



## Elévation du niveau moyen de la mer et tectonique actuelle Application à la Bretagne

---

N. Lenôtre  
P. Watremez  
G. Brochard  
I. Stemmelin

juin 1996  
R 38964

BRGM  
DIRECTION DE LA RECHERCHE  
Département Géophysique et Imagerie géologique  
BP 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 02 - France - Tél.: (33) 38 64 34 34

Mots clés : Gestion du Littoral, Niveau de la mer, Marégraphe, Nivellement, Bretagne.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Lenôtre N., Watremez P., Brochard G., Stemmelin I. (1996) - Élévation du niveau moyen de la mer et tectonique actuelle. Application à la Bretagne. Rap. BRGM R 38964, 84 p., 25 fig., 12 tabl., 3 pl.

© BRGM, 1996 : ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## RESUME

Depuis des dizaines d'années, la majorité des enregistrements des marégraphes indiquent une remontée du niveau de la mer à l'échelle mondiale. Celle-ci n'apparaît pas constante le long du littoral français. Cette remontée, difficile à quantifier avec précision, n'apparaît pas identique ni d'un lieu à l'autre de la planète ni même sur le littoral français. Cette différence peut s'expliquer par l'existence de mouvements verticaux de la croûte terrestre qui peuvent régionalement être un facteur aggravant dans le cas d'une subsidence ou au contraire un facteur minorant dans le cas d'une surrection.

L'objectif de cette étude est de rapprocher les travaux menés en océanographie et ceux réalisés à terre. En effet, avec un point de vue caricatural, on peut dire que pour l'océanographe la référence stable c'est la terre, et pour le géographe ou le géologue terrestre, la stabilité, c'est la mer. Cette étude tente donc de quantifier l'élévation réelle du niveau de la mer en exploitant les données existantes depuis une centaine d'années :

- données de marégraphes qui permettent de mesurer la variation du niveau de la mer ;
- mesures de nivellement NGF effectuées entre 1884 et 1892 et mesures de nivellement IGN réalisées entre 1962 et 1985 dont la comparaison met en évidence des mouvements verticaux actuels dont l'origine peut être de nature tectonique.

Toutefois pour utiliser ces données qui n'ont pas été acquises dans cet objectif, il est nécessaire de connaître leur qualité, leur précision et ainsi d'obtenir une quantification de l'erreur.

Dans le cadre d'une analyse des variations du niveau moyen de la mer, le choix des observatoires et des données est primordial. Une étude qualitative est nécessaire, mais elle ne peut être que relative. Elle consiste à apprécier la qualité relative des données d'un observatoire de marégraphie par comparaison avec des observations voisines, ou par comparaison avec les données de prédictions de marées.

C'est aux observatoires permanents, bien entretenus, et présentant des séries temporelles d'au moins une trentaine d'années ainsi qu'un minimum de lacunes de données qu'il faut s'intéresser. En France, deux observatoires présentent des séries temporelles séculaires : Brest et Marseille. L'étude est focalisée sur celui de Brest.

Une des techniques utilisées pour la mise en évidence des mouvements verticaux actuels est la comparaison de nivellements. L'estimation de la précision de cette comparaison est quantifiée (les erreurs étant soit corrigées, soit prises en compte).

L'étude sur la Bretagne montre un basculement avec une élévation de la partie occidentale. Les profils de nivellement sont stables à proximité du marégraphe de Brest. Ceci laisse supposer qu'il n'y a pas de faille à rejeu actuel à proximité et qu'il s'agit plutôt d'un mouvement de grande longueur d'onde.

Les rattachements des marégraphes à la terre ne sont pas satisfaisants (problème de précision) pour une étude sur l'élévation du niveau de la mer.

