les prédictions donne des résultats satisfaisants, sans toutefois atteindre la précision souhaitée étant donné le nombre de mesures mensuelles, en ce qui concerne l'étude de déphasage par autocorrélation. La précision a été estimée à 7 minutes.

Ainsi, la figure 17 (page 33) montre une dérive temporelle importante à partir de 1960, cette période correspond exactement à l'arrêt des observations sur la dérive de l'horloge en 1964, ce n'est peut-être qu'une coïncidence. Ces décalages temporels peuvent également avoir comme origine une modification extérieure au marégraphe comme la modification de l'ouverture de la vanne du puits de tranquillisation où se trouve le flotteur. Il faut remarquer que ces décalages sont relativement importants, jusqu'à une heure. Les décalages temporels des années 1937 à 1940 sont également mystérieux et aucune explication n'a été trouvée au niveau de la numérisation.

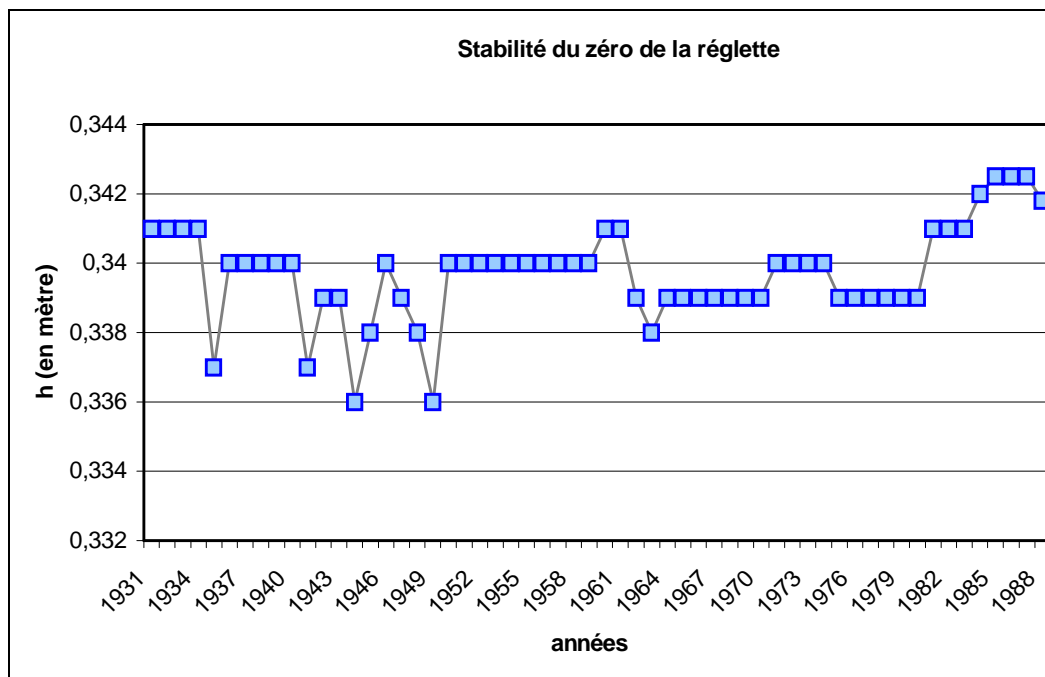
Par contre, on constate entre 1885 et 1960 une légère pente de l'ordre de -30 secondes par an. Cette pente peut être attribuée à une dérive de l'horloge.

4.2.2 Les données totalisateur

L'exploitation des expériences d'étalonnage permet de mettre en avant une estimation sur la précision du fonctionnement du marégraphe à flotteur.

L'expérience de l'étalonnage de 2003 nous montre que la précision des mesures du totalisateur est de l'ordre de 3 mm avec un cycle d'hystérésis de 5 mm (Cf. Annexe F : F.III). La garantie de ce résultat dépend de la régularité des étalonnages et il est intéressant de voir la stabilité dans le temps du zéro de la réglette du marégraphe de Marseille entre 1931 et 1988 (Figure 39).

Ainsi, l'instrument permet de garantir une précision de l'ordre de 3 mm avec une bonne stabilité dans le temps, néanmoins cette précision est garantie à condition de faire un contrôle régulier et un calcul des nouvelles constantes du totalisateur annuellement.

Figure 39 : Stabilité du zéro de la règle entre 1931 et 1988

4.2.3 Les données du MCN

La pente de l'ordre de 30 à 40 millimètres par mètre constatée lors des expériences d'étalonnage ne pouvant pas être corrigée peut engendrer des erreurs importantes sur les mesures. Cela expliquerait peut-être l'écart type de l'ordre de 2.1 centimètres sur les moyennes mensuelles entre les mesures du MCN et les mesures du totalisateur.

Conclusion

Les mesures du MCN ont permis de mettre en évidence une anomalie au niveau des mesures dans le puits. L'origine du décalage temporel de 20 minutes entre les mesures à l'extérieur et à l'intérieur du puits provient certainement d'une modification de la vanne du puits. Une vérification doit absolument être faite. S'il s'avère que cette origine du retard ne soit pas validée, il faudrait procéder à un nettoyage de la galerie, car il a forcément une origine extérieure à la structure de l'observatoire.

Concernant le MCN, il semble nécessaire de mettre en œuvre une étude plus poussée sur ses performances. Il faut remarquer que le SHOM a déjà remplacé sur un certain nombre d'observatoires des MCN par des marégraphes à mesure Radar ou les mesures ne sont pas influencées par la température.

Beaucoup de modifications ont été appliquées aux données issues des marégrammes. Ce qui a permis d'obtenir une cohérence entre les données numérisées et les données du totalisateur. Néanmoins, l'utilisation de ces données doit se faire avec une grande précaution, notamment en ce qui concerne la dérive temporelle des données et tenir compte des estimations sur la précision de ces données.

Le marégraphe à flotteur semble être un appareil fiable et relativement stable, cependant les étalonnages passés montrent que les calages réguliers de la référence instrumentale sont indispensables pour se prémunir d'une dérive.

Le projet SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux du Littoral) a pour but de combiner deux sources de données : marégraphiques et issues de la géodésie spatiale. C'est dans le cadre de ce projet que l'IGN et le SHOM ont mis en place en juillet 1998 un récepteur GPS. Les techniques spatiales de positionnement et l'évolution de leurs performances offrent de nouvelles perspectives, notamment la surveillance dans le temps des déplacements des repères d'un observatoire marégraphique par la détermination de leur déplacement dans un système de référence absolue [WOP 97]. Les données GPS sont actuellement en cours de traitement, il sera donc intéressant de les analyser en détail.

Annexe A : L'observatoire et le marégraphe

A.I : Illustration de l'observatoire et du marégraphe à flotteur

Figure A.1 : Vue en coupe est-ouest de l'observatoire

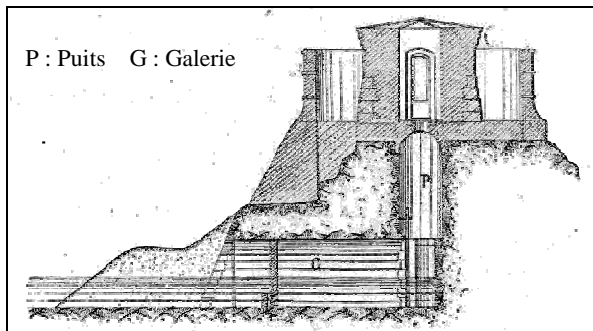


Figure A.2 : Vue en coupe sud-nord de l'observatoire

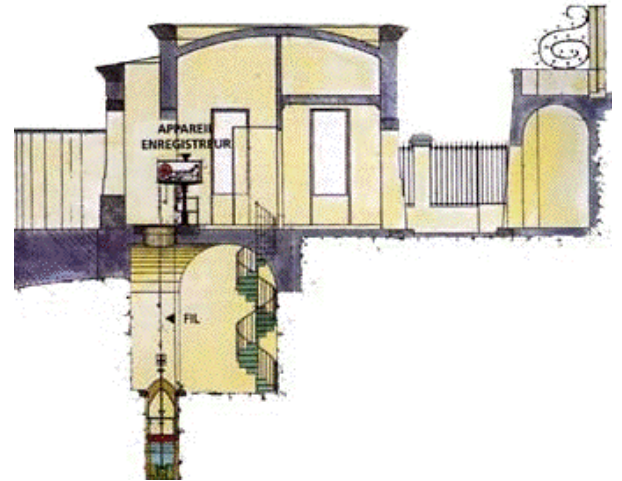


Figure A.3 : Vue extérieure de l'observatoire



Figure A.4 : Vue du marégraphe totalisateur de Marseille (Image numérisée à partir d'une photo des archives de l'IGN) [WOP 97]



Figure A.5 : Vue du marégraphe de Marseille



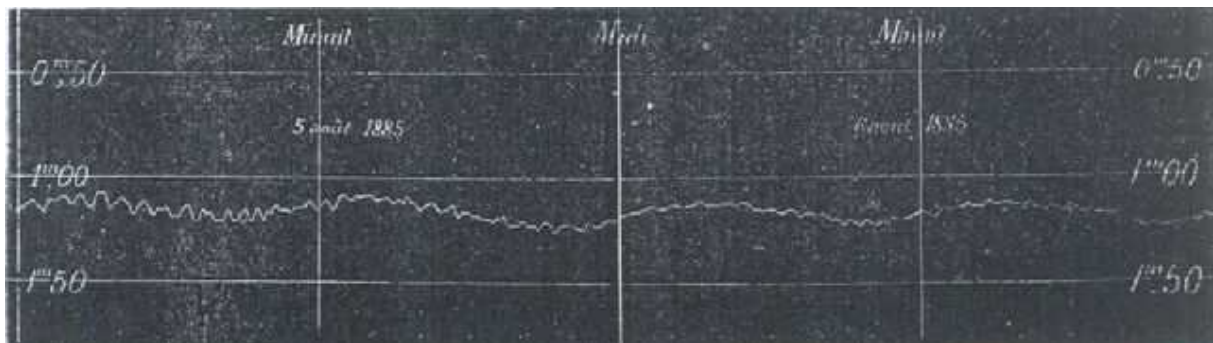
Figure A.6 : Vue du cylindre enregistreur et des styles.



Figure A.7 : Vue du disque totalisateur



Figure A.8 : Extrait du marégramme d'août 1885 (Archives de l'IGN)

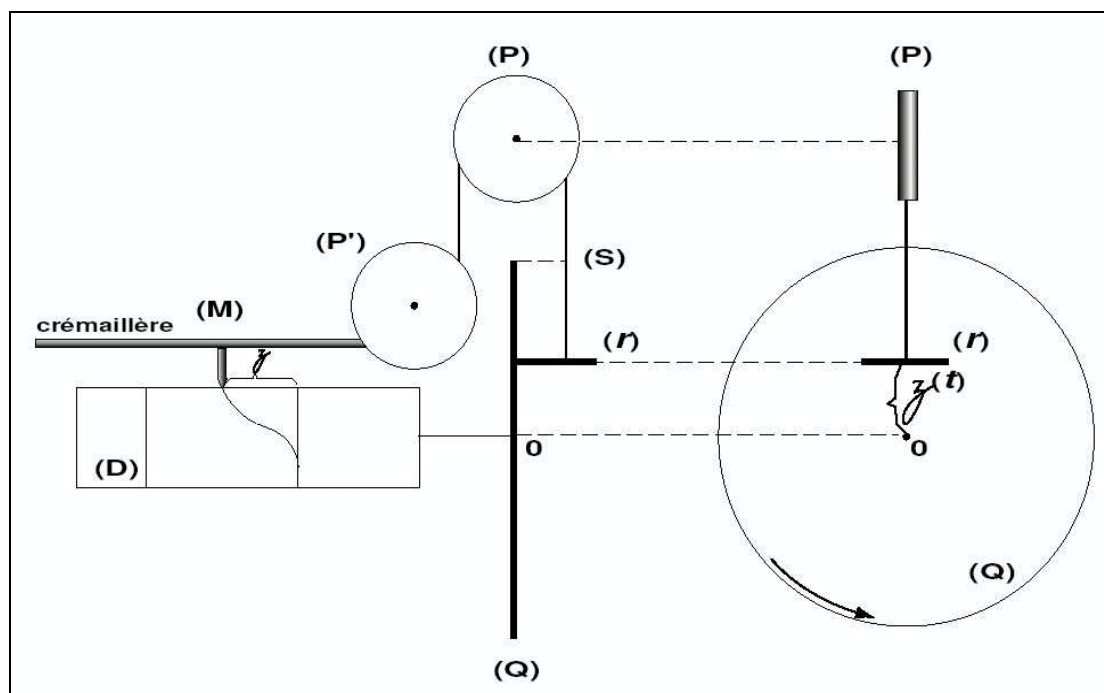


A.II : Totalisateur et niveau moyen de la mer

Cette annexe est extraite de la thèse de WOPPELMANN [WOP 97] et décrit le principe de fonctionnement du planimètre totalisateur.

La théorie du marégraphe totalisateur est expliquée ici à l'aide du croquis de la figure A.9. Un disque circulaire plan (Q) est sur l'axe du cylindre enregistreur (D). Tous deux sont entraînés par le mouvement de rotation commandé par l'horloge. Sur le disque totalisateur (Q) s'appuie une roulette enregistreuse (r) dont l'axe (rS) parallèle au plan du disque (Q) ne peut suivre que des déplacements verticaux. Grâce au système de poulie (PP') ces déplacements, et en particulier ceux du point de contact de la roulette sur le disque, sont égaux à ceux de la crémaillère portant le style (M). Ils traduisent par conséquent les déplacements du plan d'eau au facteur de réduction près.

Figure A.9 : Principe du marégraphe Totalisateur [WOP 97]



La roulette (r) est donc soumise à deux mouvements :

- ✓ Un mouvement de translation le long de l'axe.
- ✓ Un mouvement de rotation imposé par le disque (Q).

Soit $\{K\}$ la vitesse de rotation uniforme du disque (Q), le nombre de tours effectués par ce disque pendant la durée $\{\delta t\}$ est :

$$\delta N = K \times \delta t$$

Soit par ailleurs $\{z\}$ la distance du centre du disque (Q) au point de contact de la roulette (r) à l'instant $\{t\}$. En supposant que l'entraînement de (r) par la rotation de (Q) se fasse sans glissement, l'arc élémentaire que (r) déroule pendant l'intervalle $\{\delta t\}$ est proportionnel à la distance $\{z\}$ du centre du disque et à l'angle de rotation effectué par le disque (Q) pendant $\{\delta t\}$, autrement dit, en exprimant les angles en tour, on obtient la relation :

$$\delta n = k \times z \times \delta N \quad , \text{ soit encore :}$$

$$\frac{\lambda}{2} \times \delta n = z \times \delta N \quad , \text{ avec } \{\delta n\} : \text{ nombre de tours pendant } \{\delta t\} \text{ et } \{\lambda\} : \text{ diamètre de (r)}$$

La constante $\{k\}$ est en effet connue, elle est liée au rayon de la roulette (r).

La grandeur $\{z\}$ étant fonction du temps, nous pouvons établir sa moyenne $\{z_m\}$ pendant une période $[t_0 ; t_1]$:

$$z_m = \frac{1}{t_1 - t_0} \times \int_{t_0}^{t_1} z \cdot dt = \frac{\lambda}{2(t_1 - t_0)} \times \int_{t_0}^{t_1} \frac{\delta n}{\delta N} \cdot \delta t \quad , \text{ avec } \delta N = K \times \delta t :$$

$$z_m = \frac{\lambda}{2K \cdot (t_1 - t_0)} \times \int_{n_0}^{n_1} \delta n = \frac{\lambda}{2K} \cdot \frac{(n_1 - n_0)}{(t_1 - t_0)}$$

Pour des raisons de précision, le chariot (A) porte deux roulettes (r1) et (r2) (figure 2 page 8)

$$\text{Soit pour (r1) :} \quad z'_m = \frac{\lambda}{2K} \cdot \frac{(n'_1 - n'_0)}{(t_1 - t_0)}$$

$$\text{Soit pour (r2) :} \quad z''_m = \frac{\lambda}{2K} \cdot \frac{(n''_1 - n''_0)}{(t_1 - t_0)}$$

Si $\{z\}$ désigne à présent la position du centre de l'ensemble des deux roulettes, on a à tout instant :

$$z = \frac{(z' + z'')}{2} \quad \text{et par conséquent, sa valeur moyenne sur l'intervalle } [t_0 ; t_1] \text{ est :}$$

$$z_m = \frac{\lambda}{2K} \cdot \frac{1}{(t_1 - t_0)} \cdot \frac{(n'_1 - n'_0) + (n''_1 - n''_0)}{2}$$

La position des roulettes symétriques par rapport au centre du disque totalisateur (Q) est définie comme le zéro du totalisateur. Aussi, l'ensemble totalisateur- crémaillère a été réglé pour que le zéro du totalisateur correspond à la division 1000 de la réglette de la crémaillère. En outre, le

zéro de la réglette est situé à une hauteur {h} par rapport à la référence arbitraire du marégraphe, c'est à dire le zéro NGF. Par ailleurs, considérant que :

- ✓ Le rapport de réduction par pignon et crémaillère est de dix.
- ✓ Le disque totalisateur (Q) fait un tour en deux jours (K= 0.5)
- ✓ La valeur du diamètre des roulettes ($\lambda = 0.03924$ mètres)
- ✓ Les indications de la réglette sont des profondeurs de plan d'eau (le zéro du totalisateur est donc situé à : $h-1.000-\eta$, η étant une valeur a priori insignifiante de dérèglement).