Malgré les réserves émises et grâce au travail effectué sur les causes d'erreurs et leur quantification, un essai d'estimation de la variation absolue du niveau de la mer est fait sur Brest : de l'ordre de 2 mm/an.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche BRGM-PO3 "Processus et transferts en milieu littoral" avec un cofinancement du programme "Elévation du niveau de la mer" du ministère de l'Environnement.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	9
1. DETERMINATION DU NIVEAU MOYEN DE LA MER ET DE SES VARIATIONS.....	11
1.1. Quelques définitions indispensables .....	11
1.2. Causes de variation du niveau de la mer .....	14
1.2.1. <i>La marée</i> .....	15
1.2.2. <i>Les effets météorologiques</i> .....	16
1.2.3. <i>Récapitulatif</i> .....	19
1.3. Mesure du niveau de la mer .....	19
1.3.1. <i>Echelle de marée</i> .....	19
1.3.2. <i>Marégraphe à flotteur</i> .....	20
1.3.3. <i>Traitement des observations</i> .....	23
1.4. Erreurs liées aux instruments et à la numérisation.....	25
1.4.1. <i>Echelle de marée</i> .....	25
1.4.2. <i>Marégraphe à flotteur</i> .....	25
1.4.3. <i>Précision du dépouillement</i> .....	28
1.4.4. <i>Etude sur la Bretagne</i> .....	30
1.4.5. <i>Marégraphe de Marseille</i> .....	39
1.5. Etude qualitative de la variation du niveau de la mer .....	40
1.5.1. <i>Les données disponibles</i> .....	40
1.5.2. <i>Qualité des données publiées, exemple de Brest</i> .....	42
1.5.3. <i>Observatoires permanents français</i> .....	43
1.6. Etude des tendances du niveau moyen de la mer .....	46
1.6.1. <i>Rappels</i> .....	46
1.6.2. <i>Séries temporelles utiles</i> .....	46
1.7. Conclusion : vers une méthode d'étude .....	49

1.7.1. <i>Choix des observatoires</i> .....	49
1.7.2. <i>Choix des données</i> .....	50
1.7.3. <i>Qualité des données</i> .....	50
1.7.4. <i>Calcul des tendances</i> .....	51
1.8. Conclusion.....	51
2. OBSERVATION DES MOUVEMENTS VERTICAUX ACTUELS DE LA CROUTE TERRESTRE.....	53
2.1. Description des campagnes de nivellements .....	54
2.2. Profil de comparaison de nivellements .....	55
2.2.1. <i>Estimation de la précision d'un profil de comparaison de nivellements</i> .....	55
2.2.2. <i>Interprétation des profils de nivellements</i> .....	60
2.3. Estimation de la vitesse .....	63
2.3.1. <i>Estimation de l'erreur sur la vitesse</i> .....	63
2.3.2. <i>Mouvements verticaux actuels par comparaison de nivellements</i> .....	65
2.4. Conclusion.....	71
3. RATTACHEMENT DES MAREGRAPHES A LA TERRE .....	73
3.1. Repérage des observatoires .....	73
3.1.1. <i>Les repères de nivellement</i> .....	73
3.1.2. <i>Rattachement</i> .....	74
3.2. Qualité du rattachement - exemple de Brest.....	74
4. VARIATION ABSOLUE ET VARIATION RELATIVE DU NIVEAU DE LA MER.....	77
4.1. Etude théorique.....	77
4.2. Application à la Bretagne Nord.....	79
CONCLUSION .....	81
BIBLIOGRAPHIE .....	83

## LISTE DES FIGURES

Fig. 1 - Cotes (en mètre) du zéro hydrographique pour différents ports de Bretagne....	13
Fig. 2 - Echelle de marée.....	19
Fig. 3 - Correction du fruit de l'échelle .....	20
Fig. 4 - Principe d'un marégraphe à flotteur.....	21
Fig. 5 - Extrait d'un marégramme renseigné (SHOM).....	24
Fig. 6 - Comparaison des variations du niveau moyen annuel en différents lieux de Bretagne et à Cherbourg (données SHOM) .....	31
Fig. 7 - Comparaison des variations du niveau moyen entre Brest et Saint Servan au siècle dernier (données SHOM).....	33
Fig. 8 - Comparaison des variations du niveau moyen annuel entre Brest, données SHOM et Newlyn (données PSMSL).....	33
Fig. 9 - Répartition des écarts-types annuels entre observations et prédictions pour l'observatoire de Brest (données SHOM).....	35
Fig. 10 - Courbes des observations et des prédictions à Brest 28 février 1907 (SHOM).....	36
Fig. 11 - Répartition des écarts-types annuels entre observations et prédictions pour l'observatoire de Roscoff.....	37
Fig. 12 - Répartition des écarts-types annuels entre observations et prédictions pour l'observatoire de Port-Tudy.....	37
Fig. 13 - Données PSMSL du marégraphe de Marseille.....	39
Fig. 14 - Répartition (en pourcentage) des écarts entre les moyennes annuelles fournies par le PSMSL et le SHOM.....	42
Fig. 15 - Comparaison des niveaux moyens fournis à Brest par le SHOM et le PSMSL.....	43
Fig. 16 - Marégraphes en France métropolitaine pour lesquels le PSMSL a des moyennes.....	44
Fig. 17 - Données PSMSL de la façade Manche et Atlantique.....	45
Fig. 18 - Données PSMSL de la façade méditerranéenne.....	45
Fig. 19 - Données PSMSL du marégraphe de Brest.....	48
Fig. 20 - Carte des vitesses de mouvements verticaux actuels par comparaison de nivellement en Bretagne.....	66
Fig. 21 - Carte d'estimation des mouvements verticaux actuels en Bretagne.....	68
Fig. 22 - Carte des vitesses de mouvements verticaux actuels par comparaison de nivellement en Provence.....	69
Fig. 23 - Carte d'estimation des mouvements verticaux actuels en Provence.....	70
Fig. 24 - Rattachement des hauteurs d'eau à un repère terrestre.....	78
Fig. 25 - Variation du niveau moyen entre deux dates t1 et t2.....	78

## LISTE DES TABLEAUX

Tabl. 1 - Caractéristiques de l'onde dite nodale - d'après le SHOM.....	13
Tabl. 2 - Variations (en mm) du niveau moyen dues aux ondes de longues périodes .....	15
Tabl. 3 - Causes principales de variation du niveau de la mer .....	18
Tabl. 4 - Erreurs sur les données du niveau moyen de la mer.....	29
Tabl. 5 - Exemple de valeurs de l'écart-type entre observations et prédictions jugées correctes en fonction du site .....	38
Tabl. 6 - Tendances à Brest pour la période de 1860 à 1994 (données SHOM).....	47
Tabl. 7 - Tendances pour des périodes de 20, 40 ans et plus à Brest (données SHOM).....	47
Tabl. 8 - Tendances du niveau moyen de la mer en différents lieux de Bretagne et à Cherbourg (données annuelles SHOM) .....	49
Tabl. 9 - Comparaison entre les formations géologiques et le profil de nivellement de la Provence.....	63
Tabl. 10 - Cotes (en mètre) du zéro hydrographique de Brest sous différents repères de 1889 à 1994 (données SHOM).....	76
Tabl. 11 - Variation des repères de nivellement entre 1973 et 1985 à Brest (données IGN).....	76
Tabl. 12 - Variation absolue du niveau de la mer sur les côtes de la Bretagne Nord et du Cotentin.....	80

## LISTE DES PLANCHES

- Pl. 1 - Profil de comparaison de nivellements - Profil 139.
- Pl. 2 - Profil de comparaison de nivellements - Profil 140.
- Pl. 3 - Profil de comparaison de nivellements - Profil 200.

## INTRODUCTION

Pour assurer une gestion efficace et durable du littoral, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des phénomènes agissant sur les variations du niveau de la mer et l'amplitude de ces variations.

Depuis des dizaines d'années, la majorité des enregistrements des marégraphes indiquent une remontée du niveau de la mer à l'échelle mondiale. En 1986, l'Agence pour la protection de l'environnement des Etats-Unis avait retenu plusieurs scénarios. En 2025, 2050 et 2075, l'élévation pourrait être respectivement de 13, 24 et 38 cm pour le scénario optimiste, de 55, 117 et 212 cm pour le scénario pessimiste. Depuis, ces prévisions dramatiques ont été révisées à la baisse (Paskoff, 1993). Des estimations moyennes donnent seulement une hausse de 18 cm pour 2030, de 44 cm pour 2070 et 65 cm pour la fin du siècle prochain.

Cette remontée du niveau de la mer n'apparaît pas constante le long du littoral français. Cette remontée, difficile à quantifier avec précision, n'apparaît pas identique ni d'un lieu à l'autre de la planète ni même sur le littoral français. Cette différence peut s'expliquer par l'existence de mouvements verticaux de la croûte terrestre qui peuvent régionalement être un facteur aggravant dans le cas d'une subsidence ou au contraire un facteur minorant dans le cas d'une surrection.