Alors nous obtenons le niveau moyen de la mer { f_m } rapporté à la référence du marégraphe, sur un intervalle de temps spécifique { δp } exprimé en jours, par la relation :

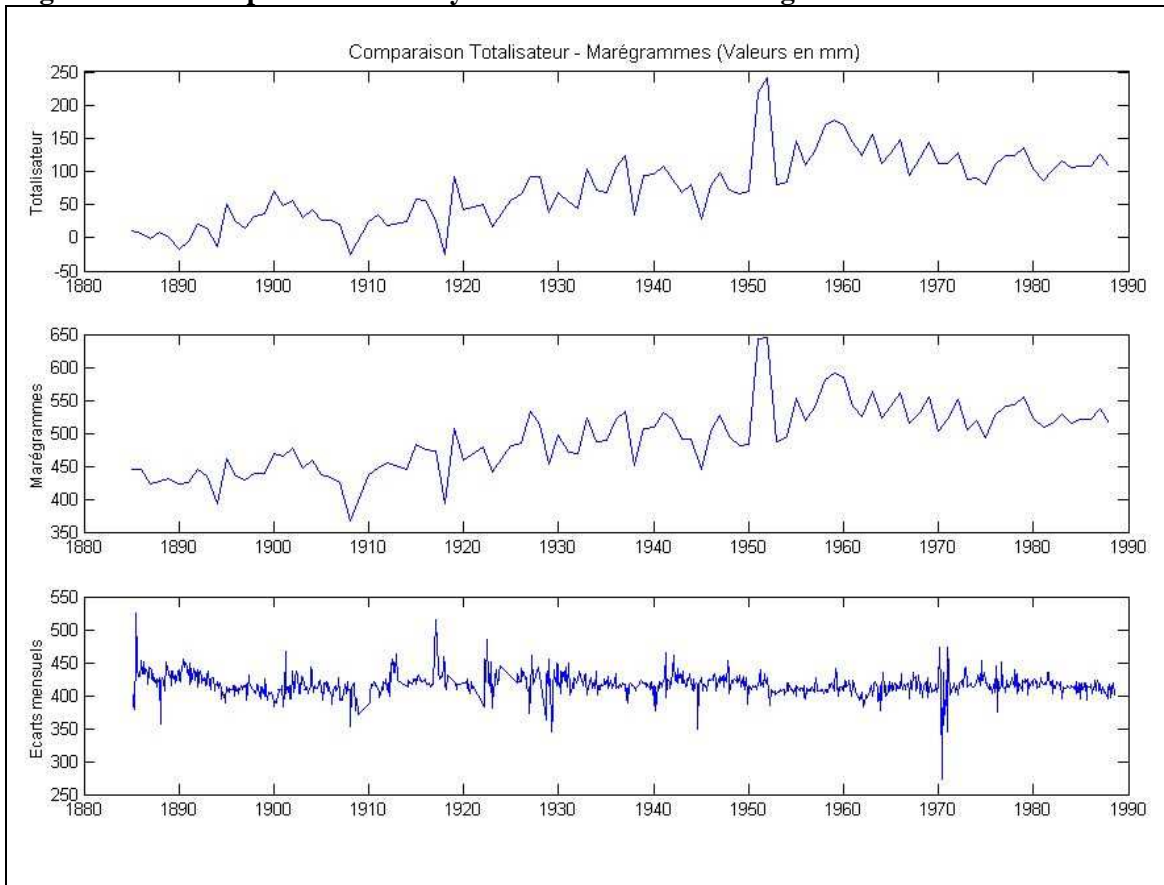
$$f_m = h - (1.000 + \eta) - 0.1962 \times \frac{(\delta n' + \delta n'')}{\delta p} \quad (\text{en mètres})$$

avec

- f_m : niveau moyen de la mer sur l'intervalle de temps δp
- δp : intervalle de temps entre deux relevés des roulettes (en jours)
- $\delta n'$ et $\delta n''$: nombre de tour de roulette sur l'intervalle de temps δp
- h : hauteur du zéro de la réglette au dessus du zéro NGF
- η : le zéro du totalisateur correspond à la graduation $1.000 + \eta$ de la réglette

A.III : Evolution de la hauteur moyenne de la mer Méditerranée depuis 1885

Figure A.10 : Comparaison des moyennes annuelles des marégrammes et du totalisateur



Annexe B : La marée

B.I : Tableau récapitulatif des principales constantes harmoniques [SIM 03]

COMPOSANTES LUNAIRES

Symbole coefficient	Désignation	vitesse angulaire		période	*10 ⁵
		degrés/heure			
Mm	terme constant	0.00000000			50458
	mensuelle	0.54437468		27.55455017 jours	8253
Msf	variationnelle	1.01589576		14.76529408 jours	1367
Mf	bimensuelle	1.09803304		13.66079044 jours	15640
2Q ₁	elliptique 2eme ordre	12.85428623		28.00622177 heures	952
Q ₁	elliptique majeure	13.39866092		26.86835670 heures	7206
ρ_1	évectionnelle	13.47151452		26.72305298 heures	1368
O ₁	lunaire principale	13.94303560		25.81934166 heures	37689
M ₁	elliptique mineure	14.49669396		24.83324814 heures	2961
K ₁	déclinationnelle	15.04106864		23.93446922 heures	36232
J ₁	elliptique secondaire	15.58544332		23.09847641 heures	2959
OO ₁	lunaire 2eme ordre	16.13910168		22.30607414 heures	1615
2N ₂	elliptique 2eme ordre	27.89535487		12.90537453 heures	2300
μ_2	variationnelle	27.96820848		12.87175751 heures	2777
N ₂	elliptique majeure	28.43972956		12.65834808 heures	17391
NU ₂	évectionnelle maj.	28.51258316		12.62600422 heures	3302
M ₂	lunaire moyenne	28.98410424		12.42060089 heures	90812
λ_2	évectionnelle min.	29.45562532		12.22177410 heures	669
L ₂	elliptique mineure	29.52847892		12.19161987 heures	2567
K ₂	déclinationnelle	30.08213728		11.96723461 heures	7852
M ₃		43.47615636		8.28040123 heures	1188

COMPOSANTES SOLAIRES

Symbole coefficient	Désignation	vitesse angulaire		période	*10 ⁵
		degrés/heure			
Sa	terme constant	0.00000000			23411
	annuelle	0.04106864		365.24218966 jours	
Ssa	semi-annuelle	0.08213728		182.62109375 jours	7245
P ₁	solaire principale	14.95893136		24.06588936 heures	16817
S ₁	radiationnelle	15.00000000		24.00000000 heures	
K ₁	déclinationnelle	15.04106864		23.93446922 heures	16124
T ₂	elliptique majeure	29.95893332		12.01644897 heures	2472
S ₂	solaire moyenne	30.00000000		12.00000000 heures	42286
R ₂	elliptique mineure	30.04106668		11.98359585 heures	437
K ₂	déclinationnelle	30.08213728		11.96723461 heures	3643

B.II : La loi des douzièmes [GUE 01]

Les horaires de marées donnent les bornes (horaires et altimétriques) entre lesquelles la mer monte et descend. Mais ils ne donnent pas de renseignements sur la façon dont la mer monte ou descend entre ces bornes. Le mouvement de la mer n'est pas régulier. En fait la courbe de montée (ou de baissée) n'est pas une droite mais une sinusoïde.

Il est possible de calculer de manière simple et avec une bonne approximation, d'heure en heure le niveau atteint par la mer, c'est la « loi des douzièmes ». On considère par simplification que la mer monte ou descend en 6 heures :

- La 1^{ère} heure, la mer monte (ou descend) de 1/12 de son marnage.
- La 2^{ème} heure, la mer monte (ou descend) de 2/12 de son marnage.
- La 3^{ème} heure, la mer monte (ou descend) de 3/12 de son marnage.
- La 4^{ème} heure, la mer monte (ou descend) de 3/12 de son marnage.
- La 5^{ème} heure, la mer monte (ou descend) de 2/12 de son marnage.
- La 6^{ème} heure, la mer monte (ou descend) de 1/12 de son marnage.

Annexe C : Les fichiers des marégrammes numérisés

C.I : Récapitulatif des problèmes rencontrés dans les fichiers [MIN 01] et des corrections faites.

Le tableau suivant récapitule les différents problèmes, fautes ou erreurs rencontrés lors de la lecture des données. J'ai repris et complété le tableau de l'annexe 5 du rapport d'étude d'Anne MINEAUD [MIN 01].

Erreur sur le numéro du port : 512 au lieu de 524	Années pour lesquelles le numéro associé à l'année est faux	Années ayant des jours doublés	Année pour laquelle certaines lignes ont été mal numérotées
1961 1962 1963 1964 1976	1885 '00' à la place de '85' 1886 '00' à la place de '86' 1894 '84' à la place de '94' 1962 '00' à la place de '62' 1963 '00' à la place de '63'	1886, 1888, 1892, 1893, 1894, 1896, 1897, 1899, 1899, 1905, 1908, 1922, 1929, 1930, 1931, 1932, 1935, 1951, 1958, 1959, 1960, 1961, 1963, 1964, 1965, 1966, 1969, 1972, 1973, 1974, 1978, 1979, 1981, 1982, 1985, 1986, 1987, 1988	1968 : Le début de l'année (du jour 001 au jour 305) semble bien numéroté. La numérotation reprend ensuite à 001 jusqu'à 030 puis elle recommence à 336 jusqu'à 366. La période mal numérotée correspond aux jours 306 à 335.

Ayant repris en détail l'ensemble des corrections des doublons, il est important d'avoir une trace de l'ensemble des modifications apportées aux fichiers :

Années	Jours doublés	Commentaires
1886	97 327, 328 et 329	1ère numérisation fausse car valeur à 0 heure fausse Suppression des 1ers car identiques avec les 2èmes
1888	82	1ère numérisation fausse
1892	Entre 164 et 165 on a les jours 257 et 258 357 et 358	Suppression des jours 257 et 258 car identiques à respectivement à 166 et 167. Suppressions des deux premiers car les doublons sont identiques
1893	Après 193 on a 164 jusqu'à 182 puis ensuite 213	Uniquement erreurs sur les numéros des jours
1894	70,71,72 335	Suppression des deuxièmes doublons car identiques respectivement à 73, 74 et 75. Suppression de la première car la deuxième numérisation correspond aux marégrammes.
1896	97 et 98	Suppression des deux premiers car identiques respectivement aux jours 96 pour 97 et 97 pour 98.
1897	36 et 134	Numérisé en deux fois : les deux lignes sont à chaque fois complémentaires
1899	222	Suppression du premier doublon numérisé
1905	4, 5, 6 et 7	4, 5 et 6 identiques et le 1 ^{er} 7 identique à 4
1908	16 à 32	Suppression des premiers doublons
1922	40	Suppression du 1 ^{er} car égal à 37.
1929	49	Suppression du 1 ^{er} car faux par comparaison aux marégrammes
1930	231 entre 273 et 280 on a 308 à 313 356 entre 264 et 265	Suppression du 1 ^{er} car égal à 230 308=277, 309=278, 310=279, 311=280, 312=281, 313=282 donc suppression de 311, 312 et 313 suppression de 356
1931	128 et 129	Les deux sont similaires, donc suppression du 1er
1932	221 et 222 entre 213 et 214 324	Suppression car identique à 214 pour 221 et à 215 pour 222. Le premier est égal à 321 donc supprimé
1935	277	Le premier est égal à 274 donc supprimé
1951	60	Les deux lignes sont complémentaires
1958	147	Le premier est égal à 146 donc supprimé
1959	32	Le 1er est faux par comparaison aux marégrammes
1960	60 131	Numérisé deux fois donc suppression du 1 ^{er} Le premier est égal à 128 donc supprimé
1961	152 352	Le 1 ^{er} est faux, car valeurs aberrantes Le premier est égal à 351 donc supprimé
1963	139,140 et 141 et il manque 142 à 146 253	Problème de numérotation Deux fois numérisé donc suppression du 1er
1964	25 et 26 122	Les 1ers sont faux par comparaison aux marégrammes Le 2ème est faux par comparaison aux marégrammes
1965	106 deux fois et manque 105	Suppression du 1 ^{er} 106 égal à 103
1966	284 et 285	Les 1ers sont faux par comparaison aux marégrammes
1969	24 jour 366 (pas doublons)	Lignes similaires : suppression du 1 ^{er} A supprimer et mettre comme jour 001 dans 1970
1972	226 90, 91, 92 et 224	Le 1 ^{er} est faux, car valeurs aberrantes Lignes similaires : suppressions des 1ers
1973	230, 231	Les 1ers sont faux par comparaison aux marégrammes

1974	91	Le 1er est faux par comparaison aux marégrammes
1978	47	Suppression du 1 ^{er} 47 égal à 44
1979	361	Suppression du 1 ^{er} car explicitement recommencé
1981	341, 342 et 343	Lignes similaires : suppressions des 1ers
1982	341 à 352	341 à 349 identiques mais 350, 351 et 352 égaux respectivement à 347, 348 et 349 : suppression des 1ers
1985	104 à 118	104 à 115 identiques mais 116, 117 et 118 égaux respectivement à 113, 114 et 115 : suppression des 1ers
1986	Après 212 on a 244 jusqu'à 273 puis on repasse à 213 jusqu'à 243 pour repartir ensuite à 274	Problème d'ordre entre les lignes
1987	353 et 354	Suppression des 1ers car égaux à 350 et 351
1988	117 à 121	Les 1 ^{ers} sont faux, car valeurs aberrantes

C.II : Identification des périodes dans les fichiers afin de les dissocier et d'apporter les corrections en hauteur.

Période	Nom du fichier	1 ^{ère} Correction (cm)	2 ^{ème} Correction (cm)
2 au 28 février	1885_1	11	-12
1 ^{er} mars au 31 juillet	1885_2	8	-12
1 ^{er} août au 31 décembre	1885_3	-2	-12
1 ^{er} janvier au 16 janvier	1886_1	-2	-12
17 janvier au 12 mai	1886_2	0	-12
13 mai au 31 décembre	1886_3	-1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1887	-1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1888	-1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1889	-2	-12
1 ^{er} janvier au 11 février	1890_1	-2	-12
12 février au 18 avril	1890_2	-3	-12
19 avril au 31 décembre	1890_3	-2	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1891	-2	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1892	-2	-12
1 ^{er} janvier au 11 août	1893_1	-2	-12
12 août au 31 décembre	1893_2	0	-12
1 ^{er} janvier au 29 avril	1894_1	0	-12
30 avril au 31 décembre	1894_2	5	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1895	5	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1896	5	-12
1 ^{er} janvier au 1 ^{er} avril	1897_1	5	-12
2 avril au 31 décembre	1897_2	2	-12
1 ^{er} janvier au 31 mars	1898_1	4	-12
1 ^{er} avril au 27 juillet	1898_2	1	-12
28 juillet au 15 décembre	1898_3	1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1899	1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1900	1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1901	1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1902	1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1903	1	-12

1 ^{er} janvier au 31 décembre	1904	1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1905	1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1906	1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1907	1	-12
1 ^{er} janvier au 13 juin	1908_1	1	-12
14 juin au 31 décembre	1908_2	6	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1910	-6	-25 + (-12)
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1911	-6	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1912	-6	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1914	-6	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1915	-6	-12
1 ^{er} janvier au 29 janvier	1916_1	-6	-12
24 février au 13 décembre	1916_2	-1	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1917	-7	-12
1 ^{er} janvier au 5 mars	1918_1	-7	-12
6 mars au 31 décembre	1918_2	-20	-12
1 ^{er} janvier au 2 mai	1919	-20	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1920	20	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1922	20	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1923	20	-12
1 ^{er} janvier au 21 décembre	1925_1	12	-12
22 décembre au 31 décembre	1925_2	-13	-12
1 ^{er} janvier au 7 juin	1926_1	-13	-12
8 juin au 27 octobre	1926_2	-53	-12
28 octobre au 31 décembre	1926_3	-27	-12
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1927	-27	-12
1 ^{er} janvier au 13 mars	1928_1	-27	29 + (-12)
1 ^{er} août au 31 décembre	1928_2	1	0
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1929	1	0
1 ^{er} janvier au 31 décembre	1930	1	0

Annexe D : Liste des opérateurs de la numérisation et information sur les références de marégrammes

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des informations concernant les décalages de référence temporelle et en hauteur consécutifs de la numérisation. Il est également noté les différents opérateurs ayant participé à la numérisation. Il y en a eu trois pour l'IGN (A, B et C) et un pour le SHOM.