L'objectif de cette étude est de rapprocher les travaux menés en océanographie et ceux réalisés à terre. En effet, avec un point de vue caricatural, on peut dire que pour l'océanographe la référence stable c'est la terre, et pour le géographe ou le géologue terrestre, la stabilité, c'est la mer. Or les deux bougent ! Cette étude tente donc de quantifier l'élévation réelle du niveau de la mer en exploitant les données existantes depuis une centaine d'années :

- données de marégraphes qui permettent de mesurer la variation du niveau de la mer ;
- mesures de nivellement NGF effectuées entre 1884 et 1892 et mesures de nivellement IGN réalisées entre 1962 et 1985 dont la comparaison met en évidence des mouvements verticaux actuels dont l'origine peut être de nature tectonique.

Toutefois, pour utiliser ces données qui n'ont pas été acquises dans cet objectif, il est nécessaire de connaître leur qualité, leur précision et ainsi d'obtenir une quantification de l'erreur.

Les séquences temporelles de la centaine d'années que représentent ces données, sont intéressantes car elles correspondent aux échelles humaines des travaux d'ingénierie. La compréhension de leur tendance d'évolution sur le siècle passé devrait permettre, en

principe, de prédire la tendance de variation absolue du niveau de la mer pour le siècle à venir.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche BRGM-PO3 "Processus et transferts en milieu littoral" avec un cofinancement du programme "Elévation du niveau de la mer du ministère de l'Environnement.

## **1. DETERMINATION DU NIVEAU MOYEN DE LA MER ET DE SES VARIATIONS**

Depuis quelques années, des techniques satellitaires (programme TOPEX-POSEIDON par exemple) permettent l'étude des variations du niveau moyen de la mer. Fort utiles pour analyser des phénomènes saisonniers, ces données ne forment actuellement que des séquences temporelles trop courtes pour permettre la mise en évidence de tendance long terme. Elles sont également trop imprécises (la précision est de l'ordre de quelques centimètres) pour étudier des variations de quelques millimètres par an. Actuellement, les données de marégraphes installés le long des côtes restent la seule source de données continues (sur des périodes de plusieurs dizaines d'années) nécessaires à l'analyse de l'évolution du niveau moyen de la mer.

Cependant, les observations du niveau de la mer ne sont pas acquises par les marégraphes pour étudier le niveau moyen ; elles ont pour objectif principal la fourniture de données précises pour la navigation dans les ports et l'établissement d'annuaires de marées fiables. Elles répondent uniquement à la précision requise pour la prédiction des marées (de l'ordre du cm) et la correction des sondages hydrographiques. Il est donc indispensable de déterminer la fiabilité de ces données pour l'étude de l'évolution du niveau moyen.

Après avoir rappelé quelques définitions utiles, les principes de mesure du niveau moyen et le principe de calcul de sa variation, ce chapitre analyse les incertitudes et les erreurs dans toutes les phases de la détermination du niveau moyen et fournit une estimation de sa variation relative.

Une étude plus approfondie est faite sur le marégraphe de Brest, marégraphe de référence possédant une longue série temporelle de mesures.

### **1.1. QUELQUES DEFINITIONS INDISPENSABLES (d'après Bessero, 1985)**

Le **niveau moyen** de la mer varie localement. C'est le niveau autour duquel la mer oscille au rythme de la marée.

La **marée** est définie comme le mouvement d'oscillation, à allure périodique, du niveau de la mer dû aux seuls effets des astres (lune et soleil) sur les masses des océans. C'est pourquoi, elle est régulière et connue avec précision aujourd'hui.

Pour les annuaires de marée, la précision des prédictions est de l'ordre de quelques centimètres pour une hauteur et de quelques minutes pour le temps, ceci étant dû aux imperfections des calculs de prédiction et de celles des observations.

En France métropolitaine, la marée observée, du type semi-diurne, comprend au cours d'une journée deux pleines mers et deux basses mers, ayant sensiblement les mêmes hauteurs et se succédant à intervalles à peu près réguliers : ce type de marée est dit semi-diurne. Sa durée d'observation réelle est de 24 h 50 mn (durée du jour lunaire).

La marée est en fait la résultante d'un certain nombre d'ondes, de périodes et d'amplitudes variables (sur lesquelles se base la théorie harmonique des marées). Leur vitesse de propagation dépend de la profondeur des fonds marins : une perte d'énergie intervient pour surmonter la résistance due aux frottements sur le fond des forts courants marins.

Les ondes principales sont les suivantes (les amplitudes données ici correspondent aux ondes de marée de Brest) :

- l'onde semi-diurne comprenant :
  - . l'onde semi-diurne lunaire de période 12 h 25 mn, d'amplitude 2160 mm,
  - . l'onde semi-diurne solaire de période 12 h, d'amplitude 755 mm ;
- l'onde diurne comprenant :
  - . l'onde diurne lunaire de période 24 h 50 mn, d'amplitude 67 mm,
  - . l'onde diurne solaire de période 24 h, d'amplitude 65 mm ;
- les ondes lunaires à longues périodes, mensuelles et semi-mensuelles d'amplitudes respectives 29 et 15 mm ;
- les ondes solaires à longues périodes, annuelles et semi-annuelles d'amplitudes respectives 58 et 66 mm ;
- les ondes moins importantes appelées ondes supérieures et ondes composées de périodes  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $1/6$  et  $1/8$  de jour.
- certains auteurs citent une onde de période 93 ans, mais elle n'a encore jamais été détectée. On peut donc douter de son existence. Par contre, une onde de période voisine de 200 ans semble avoir été perçue, mais elle est noyée dans le bruit (signal incohérent qui n'émerge pas sur une longue période d'observation) ;
- une onde très faible de période 18 ans  $2/3$ , dite nodale, est également citée. Or cette onde n'a pas le profil d'une onde de marée, car elle est instable (tabl. 1) : les valeurs de l'amplitude et de la phase de l'onde devraient être égales au cours du temps. L'onde serait donc noyée dans le bruit.

Année	Amplitude en cm	Phase en degrés
1870	4,06	242,14
1890	2,04	295,50
1910	6,41	199,12
1930	1,29	249,36

Tabl. 1 - Caractéristiques de l'onde dite nodale - d'après le SHOM.

Un **observatoire** est l'ensemble des appareils de mesure (échelles, marégraphes) situés dans un même site, pour l'observation et la mesure des hauteurs d'eau. Un observatoire peut être dit permanent ou temporaire (pour une mission hydrographique de quelques mois ou semaines en général, les séries d'observation sont donc très courtes).

Le **zéro hydrographique** correspond à la surface à partir de laquelle sont comptées, positivement vers le zénith, les hauteurs d'eau et vers le nadir, les sondes portées sur les cartes marines. L'addition de la sonde et de la hauteur d'eau à un instant donné donne la profondeur.

L'Organisation Hydrographique Internationale le présente ainsi : "Le niveau de référence pour les marées sera le même que le niveau de référence pour les sondes sur cartes et il sera choisi assez bas pour que la mer ne descende que rarement au-dessous de lui." A partir de cette définition imprécise, chaque pays adopte et adapte la définition d'un zéro hydrographique au mieux. Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (autorité française compétente) le fixe approximativement un peu plus bas que le niveau des plus basses mers astronomiques.

Sauf cas exceptionnel, le zéro hydrographique reste immuable pour un lieu donné. Il diverge cependant à chaque observatoire en fonction de la topographie des fonds marins, et est rapporté à des repères terrestres par nivellement géométrique. La figure 1 montre la cote du zéro hydrographique pour quelques ports bretons.

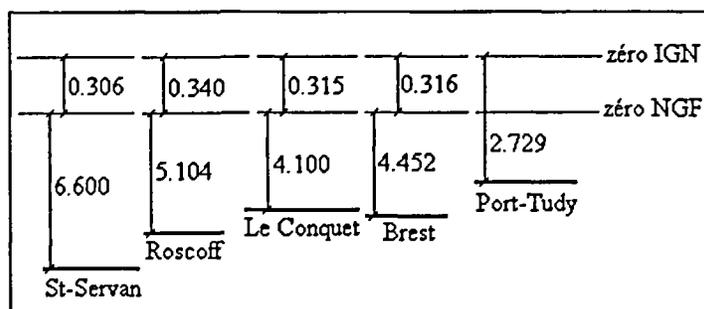


Fig. 1 - Cotes (en mètre) du zéro hydrographique pour différents ports de Bretagne.