Années	Exploitant	Référence		Observations
		Picots	1,50 m	
1885	A			décalage de 24 h
1886	A			
1887	A			
1888	A			
1889	A			
1890	A			
1891	A			
1892	A			
1893	A			
1894	A			
1895	A			
1896	A			
1897	B			
1898	B			décalage 12 h
1899	B			décalage 12 h
1900	B			décalage 12 h + deca de 24 h du 1er mars au 31 c
1901	A			
1902	A			
1903	A			
1904	A			
1905	A			
1906	A			
1907	A			
1908	A			
1909	A			

1910	A			décalage 12 h
1911	B			décalage 12h
1912	B			décalage 12 h
1913	B			décalage 12 h
1914	B			décalage 12 h
1915	B			décalage 12 h
1916	B			
1917	B			
1918	B			
1919	B			
1920	B			
1921				
1922	A			
1923	A			
1924	A			
1925	A			
1926	A			
1927	A			
1928	A			
1929	A			
1930	A			
1931	A			
1932	A			
1933	A			
1934	A			
1935	A			
1936	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1937	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1938	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1939	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1940	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1941	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1942	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1943	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1944	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1945	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1946	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1947	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1948	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1949	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1950	SHOM			Référence temporelle TU + 1
1951	C			
1952	B			
1953	B			
1954	B			
1955	B			
1956	B			
1957	B			

1957	B			
1958	B			
1959	B			
1960	B			
1961	A			problème d'un facteur 0,75
1962	A			problème d'un facteur 0,75
1963	A			problème d'un facteur 0,75
1964	A			problème d'un facteur 0,75
1965	A			
1966	A			
1967	A			fin Mars et Avril : problème d'un facteur 0,5
1968	A			
1969	A			
1970	A			
1971	A			problème d'un facteur 0,75
1972	C			
1973	C			
1974	C			
1975	A			
1976	A			problème d'un facteur 0,75
1977	A			problème d'un facteur 0,75
1978	A			problème d'un facteur 0,75
1979	C			
1980	C			
1981	C			
1982	C			
1983	C			
1984	A			
1985	C			
1986	C			
1987	A			
1988	A			

Annexe E : Exemples des fichiers de sortie des programmes d'analyse des fichiers numérisés.

E.I : Exemple de fichier de sortie du programme de détection des lacunes et des doublons

Exemple du fichier de l'année 1886 :

problème jour Numéro 197
entre le jour 197
et le jour 279
Nombres lacunes = 81
Nombres doublons = 0

problème jour Numéro 354
entre le jour 354
et le jour 353
Nombres lacunes = 0
Nombres doublons = 2

BILAN FINAL sur les données du fichier : 1987

Nombre de ligne = 286
Jour DEDUT = 1
Jour FIN = 365
Nombres lacunes = 81
Nombres doublons = 2

#####

E.II : Exemple de fichier de sortie du programme de détermination du type d'erreur ayant créé des doublons.

Exemple du fichier résultat de l'année 1886

Problème jour N= 354

Pour le jour référence 353(2) on a :
Moyenne (référence) = 37.4166679 (en cm)

Pour le jour comparé 354(1) :
Moyenne = 37.5416679 (en cm) et Sigma = 4.80017376

Pour le jour comparé 353(1) :
Moyenne = 43.8333321 (en cm) et Sigma = 8.88350487

Pour le jour comparé 352(1) :

Moyenne = 38.4166679 (en cm) et Sigma = 4.19324875

Pour le jour comparé 351(1) :

Moyenne = 38.5 (en cm) et Sigma = 4.80451155

Pour le jour référence 354(2) on a :

Moyenne (référence) = 31.583334 (en cm)

Pour le jour comparé 354(1) :

Moyenne = 37.5416679 (en cm) et Sigma = 8.84825802

Pour le jour comparé 353(1) :

Moyenne = 43.8333321 (en cm) et Sigma = 14.3788042

Pour le jour comparé 352(1) :

Moyenne = 38.4166679 (en cm) et Sigma = 8.1137743

Pour le jour comparé 351(1) :

Moyenne = 38.5 (en cm) et Sigma = 9.52190495

Pour le jour référence 354(1) on a :

Moyenne (référence) = 37.5416679 (en cm)

Pour le jour comparé 353 :

Moyenne = 43.8333321 (en cm) et Sigma = 6.76079369

Pour le jour comparé 352 :

Moyenne = 38.4166679 (en cm) et Sigma = 3.51781178

Pour le jour comparé 351 :

Moyenne = 38.5 (en cm) et Sigma = 1.27475488

Pour le jour comparé 350 :

Moyenne = 45.0416679 (en cm) et Sigma = 7.86341763

Pour le jour référence 353(1) on a :

Moyenne (référence) = 43.8333321 (en cm)

Pour le jour comparé 352 :

Moyenne = 38.4166679 (en cm) et Sigma = 7.15308809

Pour le jour comparé 351 :

Moyenne = 38.5 (en cm) et Sigma = 5.8665719

Pour le jour comparé 350 :

Moyenne = 45.0416679 (en cm) et Sigma = 1.39940464

Pour le jour comparé 349 :

Moyenne = 46.625 (en cm) et Sigma = 4.23772717

E.III : Exemple du fichier de sortie du programme faisant un bilan des sauts subit par une grandeur.

Extrait du fichier de sortie du fichier 'Bilan des Sauts', créé par le programme :

Saut Numéro 11

Date Avant : année= 1935 mois = 12 Date Après : année= 1936 mois = 1
Valeur Avant : 183 mm Valeur Après : 412 mm

Saut Numéro 12

Date Avant : année= 1950 mois = 12 Date Après : année= 1951 mois = 1
Valeur Avant : 418 mm Valeur Après : 173 mm

Saut Numéro 13

Date Avant : année= 1951 mois = 12 Date Après : année= 1952 mois = 1
Valeur Avant : 174 mm Valeur Après : 408 mm

E.IV : Extrait du fichier de sortie du programme MAS

comparaison sur 299 jours année 1933 prédict-observé

hauteurs: écart moyen 2.0 cm écart type 2.1 cm
 temps: écart moyen 14.5 mn écart type 23.7 mn

port no 524

date	écart type(cm)	écart maxi(cm)	écart moyen(cm)	décalage horaire(mn)	écart d'amplitude
1/1934	1.1	-3.	0.1	-2.2	0.4
2/1934	1.1	3.	6.6	-3.9	0.7
3/1934	1.8	-4.	6.7	12.3	0.2
4/1934	2.4	-6.	5.7	28.9	0.9
5/1934	1.1	-2.	7.6	10.0	1.0
6/1934	0.9	-2.	11.9	16.4	0.4
7/1934	1.0	-3.	16.9	3.5	0.6
8/1934	0.7	-1.	16.9	-4.4	0.7
9/1934	0.8	-2.	17.2	7.5	0.4
10/1934	1.9	3.	19.8	-0.5	0.5
11/1934	2.2	-3.	15.1	-20.0	-0.7
12/1934	2.4	-5.	-1.0	-17.8	1.6
13/1934	4.8	8.	10.3	26.3	0.2
14/1934	3.2	-6.	10.8	2.9	0.2
15/1934	1.7	-3.	0.7	11.8	-0.7
16/1934	4.8	10.	7.3	-18.5	0.5
17/1934	2.0	-5.	23.1	-1.7	1.2
18/1934	1.6	3.	17.9	0.1	0.5
19/1934	3.3	-9.	10.1	5.9	1.9
20/1934	2.8	5.	2.9	2.6	0.9
21/1934	1.4	-3.	14.4	26.6	-0.3
22/1934	1.9	-5.	18.9	12.5	0.1
23/1934	0.9	2.	14.0	-6.4	0.0
24/1934	1.5	-3.	17.1	-9.8	0.0
25/1934	1.0	2.	19.2	-6.0	0.4
26/1934	1.6	4.	24.3	5.6	0.3
27/1934	3.1	7.	23.7	-4.3	1.1
28/1934	2.3	4.	28.6	18.7	0.7
29/1934	1.9	-5.	22.7	7.4	1.6
30/1934	1.0	2.	17.1	9.4	0.2
31/1934	1.6	-4.	19.1	-9.1	0.0

Les données colonne par colonne sont les suivantes :

- date (jour/année)
- écart type journalier entre hauteurs horaire recalées en temps et hauteurs prédites.
- écarts maxi (toujours après recalage en temps et en hauteur)
- écart moyen journalier.
- décalage horaire calculé d'après le déphasage journalier entre les composantes semi-diurnes prédites et observées.
- écarts d'amplitude des composantes semi-diurnes

Annexe F : Constantes de l'instrument

F.I : Constantes annuelles du Totalisateur

Ce tableau regroupe les valeurs annuelles de h (E.I.2 page 9) entre 1885 et 2003.

Année	h	Année	h	Année	h
1885	0,26	1931	0,341	1976	0,339
1886	0,122	1932	0,341	1977	0,339
1887	0,155	1933	0,341	1978	0,339
1888	0,155	1934	0,341	1979	0,339
1889	0,155	1935	0,337	1980	0,339
1890	0,155	1936	0,34	1981	0,341
1891	0,155	1937	0,34	1982	0,341
1892	0,301	1938	0,34	1983	0,341
1893	0,3	1939	0,34	1984	0,342
1894	0,3	1940	0,34	1985	0,3425
1895	0,3	1941	0,337	1986	0,3425
1896	0,299	1942	0,339	1987	0,3425
1897	0,365	1943	0,339	1988	0,3418
1898	0,364	1944	0,336	1989	0,3418
1899	0,364	1945	0,338	1990	0,3418
1900	0,364	1946	0,34	1991	0,3418
1901	0,363	1947	0,339	1992	0,3418
1902	0,363	1948	0,338	1993	0,353
1903	0,362	1949	0,336	1994	0,353
1904	0,362	1950	0,34	1995	0,358
1905	0,362	1951	0,34	1996	0,358
1906	0,361	1952	0,34	1997	0,356
1907	0,361	1953	0,34	1998	0,356
1908	0,361	1954	0,34	1999	0,5619
1909	0,36	1955	0,34	2000	0,2743
1910	0,36	1956	0,34	2001	0,2755
1911	0,36	1957	0,34	2002	0,2776
1912	0,36	1958	0,34	2003	0,2763
1913	0,36	1959	0,34		
1914	0,36	1960	0,341		
1915	0,36	1961	0,341		
1916	0,36	1962	0,339		
1917	0,36	1963	0,338		
1919	0,36	1964	0,339		
1920	0,36	1965	0,339		
1921	0,36	1966	0,339		
1922	0,36	1967	0,339		
1923	0,36	1968	0,339		
1924	0,36	1969	0,339		
1925	0,36	1970	0,339		
1926	0,36	1971	0,34		
1927	0,36	1972	0,34		
1928	0,36	1973	0,34		
1929	0,36	1974	0,34		
1930	0,36	1975	0,339		

F.II : Evolution du zéro des courbes

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des données disponibles dans les cahiers d'observations. On retrouve des données concernant la profondeur des courbes uniquement jusqu'en avril 1932.

Il faut également noter que le calcul de la hauteur du zéro de la crémaillère a changé en avril 1933. Avant cette date elle était calculée à partir de la différence entre la mesure de la profondeur de la virole du flotteur au-dessus du repère A et la lecture sur l'échelle. Alors qu'à partir d'avril 1933 elle est calculée à partir de la différence entre la mesure faite à la sonde lumineuse et la lecture à l'échelle de la crémaillère.

Année	Mois	Hauteur du zéro de crémaillère		profondeur du zéro des courbes	Commentaire
		Avant avril 1933	Après Avril 1933		
1885	2	1,2582		0,337	
1885	3	1,2582		0,362	
1885	4	1,2582		0,363	
1885	5	1,187		0,371	
1885	6	1,197		0,373	
1885	7	1,196		0,372	
1885	8	1,195		0,471	
1885	9	1,197		0,471	
1885	10	1,193		0,475	
1885	11	1,184		0,475	
1885	12	1,187		0,475	
1886	1	1,213		0,448	Changement du fils du flotteur
1886	2	1,217		0,451	
1886	3	1,222		0,45	
1886	4	1,225		0,45	
1886	5	1,23		0,458	
1886	6	1,235		0,459	
1886	7	1,236		0,458	
1886	8	1,235		0,458	
1886	9	1,235		0,458	
1886	10	1,231		0,458	
1886	11	1,227		0,459	
1886	12	1,223		0,46	
1887	1	1,224		0,46	
1887	2	1,224		0,458	
1887	3	1,226		0,46	
1887	4	1,232		0,46	
1887	5	1,232		0,46	
1887	6	1,122		0,461	
1887	7	1,122		0,461	
1887	8	1,122		0,461	
1887	9	1,122		0,459	
1887	10	1,122		0,46	
1887	11	1,122		0,46	
1887	12	1,122		0,461	
1888	1	1,122		0,458	
1888	2	1,122		0,461	

1888	3	1,122		0,461	
1888	4	1,122		0,46	
1888	5	1,122		0,459	
1888	6	1,122		0,458	
1888	7	1,122		0,46	
1888	8	1,122		0,459	
1888	9	1,122		0,459	
1888	10	1,122		0,461	
1888	11	1,122		0,462	
1888	12	1,122		0,471	Flotteur coulé
1889	1	1,122		0,473	
1889	2	1,122		0,473	
1889	3	1,122		0,473	
1889	4	1,122		0,474	
1889	5	1,122		0,473	
1889	6	1,122		0,474	
1889	7	1,122		0,473	
1889	8	1,122		0,474	
1889	9	1,122		0,474	
1889	10	1,122		0,475	
1889	11	1,122		0,473	
1889	12	1,122		0,473	
1890	1	1,122		0,474	
1890	2	1,122		0,483	Changement du fils du flotteur
1890	3	1,122		0,483	
1890	4	1,122		0,467	Changement du fils du flotteur
1890	5	1,122		0,469	
1890	6	1,122		0,469	
1890	7	1,122		0,469	
1890	8	1,122		0,469	
1890	9	1,122		0,47	
1890	10	1,122		0,47	
1890	11	1,122		0,471	
1890	12	1,122		0,471	
1891	1	1,122		0,471	
1891	2	1,122		0,472	
1891	3	1,122		0,472	
1891	4	1,122		0,472	
1891	5	1,122		0,472	
1891	6	1,122		0,472	
1891	7	1,122		0,472	
1891	8	1,122		0,473	
1891	9	1,122		0,472	
1891	10	1,122		0,472	
1891	11	1,122		0,473	
1891	12	1,122		0,471	
1892	1	1,122		0,472	
1892	2	1,122		0,472	
1892	3	1,122		0,472	
1892	4	1,122		0,472	
1892	5	1,122		0,472	
1892	6	1,122		0,472	

1892	7	1,122		0,472	
1892	8	1,122		0,472	
1892	9	1,122		0,472	
1892	10	1,122		0,472	
1892	11	1,122		0,473	
1892	12	1,122		0,472	
1893	1	1,122		0,472	
1893	2	1,122		0,472	
1893	3	1,122		0,472	
1893	4	1,122		0,473	
1893	5	1,122		0,472	
1893	6	1,122		0,473	
1893	7	1,122		0,473	
1893	8	1,122		0,447	Fils du flotteur cassé
1893	9	1,122		0,45	
1893	10	1,122		0,45	
1893	11	1,122		0,451	Flotteur percé
1893	12	1,122		0,452	
1894	1	1,122		0,452	
1894	2	1,122		0,453	
1894	3	1,122		0,453	
1894	4	1,122		0,396	Fils du flotteur cassé
1894	5	1,122		0,395	
1894	6	1,122		0,395	
1894	7	1,122		0,395	
1894	8	1,122		0,395	
1894	9	1,122		0,394	
1894	10	1,122		0,394	
1894	11	1,122		0,395	
1894	12	1,122		0,395	
1895	1	1,122		0,395	
1895	2	1,122		0,395	
1895	3	1,122		0,395	
1895	4	1,122		0,395	
1895	5	1,122		0,396	
1895	6	1,122		0,396	
1895	7	1,122		0,396	
1895	8	1,122		0,397	
1895	9	1,122		0,398	
1895	10	1,122		0,398	
1895	11	1,122		0,398	
1895	12	1,122		0,398	
1896	1			0,398	
1896	2			0,398	
1896	3			0,398	
1896	4			0,398	
1896	5			0,398	
1896	6			0,399	
1896	7			0,4	
1896	8			0,4	
1896	9			0,399	
1896	10			0,399	

1896	11			0,398	
1896	12			0,398	
1897	1			0,399	
1897	2			0,399	
1897	3			0,399	
1897	4			0,436	Zéro de l' appareil déplacé
1897	5			0,435	
1897	6			0,435	
1897	7			0,435	
1897	8			0,435	
1897	9			0,436	
1897	10			0,435	
1897	11			0,436	
1897	12			0,435	
1898	1			0,431	
1898	2			0,433	
1898	3			0,431	
1898	4			0,42	
1898	5			0,409	
1898	6			0,396	
1898	7			0,431	Réparation du flotteur
1898	8			0,439	
1898	9			0,43	
1898	10			0,437	
1898	11			0,435	
1898	12			0,438	Réparation du flotteur
1899	1			0,44	
1899	2			0,443	
1899	3			0,442	
1899	4			0,443	
1899	5			0,441	
1899	6			0,44	
1899	7			0,439	
1899	8			0,439	
1899	9			0,438	
1899	10			0,439	
1899	11			0,439	
1899	12			0,439	
1900	1			0,439	
1900	2			0,439	
1900	3			0,44	
1900	4			0,439	
1900	5			0,439	
1900	6			0,44	
1900	7			0,439	
1900	8			0,44	
1900	9			0,44	
1900	10			0,439	
1900	11			0,439	
1900	12			0,439	
1901	1			0,439	
1901	2			0,439	

1901	3			0,44	
1901	4			0,44	
1901	5			0,439	
1901	6			0,444	Rupture fils de l'appareil
1901	7			0,439	
1901	8			0,44	
1901	9			0,44	
1901	10			0,443	
1901	11			0,443	
1901	12			0,445	
1902	1			0,44	
1902	2			0,441	
1902	3			0,445	
1902	4			0,445	
1902	5			0,446	
1902	6			0,446	
1902	7			0,446	
1902	8			0,446	
1902	9			0,446	
1902	10			0,445	
1902	12			0,444	
1903	1			0,444	
1903	2			0,444	
1903	3			0,443	
1903	4			0,441	
1903	5			0,441	
1903	6			0,439	
1903	7			0,439	
1903	8			0,44	
1903	9			0,439	
1903	10			0,445	
1903	11			0,445	Rupture du fils du flotteur
1903	12			0,447	
1904	1			0,445	
1904	2			0,446	
1904	3			0,446	
1904	4			0,448	
1904	5			0,447	
1904	6			0,447	
1904	7			0,447	
1904	8			0,447	
1904	11			0,447	
1904	12			0,447	
1905	1			0,447	
1905	3			0,447	
1905	4			0,447	
1905	6			0,444	
1905	8			0,444	
1905	9			0,443	
1905	10			0,443	
1905	11			0,442	
1905	12			0,444	

1906	3			0,444	
1906	11			0,445	
1907	1			0,445	
1907	2			0,445	
1907	3			0,444	
1907	8			0,443	
1908	1			0,442	
1908	2			0,442	
1908	3			0,444	
1908	4			0,444	
1908	5			0,444	
1908	6			0,444	Fils du flotteur cassé
1908	7			0,393	
1908	10			0,393	
1908	11			0,394	
1908	12			0,36	
1909	1			0,835	
1909	2			0,838	
1909	3			0,838	
1909	4			0,838	
1909	5			0,839	
1909	6			0,837	
1909	7			0,836	
1909	8			0,502	
1909	11			0,505	
1909	12			0,507	
1910	2			0,507	
1910	3			0,509	
1910	5			0,509	
1910	7			0,51	
1910	8			0,51	
1910	9			0,509	
1910	10			0,51	
1910	11			0,511	
1910	12			0,511	
1911	2			0,508	
1911	4			0,509	
1911	5			0,51	
1911	6			0,509	
1911	8			0,509	
1911	10			0,51	
1911	11			0,51	
1912	2			0,509	
1912	3			0,509	
1912	4			0,509	
1912	5			0,509	
1912	6			0,509	
1912	7			0,51	
1912	8			0,51	
1912	9			0,51	
1912	10			0,51	
1912	11			0,51	

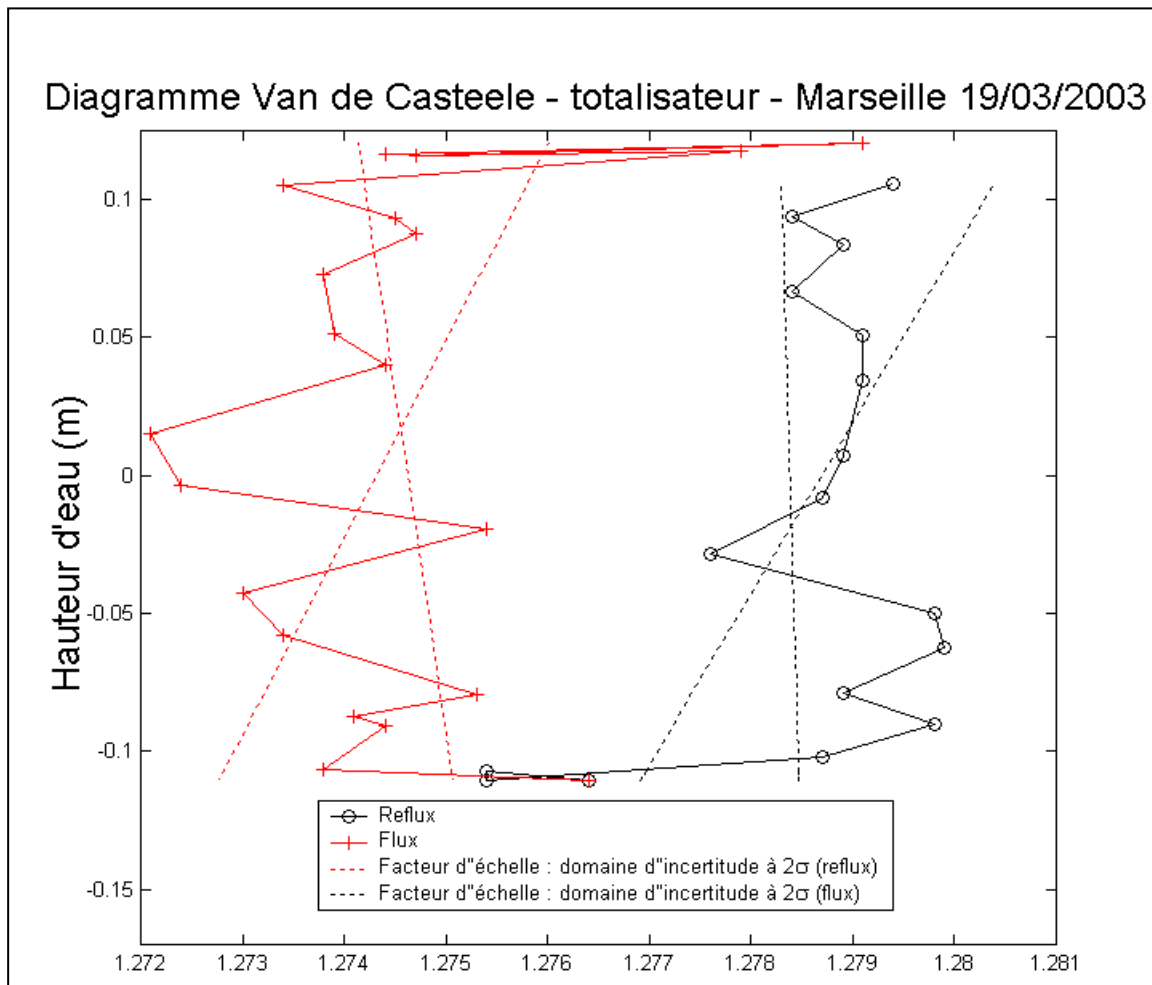
1912	12			0,51	
1913	5			0,511	
1913	8			0,511	
1913	9			0,511	
1914	1			0,511	
1914	10			0,515	
1915	3			0,512	
1916	1			0,515	
1916	2			0,46	Nettoyage de la cuve
1916	3			0,461	
1916	6			0,458	
1916	7			0,461	
1916	10			0,459	
1916	12			0,458	
1917	1			0,518	
1917	5			0,518	
1917	7			0,512	
1917	12			0,518	
1918	2			0,51	
1918	3			0,655	Rupture du fils du flotteur
1919	1			0,647	
1919	5			0,24	Rupture du fils du flotteur
1920	1	0,199		0,244	
1920	10	0,192		0,24	
1921	1	0,194		0,241	
1921	10	0,199		0,25	
1922	10	0,198		0,249	
1923	1	0,196		0,245	
1923	5	0,193		0,242	
1924	7	0,199		0,248	Changement fils du flotteur
1924	10	0,274		0,327	
1925	1	0,274		0,327	
1926	1	0,239		0,582	Changement fils du flotteur
1926	2	0,239		0,582	
1926	3	0,241		0,582	
1926	4	0,244		0,585	
1926	5	0,244		0,585	
1926	6	0,641		0,982	Fils flotteur cassé
1926	7	0,643		0,983	
1926	8	0,642		0,983	
1926	9	0,642		0,983	
1926	10	0,643		0,987	Changement longueur du fils
1926	11	0,376		0,72	
1926	12	0,376		0,72	
1927	1	0,376		0,72	
1927	2	0,377		0,721	
1927	3	0,376		0,72	
1927	4	0,376		0,72	
1927	5	0,376		0,72	
1927	6	0,377		0,721	
1927	7	0,377		0,721	
1927	8	0,378		0,722	

1927	9	0,378		0,722	
1927	10	0,377		0,721	
1927	11	0,378		0,722	
1927	12	0,377		0,721	
1928	2	0,379		0,723	
1928	4	0,377		0,72	
1928	5	0,376		0,722	
1928	6	0,377		0,723	Changement longueur platine
1928	7	0,276		0,443	
1928	8	0,278		0,445	
1928	11	0,277		0,444	
1929	1	0,275		0,442	
1929	3	0,276		0,443	
1929	5	0,276		0,443	
1929	6	0,276		0,443	
1929	10	0,278		0,445	
1930	6	0,28		0,447	
1930	9	0,281		0,448	
1930	10			0,45	
1930	11	0,283			
1931	3	0,282	1,334	0,449	
1931	4	0,27		0,44	
1931	6	0,277			
1931	7	0,278			
1931	10	0,277			
1931	12	0,277			
1932	1	0,277		0,444	
1932	4	0,277		0,448	
1932	10	0,276			
1932	11	0,274			
1933	4		1,341		
1933	5		1,34		
1933	6		1,34		
1933	7		1,34		
1933	9		1,341		
1933	10		1,341		
1933	11		1,341		
1934	2		1,34		
1934	4		1,339		
1934	5		1,34		
1934	7		1,338		
1934	9		1,34		
1934	12		1,341		
1935	3		1,337		
1935	4		1,339		
1935	8		1,339		
1935	10		1,339		
1935	11		1,339		
1935	12		1,339		
1936	3		1,34		
1936	6		1,342		
1936	8		1,341		

1937	2		1,334		
1937	4		1,34		
1937	6		1,342		
1937	9		1,34		
1938	2		1,34		
1938	3		1,34		Rupture du fils du flotteur
1938	5		1,343		
1938	9		1,343		
1939	5		1,34		
1939	7		1,34		
1939	12		1,34		Fils du flotteur cassé
1940	8		1,34		
1940	11		1,343		
1940	12		1,341		
1941	1		1,339		
1941	4		1,34		Fils du flotteur cassé
1941	9		1,34		Rupture du fils du flotteur
1941	10		1,34		
1942	2		1,338		
1942	3		1,338		
1942	6		1,338		
1942	7		1,34		
1943	3		1,335		
1943	4		1,335		
1943	6		1,333		
1943	7		1,336		
1944	5		1,336		
1945	5		1,334		
1945	8		1,34		
1945	11		1,338		
1946	1		1,34		
1946	6		1,337		
1946	7		1,337		
1947	1		1,337		
1947	11		1,339		
1948	2		1,338		
1949	5		1,336		
1949	8		1,339		
1949	11		1,338		
1950	11		1,34		Rupture du fils du flotteur
1951	4		1,34		
1952	3		1,34		Rupture du fils du flotteur
1953	5		1,34		
1954	5		1,34		
1960	1		1,34		
1960	10		1,34		

F.III : Fiche d'étalonnage de 2003

Site : Marseille
 Instrument : Marégraphe Totalisateur
 Date : 19/03/2003
 Etalon : Sonde IGN (sonde 7, ruban 3)
 Nombre de sondages : 37 (toutes les 20')
 Coefficient de marée : ?



Synthèse de l'analyse des données :

Décalage = 1.2763 ± 0.0004 m

Précision de l'instrument* = 0.0025 m

Hystérésis = 0.0041 ± 0.0004 m (à 95%)

Facteur d'échelle :

$P_{flux} = (4.995 \pm 9.034)$ mm/m (à 95%) (RMS = 0.001593)

$Pr_{flux} = (7.621 \pm 8.424)$ mm/m (à 95%) (RMS = 0.001238)

(*évalué à partir de la dispersion des décalages (écart-type)

Annexe G : Programme de calcul des constantes internes du MCN

```

%
%
% _____ cal_calib.m _____
% Auteur : Vincent PHILIPPE          Création: 05/2003
%
%
% Objet: Calcul des coefficients (a,b,c) de la formule d'étalonnage du MCN.
%
% Rappel :  $y = d - (a + b.x + c.x^2)$  par défaut (  $a = 0$ ,  $b = 1$  et  $c = 0$ )
%          on pose  $fi' = fi + 33$  cm pour se ramener au zéro hydrographique.
%          on pose  $xi = d - mcn_i$  ( $mcn_i = y_i$ )
%
%          ainsi       $fi' = a' + b'.xi + c'.xi^2$ 
%
%                   |  $a' = d - a$ 
%          avec      |  $b' = - b$ 
%                   |  $c' = - c$ 
%
% _____
%
% Fonctions appelées:
%   - nettoyage.m
%
% Observations en mètres dans deux fichiers (extension .dat):
%
%           - un fichier de hauteurs d'eau mesurées par l'étalon (en m).
%           - un fichier d'écart entre l'étalon et le MCN (en m).
%
% _____
%
% Initialisation de la memoire interne

close all
clear all

% Valeurs Initiales

fprintf('Valeurs Initiales \n');
fprintf('\n');
fprintf('Par défaut a = 0, b = 1 et c = 0 \n');
fprintf('\n');
fprintf('Entrez la valeur de d en cm \n');
val_d_i = input('d (286) = ? ','s');
coef_abcd_i(4) = str2num(val_d_i);
coef_abcd_i(1) = 0;
coef_abcd_i(2) = 1;
coef_abcd_i(3) = 0;