*Remarque :*

*Le zéro hydrographique de l'observatoire de Brest est situé 50 cm trop bas par rapport aux niveaux des plus basses mers. Ce fait est connu depuis un certain nombre d'années et va être corrigé en 1996.*

Le **niveau moyen** d'un observatoire est le niveau autour duquel la mer oscille selon le rythme de la marée. Il est généralement **calculé et non observé**. Il est obtenu en moyennant les hauteurs horaires. La moyenne prise sur vingt-quatre heures est le niveau moyen journalier, sur un mois le niveau moyen mensuel et sur un an le niveau moyen mensuel.

La marée astronomique en France est de 24 h 50 mn. Afin de ramener les grandeurs à l'échelle de la journée (24 heures), un filtrage sur les données brutes d'observation est effectué ; il permet d'éliminer l'effet de la marée. Chaque autorité nationale responsable des prédictions de marée applique son propre filtre (le SHOM, en France, utilise le filtre de Demerliac). La marée astronomique est très bien connue et le résultat du filtrage est en général très bon.

Il faut noter que ce filtrage n'épure pas complètement la marée et laisse passer les ondes supérieures à 72 heures. Ces dernières ne représentent qu'un résidu infime de la marée, de l'ordre de 1 ‰, soit moins de 0,2 mm pour l'ensemble des ondes de la marée.

## **1.2. CAUSES DE VARIATION DU NIVEAU DE LA MER**

Les origines des variations du niveau de la mer sont multiples (astronomique, météorologique, géologique,...). Les variations du niveau de la mer s'étendent sur des échelles spatiales et temporelles très variables, de quelques dizaines de mètres à quelques milliers de kilomètres, avec des périodes s'étendant de la journée au million d'années.

Elles correspondent, pour une partie, aux ondes de marée décrites précédemment, et pour une autre partie à d'autres facteurs regroupés sous l'appellation de "niveau moyen" ou "variations accidentelles" selon les auteurs. Ainsi, on peut définir la variation instantanée  $\Delta$  du niveau de la mer par la relation :

$$\Delta = \text{marée} + \text{"niveau moyen"}$$

Si la marée est bien connue pour les ondes de courtes périodes, les variations accidentelles, d'origine diverse, en particulier météorologique, sont apériodiques ou très mal connues.

### 1.2.1. La marée

Il s'agit d'un phénomène régulier dont les ondes à courtes périodes (moins de 72 heures) sont filtrées. Son amplitude, fonction du site, est de quelques mètres (2 m environ en Atlantique, 4 à 6 m en Manche).

Le filtrage supprime les courtes longueurs d'onde et laisse apparaître les ondes à longues périodes. Des modèles mathématiques fournissent des valeurs (tabl. 2) pour les variations dues aux différentes ondes résiduelles, qui sont fonction de la latitude. Pour la France qui est environ à 45° de latitude nord, la variation peut atteindre 3 cm (Valley, 1980).

Latitude	40°	50°
onde nodale	- 5,0	- 17,0
onde solaire annuelle	- 0,3	- 0,8
onde solaire semi-annuelle	- 1,6	- 5,0
onde lunaire mensuelle	- 7,3	- 22,6

Tabl. 2 - Variations (en mm) du niveau moyen dues aux ondes de longues périodes.

Ces valeurs restent cependant théoriques. Les observations faites sur les enregistrements du marégraphe de Brest apportent des éléments concrets :

- l'onde nodale semble inexistante ou plutôt indétectable ;
- l'onde solaire est en fait une onde essentiellement d'origine météorologique. Elle n'a pas le caractère propre d'une onde gravitationnelle, mais elle a néanmoins une période constante que l'on détecte dans les observations et qui lui vaut d'être une constante harmonique de la marée ;
- l'onde lunaire semi-mensuelle a une amplitude de 1 cm ;
- l'onde lunaire mensuelle est en réalité noyée dans le bruit, c'est-à-dire qu'elle n'apparaît pas dans les analyses de longues périodes (120 ans d'observation).

### 1.2.2. Les effets météorologiques

Ils peuvent jouer un rôle considérable et deux effets majeurs sont à retenir :

- les contraintes exercées par *la pression atmosphérique*. Son effet est statique et apériodique : l'océan se comporte comme un baromètre inversé avec une élévation de 1 cm pour une diminution de pression de 1,005 mbar.

$$\Delta h = - \Delta p / \rho g \quad \text{avec : } \rho, \text{ densité de l'eau de mer}$$
$$g, \text{ accélération de la gravité}$$

Concrètement, le phénomène est de l'ordre de 1 à 10 cm avec des échelles temporelles variant du jour à la semaine. Cet effet existe pour les océans, mais il est moins appréciable le long des côtes car il est corrélé aux vents. Il devient alors difficilement détectable.

- *le vent*, qui exerce des forces de frottement sur la surface de la mer et fournit de l'énergie mécanique aux masses d'eau, induit des courants et des variations du niveau de la mer pouvant provoquer à la côte d'importantes surcotes ou décotes.

En zones côtières et de façon générale, un vent soufflant de la terre vers le rivage fait baisser le niveau de l'eau (en Atlantique la réduction peut atteindre 60 cm), et un vent soufflant de la mer vers la terre le fait monter (la surcote peut atteindre 1,50 m).

Ces deux effets combinés sont la cause de certains phénomènes tels :

- les *houles* et *vagues* qui s'étendent sur quelques centaines de mètres et de période de quelques secondes ;
- les *seiches*, phénomènes locaux et périodiques de courte durée (5 mn à 1 h), dus généralement au vent et à la pression dans les sites de configuration particulière, tels les bassins. L'onde est piégée dans une aire marine de topographie encaissée, dont les dimensions sont à l'origine du phénomène de résonance. L'amplitude peut varier de 5 à 20 cm.

Ces deux phénomènes, de période faible, sont facilement filtrés et n'altèrent donc pas le niveau moyen ;

- les *effets saisonniers* se retrouvent dans les niveaux moyens mensuels. Leur amplitude peut dépasser 20 cm. Il s'agit en réalité d'ondes solaires annuelles et semi-annuelles à longues périodes ;

- les *ondes de tempête*, phénomènes de grandes amplitudes pouvant atteindre 5 m, à courtes périodes (1 à 12 h) apparaissent comme un phénomène aléatoire impossible à filtrer.
- les *tsunamis*, de période variable de 8 mn à 30 mn, qui sont des raz de marée faisant suite à une brusque déformation locale de l'écorce terrestre sous-marine (séisme ou éruption volcanique) se propagent à travers l'océan. Faible par grande profondeur, l'amplitude, qui augmente quand la profondeur diminue, provoque de véritables catastrophes sur les côtes (ann. 7).

D'autres phénomènes viennent perturber le niveau moyen :

- l'*effet Chandler* : phénomène périodique en moyenne de 434,6 jours  $\pm$  1,9 jours, dû au déplacement de l'axe de rotation de la terre qui modifie le potentiel de la force d'attraction centrifuge, et engendre des oscillations du niveau moyen. Son amplitude est comprise entre 3 et 59 mm (Valley, 1980). Mais on doit remarquer que cet effet n'a jamais été mis en évidence sur les observations de Brest. Faible, il est sans doute noyé dans le bruit ;
- l'*évaporation* diminue le volume des océans, tandis que les *précipitations* et la *décharge des fleuves* accroissent son volume, mais la masse d'eau dans l'ensemble des océans reste pratiquement inchangée sur une période assez longue. L'équilibre établi par ces trois facteurs est conservé ;
- les *ondes de Rossby*, circulation océanique de période 100 jours, ondes que l'on retrouve dans les océans, et qui est liée à Coriolis (il lui faut 4 à 5 ans pour traverser l'océan Atlantique).

Deux effets importants interviennent également sur de grandes échelles :

- les *mouvements de la croûte terrestre* de nature épirogénique (mouvements à échelle régionale) ou eustatique (mouvements à échelle mondiale). A des échelles plus locales, il peut aussi y avoir des phénomènes de compaction sédimentaire par drainage des aquifères côtiers (cas de la côte néerlandaise) ou urbanisation poussée ;
- les *effets climatiques*, tel le réchauffement par effet de serre qui ferait fondre les glaces des calottes glaciaires.

Ces deux derniers effets qui peuvent ne pas être totalement indépendants (rebond élastique par exemple liés à la fonte de la calotte glaciaire) ont une échelle qui dépassent largement le siècle.