```

```

% Lecture des fichiers de données

fic_etalon = input('Nom du fichier des valeurs étalon (sans .dat) ? ','s');
fic_etalon = [fic_etalon, '.dat'];
if exist(fic_etalon, 'file')
    Ho = fopen(fic_etalon, 'r');
    dataH = fscanf(Ho, '%f', [1 inf]);
    databrutH = [dataH'];
else
    fprintf('Fichier introuvable (Verifier le nom, le chemin...) \n');
    break
end

fic_ecart = input('Nom du fichier des écarts avec étalon (sans .dat) ? ','s');
fic_ecart = [fic_ecart, '.dat'];
if exist(fic_ecart, 'file')
    Xo = fopen(fic_ecart, 'r');
    dataX = fscanf(Xo, '%f', [1 inf]);
    databrutX = [dataX'];
else
    fprintf('Fichier introuvable (Verifier le nom, le chemin...) \n');
    break
end

%-----
% Nettoyage des mesures aberrantes. Fonction "nettoyage"
reponse = input('Nettoyage global des mesures ? (O/N) ','s');
if (reponse == 'N') | (reponse == 'n')
    disp('Pas de nettoyage !!!');
    disp(' ');
    datanetH = databrutH;
    datanetX = databrutX;
else
    [datanetH, datanetX] = nettoyage(databrutH, databrutX);
    disp(' ');
end

%-----

[M_datanetX, N_datanetX] = size(datanetX);

for i=1:M_datanetX

    datanetH(i,1) = datanetH(i,1) + 33.0 ; % les donnees sont en cm
    datanetX(i,1) = coef_abcd_i(4) - datanetX(i,1);
end

% Matrice A et L

for i=1:M_datanetX

    Mat_A(i,1) = 1;
    Mat_A(i,2) = datanetX(i,1);
    Mat_A(i,3) = datanetX(i,1)*datanetX(i,1);

```

```

    Mat_L(i,1) = datanetH(i,1);

end

Mat_N = Mat_A'*Mat_A;
Mat_K = Mat_A'*Mat_L;

Mat_X = inv (Mat_N) * Mat_K;

Mat_V = Mat_A* Mat_X - Mat_L;
Mat_Lb = Mat_A*Mat_X;
R_cor_n =Mat_Lb'*Mat_Lb;
R_cor_d =Mat_L'*Mat_L;
R_cor_2 = R_cor_n(1,1)/R_cor_d(1,1);
Sigma_0 = sqrt( (Mat_V' * Mat_V)./(M_datanetX-3) );
R_cor = sqrt(R_cor_2);
Mat_qxx= inv(Mat_N);
coef_abcd_f(1,1) = coef_abcd_i(4) - Mat_X(1,1);
coef_abcd_f(2,1) = - Mat_X(2,1);
coef_abcd_f(3,1) = - Mat_X(3,1);
coef_abcd_f(4,1) = coef_abcd_i(4);
sig_a = Sigma_0*sqrt(Mat_qxx(1,1));
sig_b = Sigma_0*sqrt(Mat_qxx(2,2));
cov_ab = Mat_N(1,2)/(sig_a*sig_b);

fprintf('*** BILAN FINAL ***\n')
fprintf('\n')
fprintf('  a = %f +/- %f (cm)\n',coef_abcd_f(1,1),Sigma_0*sqrt(Mat_qxx(1,1)))
fprintf('\n')
fprintf('  b = %f +/- %f\n',coef_abcd_f(2,1),Sigma_0*sqrt(Mat_qxx(2,2)))
fprintf('\n')
fprintf('  c = %f +/- %f (cm^(-1))\n',coef_abcd_f(3,1),Sigma_0*sqrt(Mat_qxx(3,3)))
fprintf('\n')
fprintf(' cov(a,b) = %f',cov_ab)

```

Annexe H: Résultats de l'exploitation des nivellements

H.I : Résultats du calcul des altitudes des repères de l'observatoire

	1885	1946	1959	1968	1974	1993	1996	1997	1999	2000	2001	2002	2003
M.abc	11,3974		11,4487		11,4497	11,4493	11,4503		11,4497		11,4498	11,4516	11,4498
M.ac-O-I	11,5514	11,5520	11,5533	11,5539	11,5549	11,5554	11,556	11,5552	11,556		11,5558	11,5578	11,5562
M.ac-O-II	6,7484	6,7385	6,7373	6,7363	6,7372	6,7361	6,7374						
M.ac-O-IIbis									6,7409		6,7406	6,7421	6,7408
M.ac-O-III	6,8254	6,8230	6,8230	6,8219	6,8229	6,8224	6,8236		6,8232		6,8235	6,8242	6,8236
M.ac-O-IV	1,7793		1,7795		1,7798	1,7797	1,7796		1,77963	1,7798	1,7799	1,7797	1,7797
M.ac-O-V	1,7865		1,7863		1,7867	1,7863	1,7864		1,7863	1,7865	1,78668	1,7864	1,7865
M.ac-O-VI			1,7865		1,7868	1,7865	1,7865		1,7865	1,7868	1,78678	1,7867	1,7865
M.ac-O-VII			1,7863	1,7857	1,7866	1,7861	1,7863		1,7865	1,7866	1,7867	1,7865	1,7865
M.ac-O-IX									4,1088		4,1086	4,11	4,1088
M.ac-O-XI									0,6149		0,615	0,6164	0,6158
M.ac-O-XIII											0,171	0,1726	0,1724
M.ac-O-XIV											3,1081	3,11	3,1082
M.ac-O-XV											6,7131	6,7139	6,7133

Figure H.1 : Evolution de l'altitude du repère M.abc entre 1885 et 2003

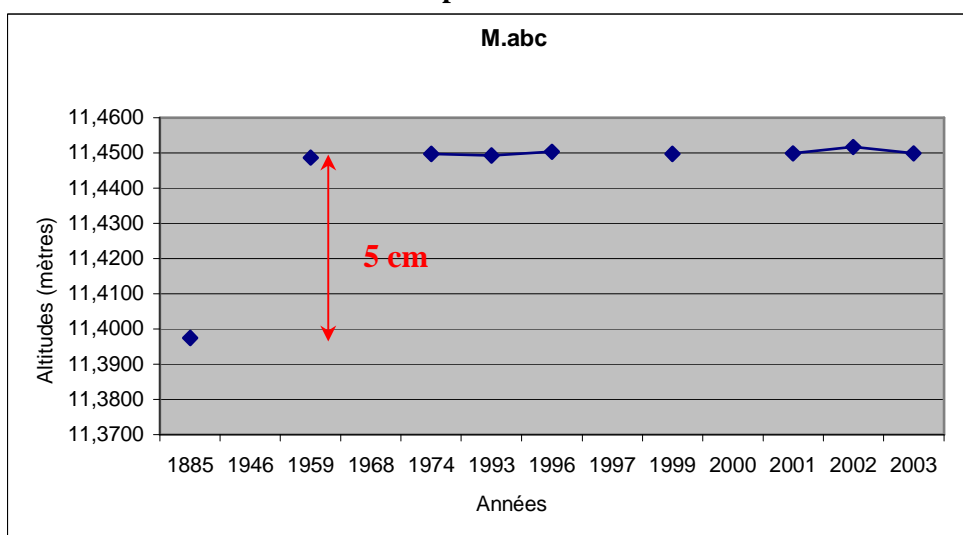


Figure H.2 : Evolution de l'altitude du repère M.abc entre 1959 et 2003

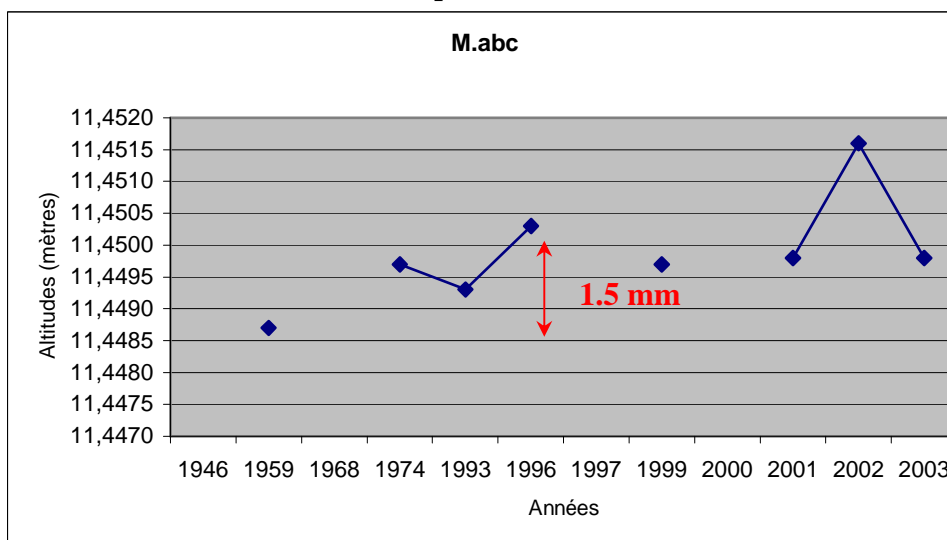


Figure H.3 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-I entre 1885 et 2003

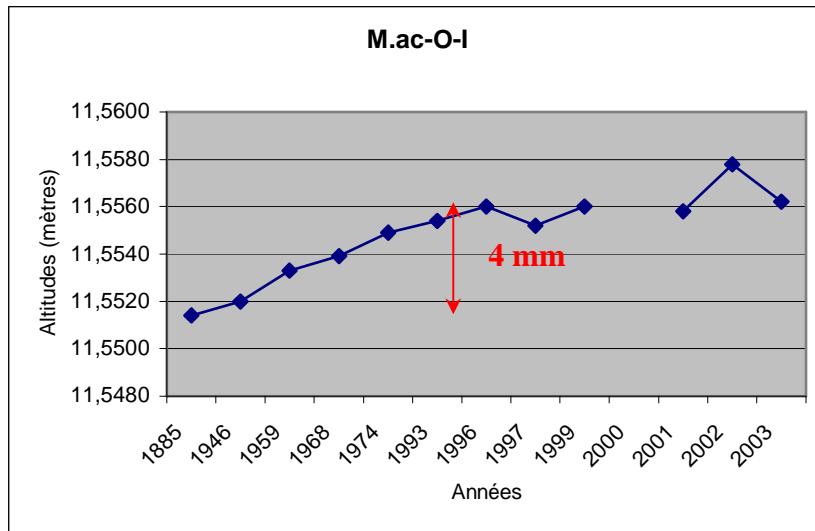


Figure H.4 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-II entre 1885 et 1996

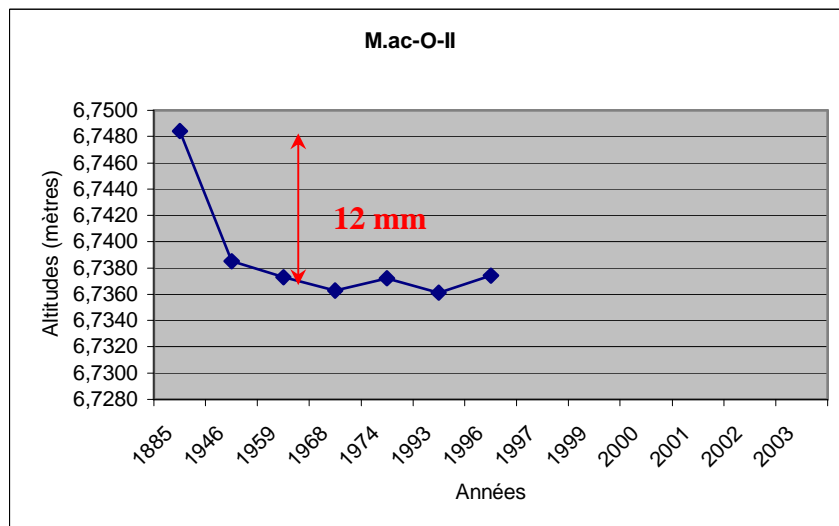


Figure H.5 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-II entre 1946 et 1996

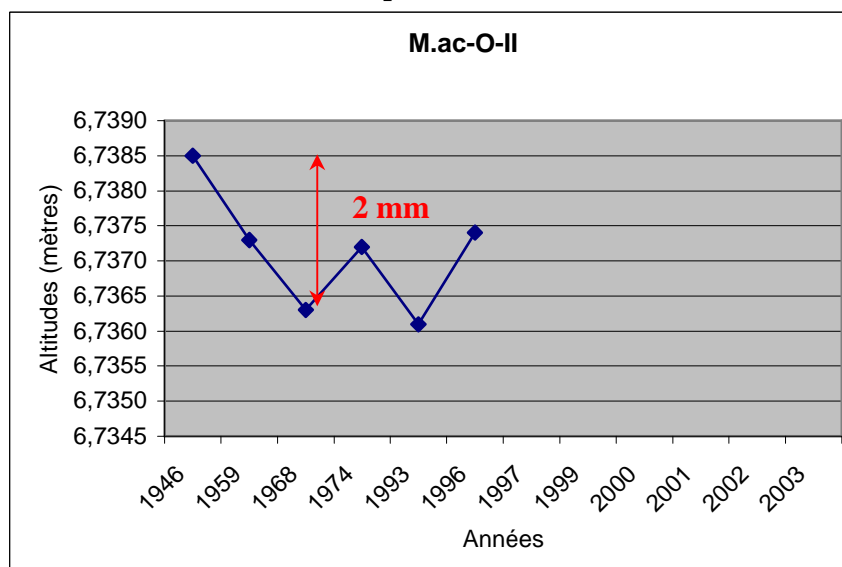


Figure H.6 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-IIbis entre 1999 et 2003

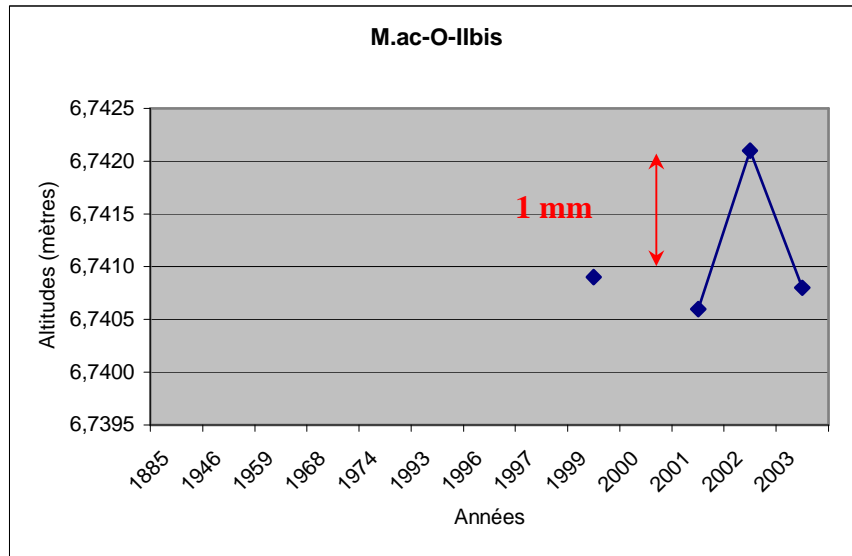


Figure H.7 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-III entre 1885 et 2003

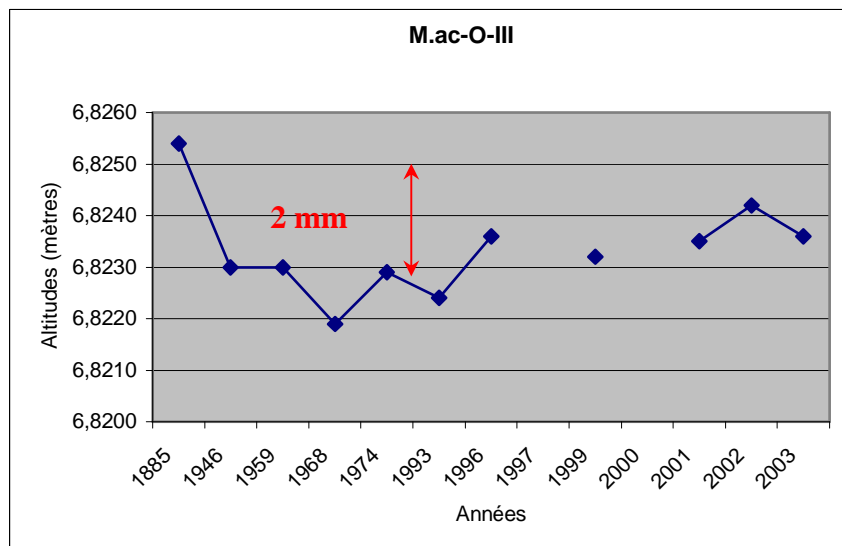


Figure H.8 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-IV entre 1885 et 2003

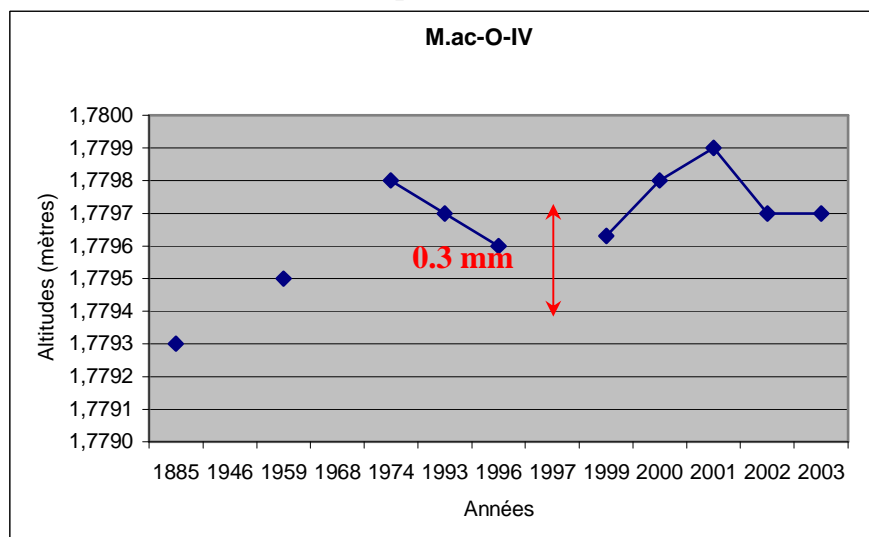


Figure H.9 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-V entre 1885 et 2003

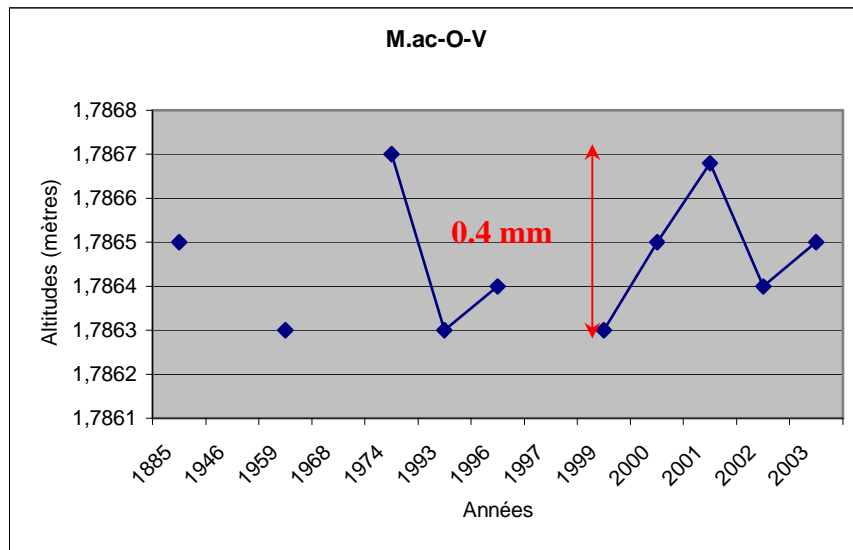


Figure H.10 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-VI entre 1959 et 2003

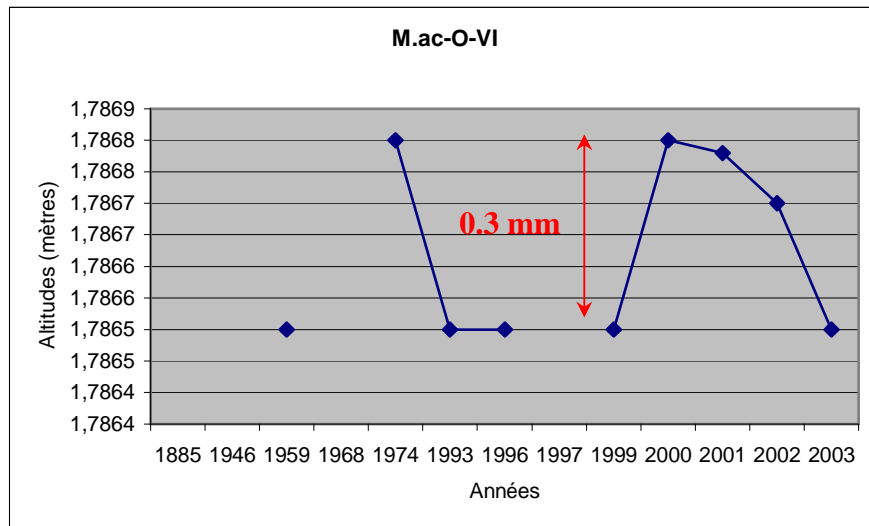


Figure H.11 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-VII entre 1959 et 2003

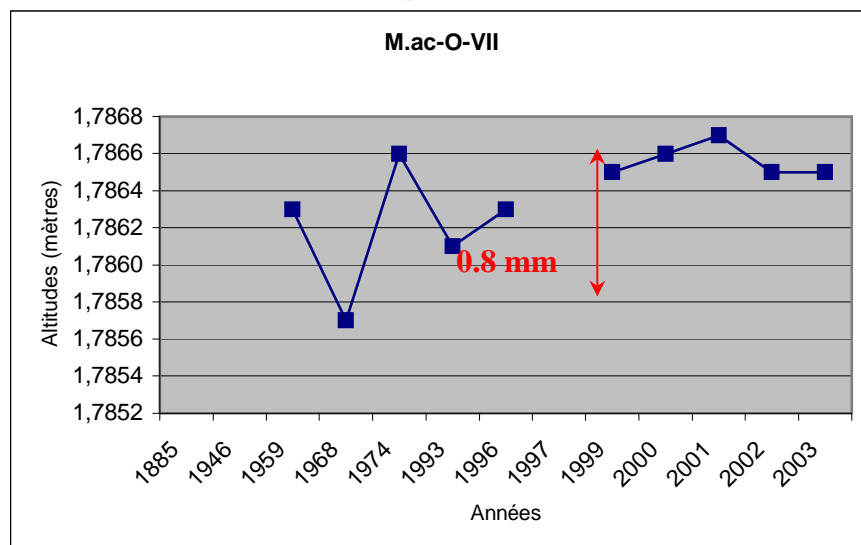


Figure H.12 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-IX entre 1999 et 2003

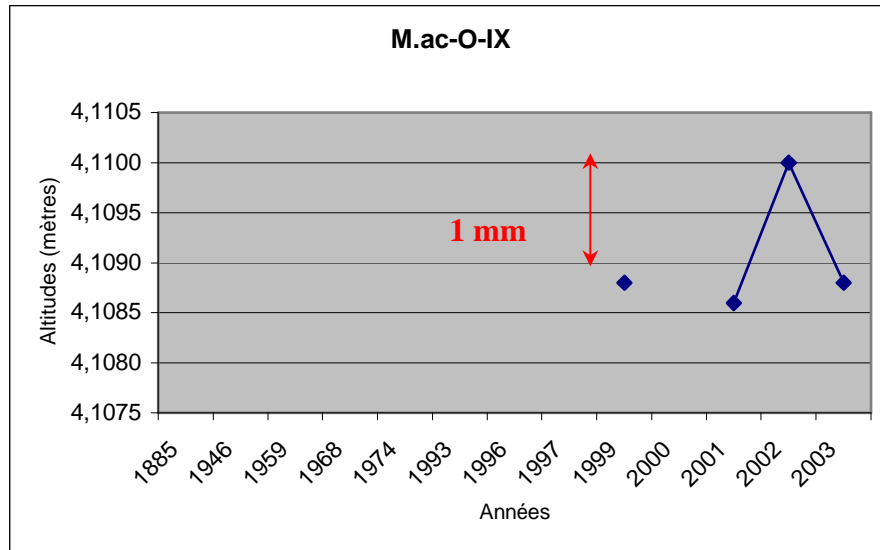


Figure H.13 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-XI entre 1999 et 2003

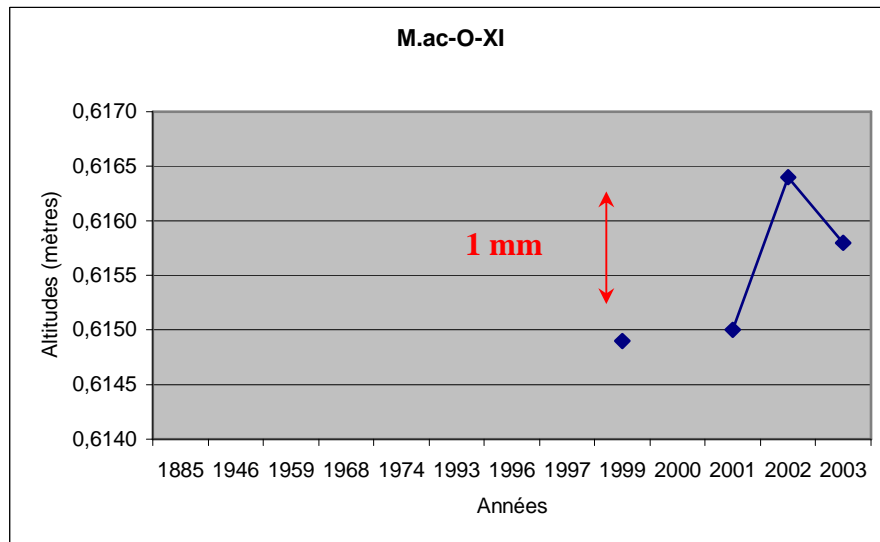


Figure H.14 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-XIII entre 2001 et 2003

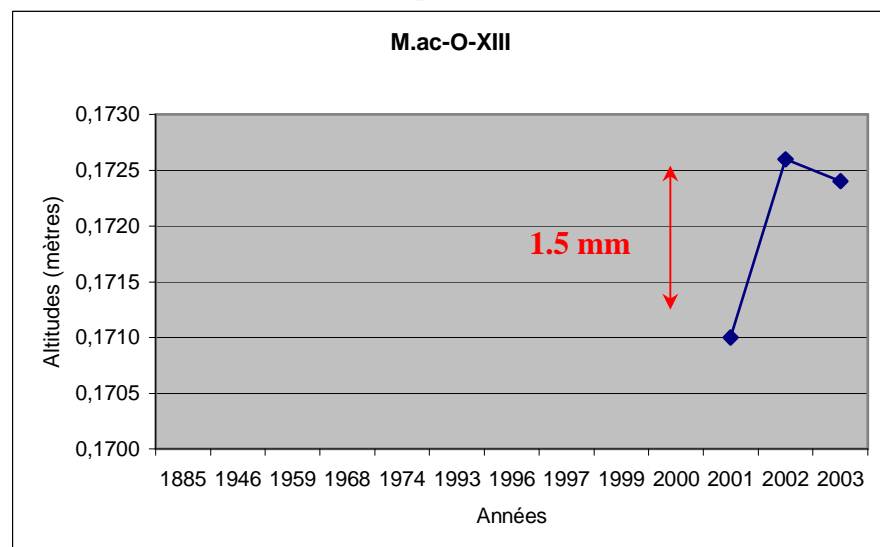


Figure H.15 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-XIV entre 1946 et 1996

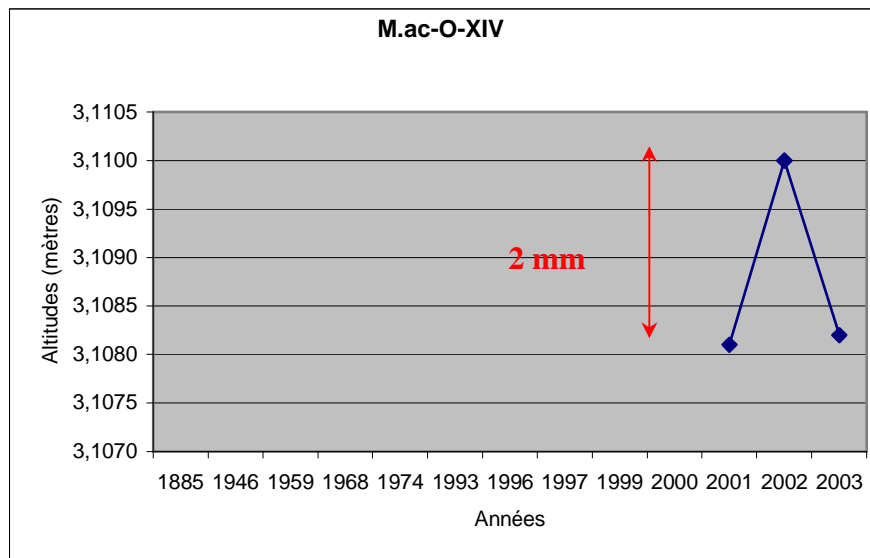
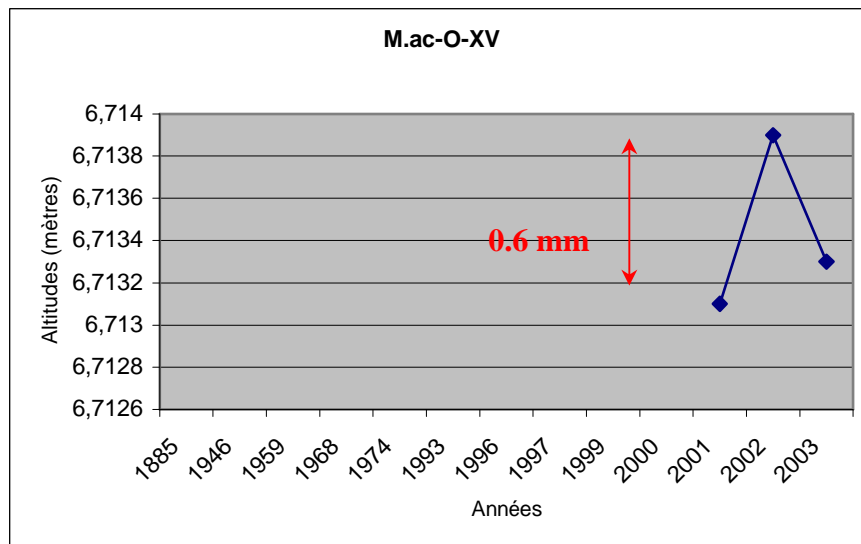


Figure H.16 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-XV entre 2001 et 2003



H.II : Résultats du calcul des altitudes des repères extérieurs à l'observatoire

	1946	1959	1968	1974	1981	1993	1994	1996	1997	1999	2001	2002	2003
M.bc - 67	15,594	15,5961	15,5964	15,5975		15,5984		15,5993					
M.bc - 68	19,611	19,6133	19,6124			19,6142		19,6146	19,6147				
M.bc - 68 I						11,2337	11,2338	11,235	11,2348	11,2339	11,6653	11,6665	11,6646
M.bc - 68 II						11,1465		11,1477	11,1476				
M.ab - 1	12,672	12,6694			12,6664	12,666	12,6664	12,6674	12,6677				
M.ab - 2					8,5717	8,5714							
M.ab - 3	10,6365				10,6369	10,6368							

- chem. 1 M.abc -> M.ab-1 -> M.ab-2 -> M.a -3
- chem. 2 M.abc -> M.bc-68 I -> M.bc-68 II (-> M.bc-68 1997)
- chem. 3 M.abc -> M.bc - 67 -> M.bc-68
- chem. 4 M.abc -> M.ab-1 -> M.a -3
- chem. 5 M.abc -> M.bc - 68 -> M.bc-67

Figure H.17 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-67 entre 1946 et 1996

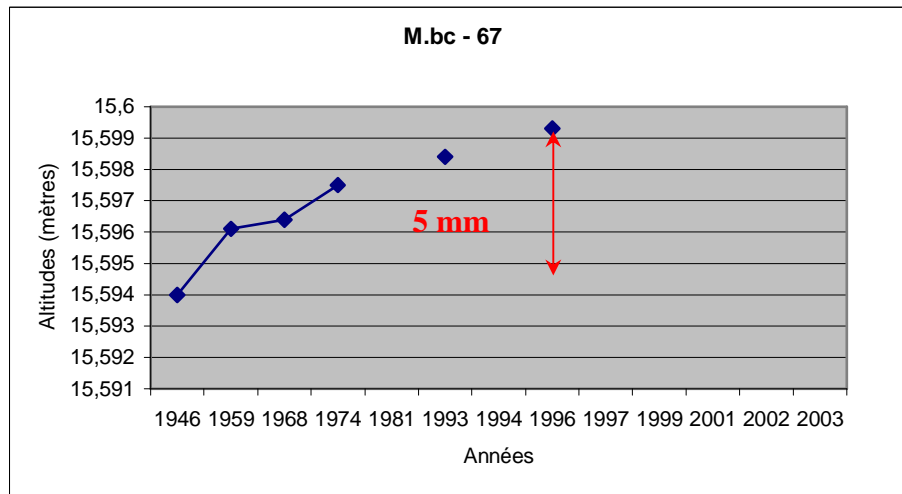


Figure H.18 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-68 entre 1946 et 1997

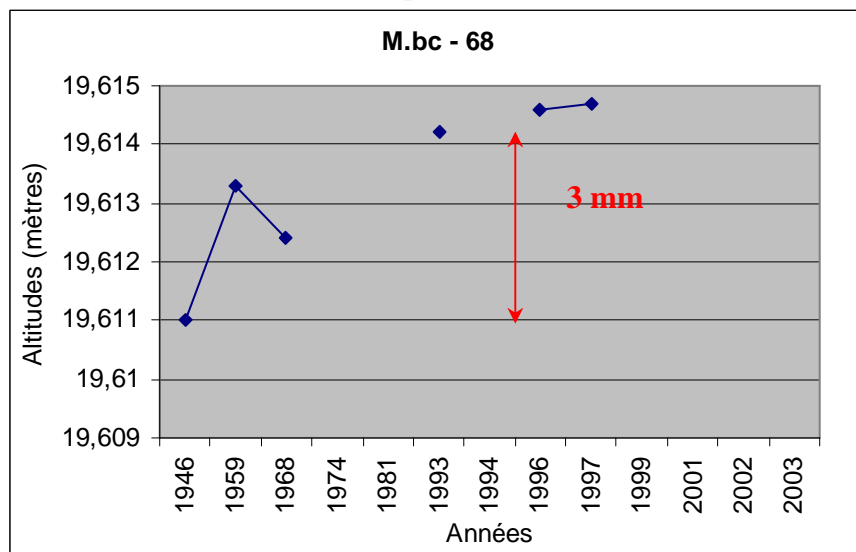


Figure H.19 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-68 I entre 1993 et 2003

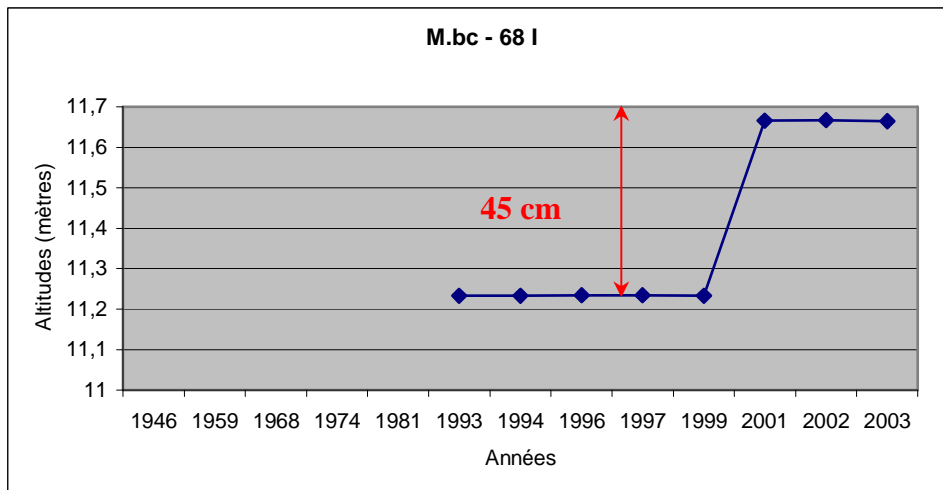


Figure H.20 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-68 I entre 1993 et 1999

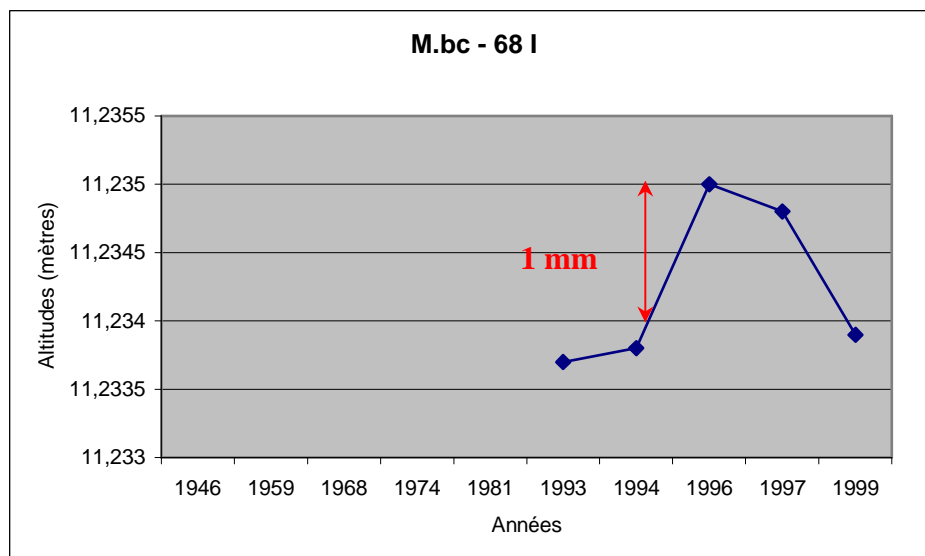


Figure H.21 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-68 I entre 2001 et 2003

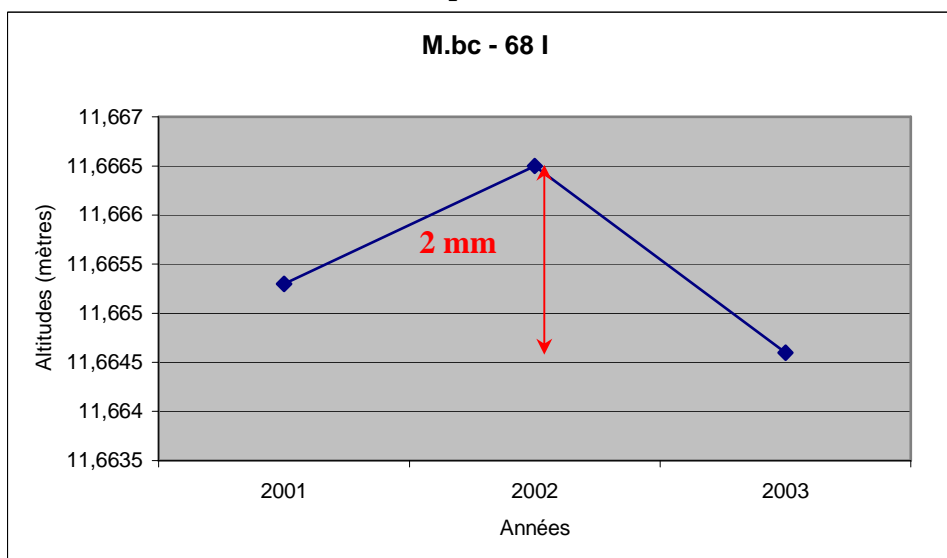


Figure H.22 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-1 entre 1946 et 1999

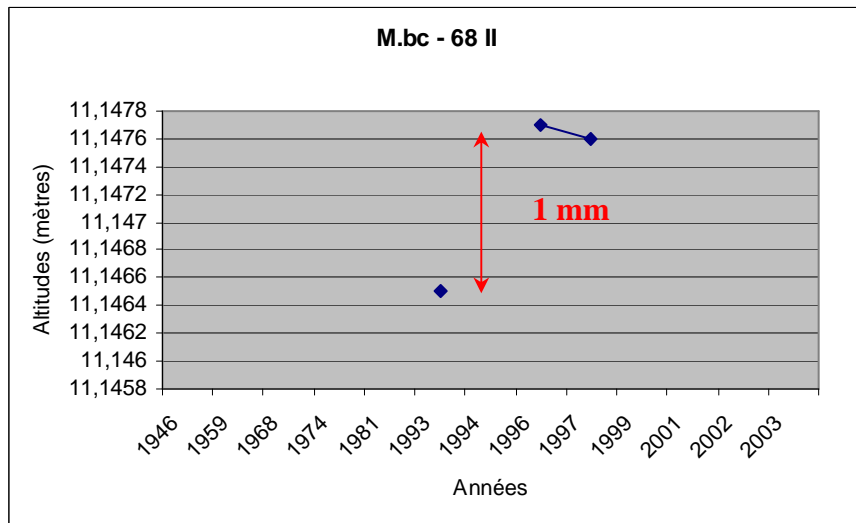


Figure H.23 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-1 entre 1946 et 1999

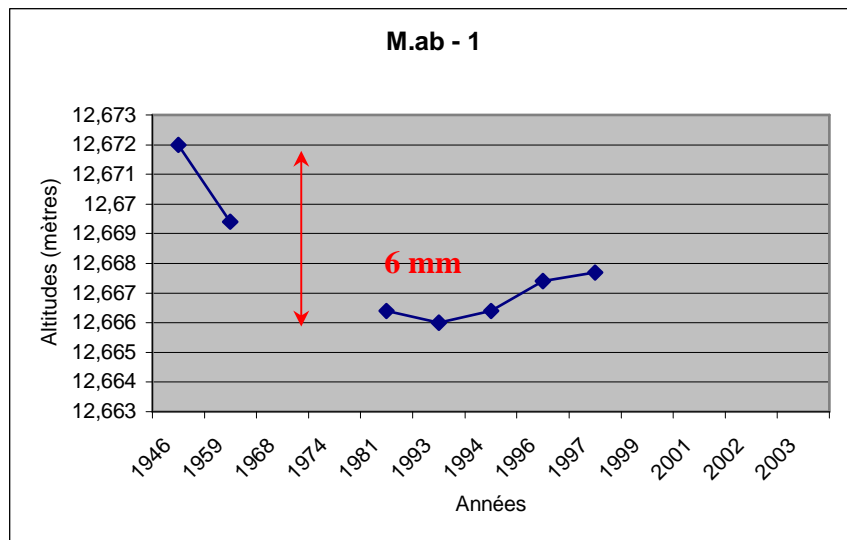


Figure H.24 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-1 entre 1981 et 1997

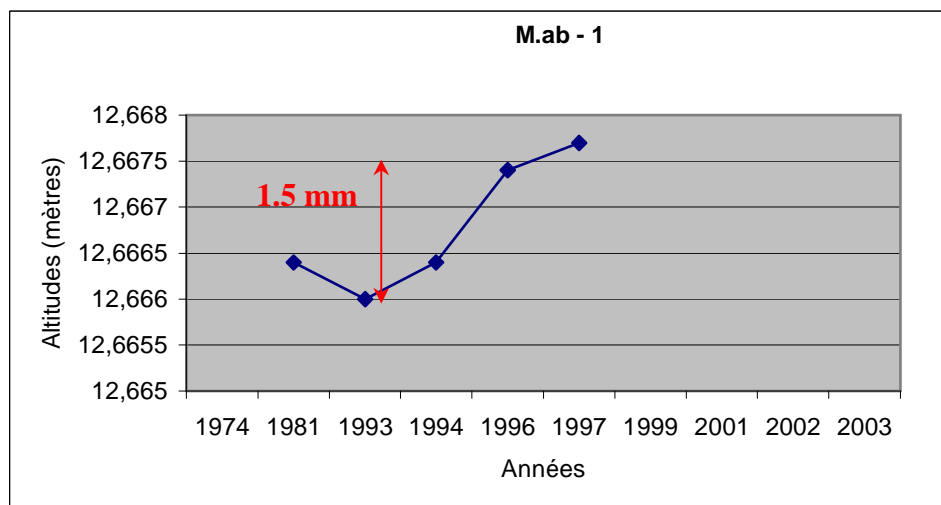


Figure H.25 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-2 entre 1981 et 1993

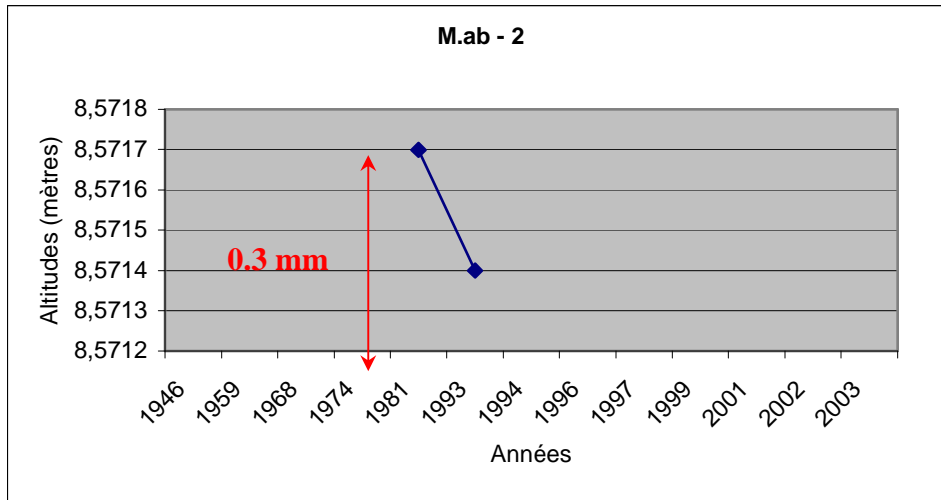
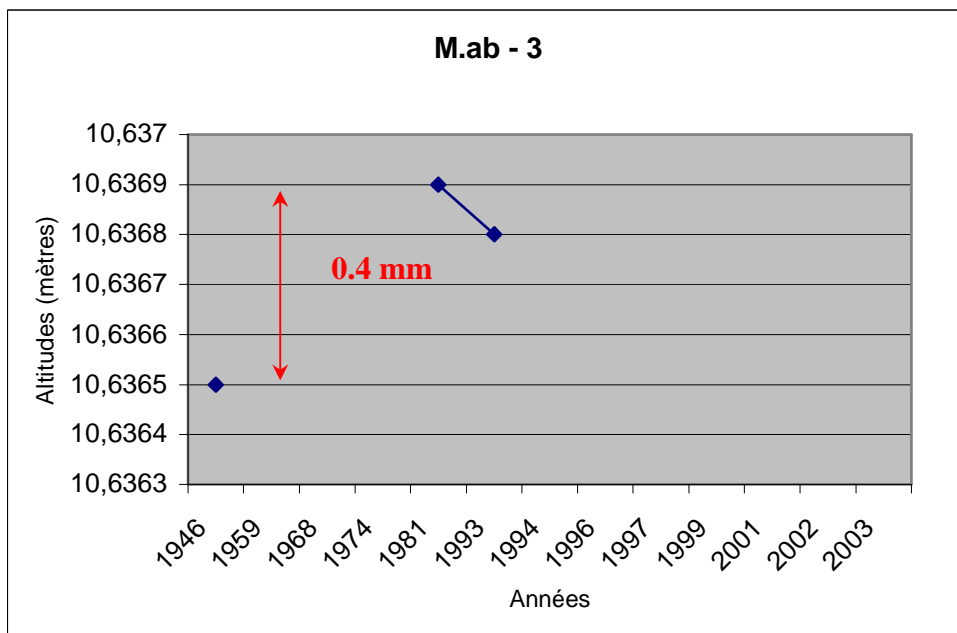
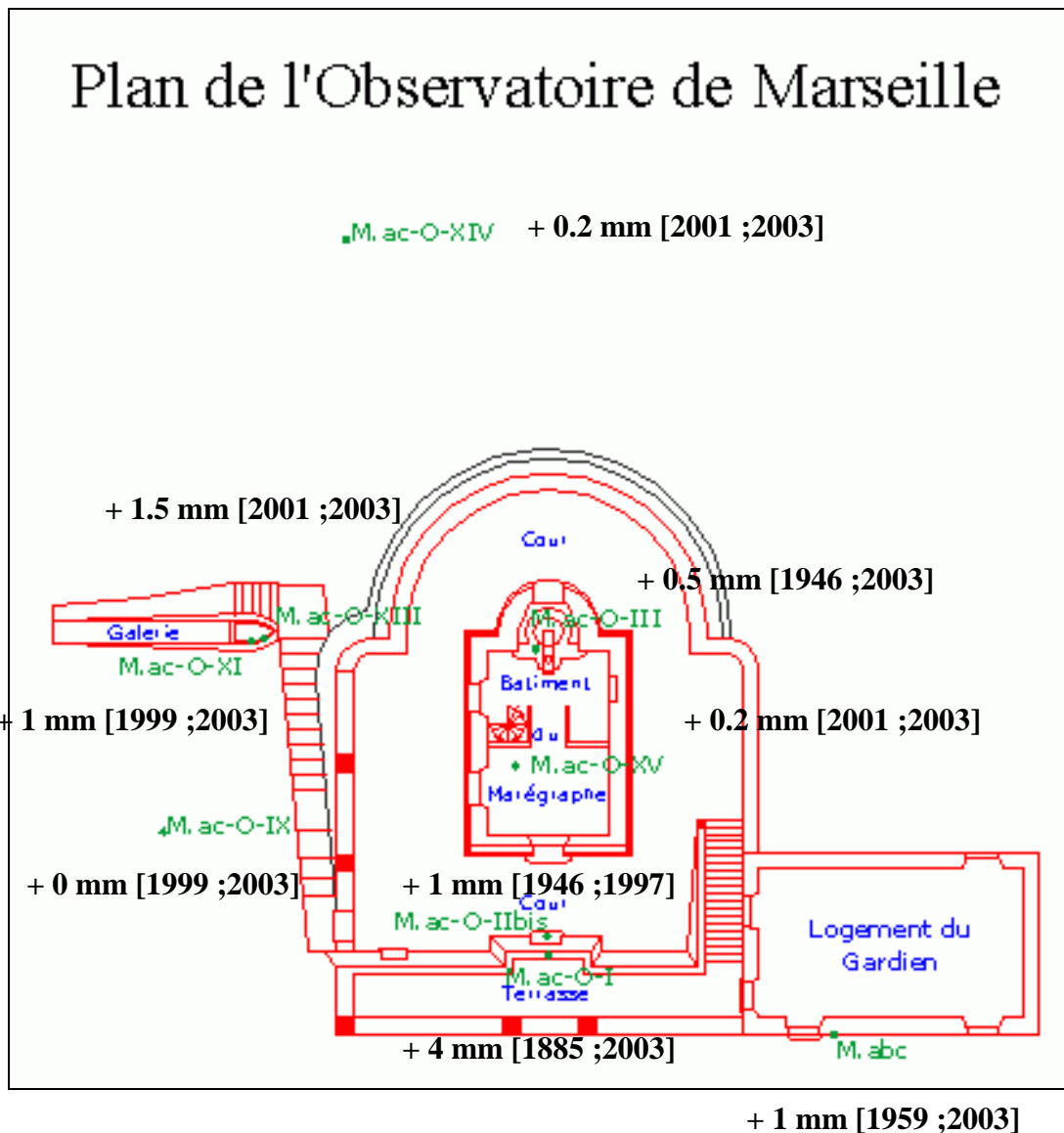


Figure H.26 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-3 entre 1946 et 1993



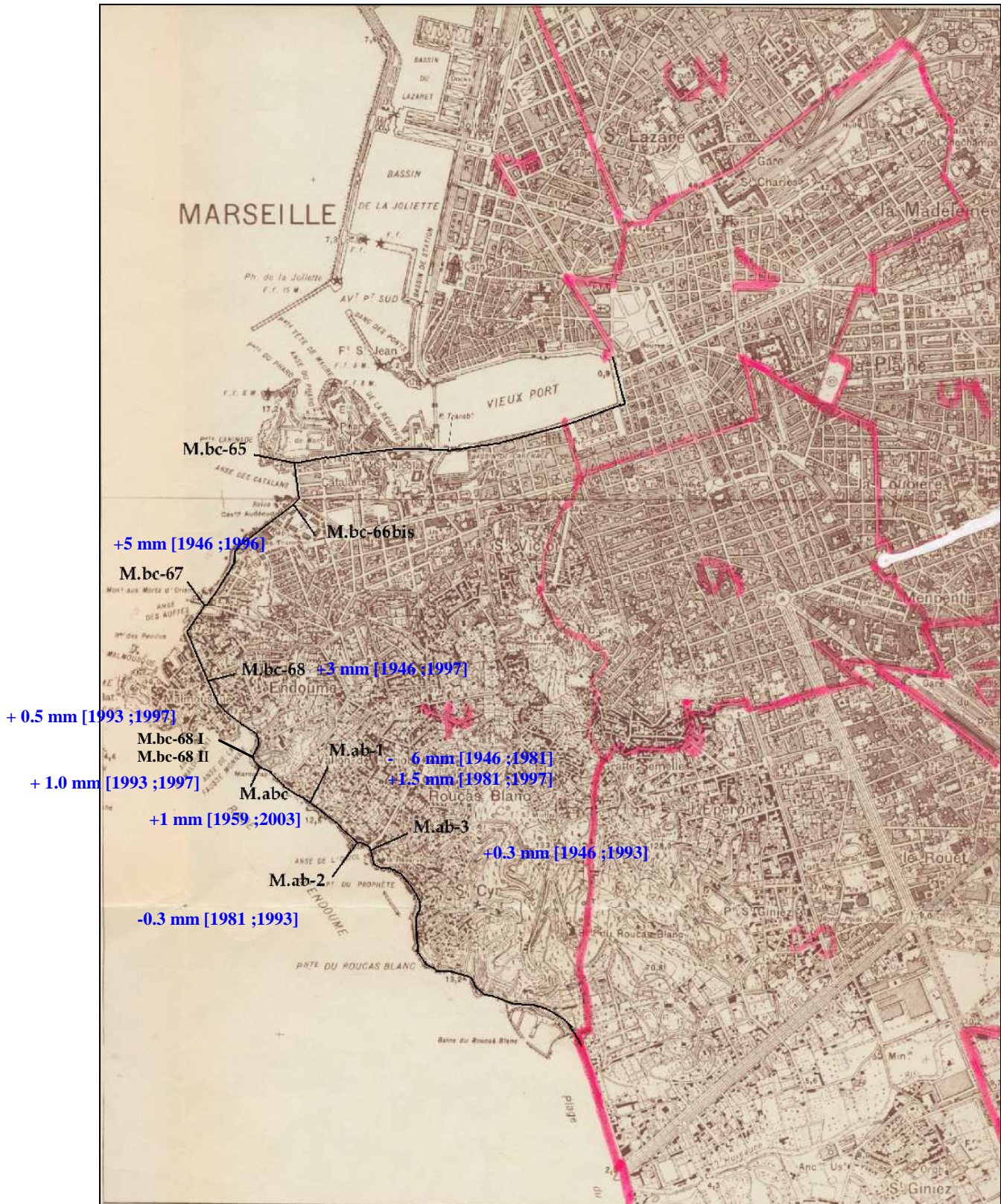
H.III : Evolution de l'altitude des repères de l'observatoire

Figure H.27 : Plan de situation des repères de l'observatoire



H.IV : Situation des repères extérieurs à l'observatoire

Figure H.28 : Plan de situation des repères extérieurs à l'observatoire



Bibliographie

- [ALL 97] S. ALLAIN (septembre 1997) *Mesure de la Marée*. Guide technique, EPSHOM Centre d'Hydrographie Section Géodésie Géophysique.
- [COI 85] Commission Océanographique Intergouvernementale (1985) *Manuel sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer*. Unesco.
- [CRE 03] B. CREPON (2003) *Econométrie*. ENSAE Ecole nationale de la statistique et de l'administration économique
- [DAR 71] DARS (1971) *Les Marées, Tome I*. Ecole Nationale Supérieure Des Techniques Avancées, Département Océanologie Hydrographie.
- [DEV 02] O.DEVAUCHELLE (2002) *Mesure du gradient de température dans le puits du marégraphe de Penfeld (Brest)*. Rapport d'étude, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
- [GUE 01] O.GUERIN (2001) *Comprendre les marées*. Edition Ouest-France, découverte nature.
- [GON 02] J.GONELLA, B.SIMON (2002) *Erreur induite par l'évolution diurne de la température sur deux marégraphes acoustiques en Méditerranée*. Rapport d'étude, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
- [IGN 63] IGN (Avril 1963) *Le Marégraphe Fondamental*. Institut Géographique National, 2° Direction Géodésie, Section du Nivellement de Précision.
- [JAR 02] A.JARNY (2002) *Etude des performances des Marégraphes de Brest*. Rapport de Stage.
- [MIN 01] A. MINEAUD (juin 2001) *Etude de la qualité des données du marégraphe de Marseille*. Rapport de stage.
- [SIM 03] B. SIMON (2003) *Cours de marée*. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
- [WOP 95 a] G. WOPPELMANN (mars 1995) *Le cas particulier de l'étalonnage du marégraphe de Marseille*. Laboratoire de Recherche en Géodésie.
- [WOP 95 b] G .WOPPELMANN (mars 1995) *Connaissance du niveau des mers*. Institut Géographique National.
- [WOP 97] G. WOPPELMANN (1997) *Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par technique de géodésie spatiale*. Thèse de Doctorat, Observatoire de Paris.

Sigles et abréviations

CLDG	Centre Littoral De Géophysique
COI	Commission Océanographique Intergouvernementale
GPS	Global Positioning System
IGN	Institut Géographique National
MCN	Marégraphe Côtier Numérique
NGF	Nivellement Général de la France
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SONEL	Système d'Observation du Niveau des Eaux du Littoral
TU	Temps Universel

Table des illustrations

<i>Figure 1 : Tableau récapitulatif des signaux océaniques contenus dans les variations du niveau de la mer [WOP 95 b - LE PRO 91].</i>	7
<i>Figure 2 : Principe de mesure du marégraphe à flotteur [WOP 97 – IGN 63].</i>	8
<i>Figure 3 : Principe de mesure du MCN [JAR 02]</i>	10
<i>Figure 4 : allures caractéristiques de défauts typiques du marégraphe à flotteur [COI 85]</i>	12
<i>Figure 5 : Graphique récapitulant la position des différentes références [MIN 01]</i>	15
<i>Figure 7 : schéma d'un extrait de marégramme (document issu des archives de l'IGN).</i>	17
<i>Exemple 1 : extrait de l'année 1987</i>	19
<i>Figure 8 : Ecart Mensuel entre les données « marégrammes » et « Totalisateur ».</i>	21
<i>Exemple 2 : Résultats de l'exploitation du calcul des phases des constantes harmoniques K_1, M_2 et S_2.</i>	25
<i>Figure 9 : Courbe de la variations des moyennes annuelles des décalages temporels entre 1885 et 1988.</i>	26
<i>Figure 10: Courbe de la variations des moyennes annuelles des décalages temporels entre 1885 et 1988 des nouveaux fichiers</i>	27
<i>figure 11 : Ecart Mensuel entre les données « marégrammes » et « Totalisateur ».</i>	28
<i>Figure 12 : Ecart Mensuel entre les données « marégrammes » et « Totalisateur ».</i>	29
<i>Figure 13 : courbe de l'échantillon référence g_1</i>	30
<i>Figure 14 : courbe de l'échantillon des observations g_2</i>	30
<i>Figure 15 : Comparaison entre g_1 et g_2</i>	31
<i>Figure 16 : évolution des moyennes mensuelles des décalages temporels déterminés par autocorrélation.</i>	32
<i>Figure 17: évolution des décalages temporels déterminés par autocorrélation sur un mois.</i>	33
<i>Figure 18: Graphique de l'évolution des constantes du totalisateur entre 1885 et 2003</i>	34
<i>Figure 19 : Comparaison des graphiques «variation du zéro des courbes» et «Ecart Marégrammes Totalisateur».</i>	35
<i>Figure 20 et 21 : Evolution du graphique « Ecart Marégrammes Totalisateur » suite aux corrections des données.</i>	36
<i>Figure 23 : photo du repère fondamental</i>	38
<i>Figure 24 : Principe de l'étalonnage du marégraphe de Marseille (document issu des archives de l'IGN)</i>	38
<i>Figure 25: Vue en coupe de l'observatoire</i>	39
<i>Figure 26 : Les diagrammes de Van de Castele des marégraphes de Marseille des étalonnages de mars 2003.</i>	41
<i>Figure 27 : Tableau récapitulatif des pentes observées sur les diagrammes de Van de Castele du MCN au cours des expériences d'étalonnages de 2000 à 2003.</i>	41
<i>Figure 28 : Graphique de l'ensemble des expériences d'étalonnage du MCN.</i>	42
<i>Figure 29 : Principe de la mesure du MCN</i>	43
<i>Figure 30 : Tableau récapitulatif du test de Fisher</i>	46
<i>Figure 31 : Graphique Comparaison des moyennes mensuelles des décalages horaires entre marée prédite et mesures MCN obtenu à partir du programme MAS.</i>	47
<i>Figure 32 : Graphique Comparaison des moyennes mensuelles entre les mesures du totalisateur et du MCN</i>	48

<i>Figure 33 : Diagramme de Van de Castele du MCN avec un décalage de 20 minutes.</i>	49
<i>Figure 35 : Récapitulatif historique des observations de nivellement disponibles pour l'étude de la stabilité locale de l'observatoire</i>	50
<i>Figure 36 : Précision attendue sur l'altitude non compensée de chaque repères</i>	51
<i>Figure 37 : Organigramme récapitulatif des modifications faites aux niveau des fichiers</i>	53
<i>Figure 38 : Moyennes Mensuelles des écarts</i>	55
<i>Figure 39 : Stabilité du zéro de la règlette entre 1931 et 1988</i>	58
<i>Figure A.1 : Vue en coupe est-ouest de l'observatoire</i>	60
<i>Figure A.2 : Vue en coupe sud-nord de l'observatoire</i>	60
<i>Figure A.3 : Vue extérieure de l'observatoire</i>	60
<i>Figure A.4 : Vue du marégraphe totalisateur de Marseille (Image numérisée à partir d'une photo des archives de l'IGN) [WOP 97]</i>	61
<i>Figure A.5 : Vue du marégraphe de Marseille</i>	61
<i>Figure A.6 : Vue du cylindre enregistreur et des styles.</i>	61
<i>Figure A.7 : Vue du disque totalisateur</i>	61
<i>Figure A.8 : Extrait du marégramme d'août 1885 (Archives de l'IGN)</i>	62
<i>Figure A.9 : Principe du marégraphe Totalisateur [WOP 97]</i>	62
<i>Figure A.10 : Comparaison des moyennes annuelles des marégrammes et du totalisateur</i>	64
<i>Figure H.1 : Evolution de l'altitude du repère M.abc entre 1885 et 2003</i>	91
<i>Figure H.2 : Evolution de l'altitude du repère M.abc entre 1959 et 2003</i>	91
<i>Figure H.3 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-I entre 1885 et 2003</i>	92
<i>Figure H.4 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-II entre 1885 et 1996</i>	92
<i>Figure H.5 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-II entre 1946 et 1996</i>	92
<i>Figure H.6 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-IIbis entre 1999 et 2003</i>	93
<i>Figure H.7 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-III entre 1885 et 2003</i>	93
<i>Figure H.8 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-IV entre 1885 et 2003</i>	93
<i>Figure H.9 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-V entre 1885 et 2003</i>	94
<i>Figure H.10 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-VI entre 1959 et 2003</i>	94
<i>Figure H.11 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-VII entre 1959 et 2003</i>	94
<i>Figure H.12 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-IX entre 1999 et 2003</i>	95
<i>Figure H.13 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-XI entre 1999 et 2003</i>	95
<i>Figure H.14 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-XIII entre 2001 et 2003</i>	95
<i>Figure H.15 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-XIV entre 1946 et 1996</i>	96
<i>Figure H.16 : Evolution de l'altitude du repère M.ac-O-XV entre 2001 et 2003</i>	96
<i>Figure H.17 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-67 entre 1946 et 1996</i>	97
<i>Figure H.18 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-68 entre 1946 et 1997</i>	97
<i>Figure H.19 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-68 I entre 1993 et 2003</i>	98
<i>Figure H.20 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-68 I entre 1993 et 1999</i>	98
<i>Figure H.21 : Evolution de l'altitude du repère M.bc-68 I entre 2001 et 2003</i>	98
<i>Figure H.22 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-1 entre 1946 et 1999</i>	99
<i>Figure H.23 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-1 entre 1946 et 1999</i>	99
<i>Figure H.24 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-1 entre 1981 et 1997</i>	99
<i>Figure H.25 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-2 entre 1981 et 1993</i>	100
<i>Figure H.26 : Evolution de l'altitude du repère M.ab-3 entre 1946 et 1993</i>	100
<i>Figure H.27 : Plan de situation des repères de l'observatoire</i>	101
<i>Figure H.28 : Plan de situation des repères extérieurs à l'observatoire</i>	102