Signal	Période	Amplitude	Signal filtré ou corrigé
<b>Marée</b>			
Ondes semi-diurnes principales	12h - 12h 25mn	75 cm - 216 cm *	oui
Ondes diurnes principales	24h - 24h 50mn	6,7 cm - 6,5 cm *	oui
Ondes lunaires à longues périodes	mensuelle - semi-mensuelle	de 1 à 3 cm *	non
Ondes solaires à longues périodes	annuelle - demi-annuelles	de 5 à 8 cm *	non
Ondes composées	1/3 - 1/4 - 1/6 - 1/8 de jour	de 1 à 5 cm *	oui
Autres ondes	> 72 h	> à 1 cm *	oui
	< 72 h	> à 1 cm *	non
<b>Effets météorologiques (pression-vent)</b>			
Pression atmosphérique (effet de baromètre inversé)	jour - semaine	1 à 10 cm (1 cm pour 1,005 mbar)	non
Houles et vagues	quelques secondes	quelques cm	oui
Seiches	5 mn à 1 h	5 à 20 cm	oui
Effets saisonniers	annuelle	jusqu'à 40 cm	non
Ondes de tempêtes	1 à 10 jours	10 à 100 cm	non
Tsunamis	8 mn à 30 mn	faible en eau profonde (jusqu'à 1 m)	non
<b>Autres effets</b>			
Effet Chandler	434,6 jours ± 1,9 jours	3 à 59 mm	non
Mouvements de la croûte terrestre	de l'instantané à plusieurs millions d'années		non
Effets climatiques	plusieurs siècles		non

Les valeurs suivies d'un astérisque \* correspondent aux ondes de marée à Brest.

Tabl. 3 - Causes principales de variation du niveau de la mer.

**Remarque :**

*On constate une différence notable entre les variations du niveau des mers le long des côtes et dans les océans. En zones côtières, les caractéristiques de la marée sont directement influencées par la morphologie des fonds marins, tandis qu'en zone océanique, le vent joue un rôle primordial.*

**1.2.3. Récapitulatif**

Le tableau 3 récapitule l'ensemble des signaux décrits dans les paragraphes précédents. Les signaux non filtrés ou non corrigés apparaissent dans les niveaux moyens annuels et mensuels, selon la période du signal considéré. Il faut rappeler que les ondes à faibles amplitudes sont noyées dans le bruit et sont donc difficilement détectables.

**1.3. MESURE DU NIVEAU DE LA MER**

L'évolution des méthodes d'observation du niveau de la mer a dépendu des besoins et des technologies disponibles. Manuelles avec l'observation régulière des échelles de marée, elles sont devenues de plus en plus précises et automatisées.

**1.3.1. Echelle de marée**

L'échelle a été le premier moyen mis en oeuvre pour mesurer des hauteurs d'eau. Elle se présente généralement telle une mire graduée de 10 en 10 cm, de 6 m de long où seules les cotes métriques sont indiquées. Son talon doit impérativement être au-dessous des plus basses mers pour une observation complète de la marée. Elle est lue par un observateur tous les quarts d'heure, si des séries continues sont exigées.



Fig. 2 - Echelle de marée.

Si l'échelle est fixée contre un quai incliné, par exemple, elle présente un certain fruit  $\alpha$  (angle par rapport à la verticale) qui doit être déterminé afin d'apporter aux lectures une correction systématique.

La correction  $\Delta\ell$  est :  $\Delta\ell = \ell - h = \ell (1 - \cos\alpha)$   
avec  $\ell$ , la graduation lue

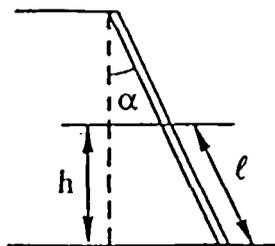


Fig. 3 - Correction du fruit de l'échelle.

### Protocole des mesures

L'observateur inscrit sur un carnet la lecture faite sur l'échelle, ainsi que l'heure exacte de sa lecture. Il mentionne également la date de l'observation, le système horaire utilisé, et toutes remarques permettant d'apprécier la mesure (état de la mer par exemple).

### Rôle actuel de l'échelle

Depuis l'apparition des appareils analogiques au milieu du XIXe siècle, l'échelle n'est plus utilisée en France pour mesurer les hauteurs d'eau. Elle reste cependant l'instrument fondamental d'un observatoire de marée. En effet, son zéro doit correspondre au zéro hydrographique et sert de référence pour les observations sur les appareils plus sophistiqués situés à proximité. Elle permet le calibrage et le contrôle des hauteurs mesurées par ces appareils.

#### 1.3.2. Marégraphe à flotteur

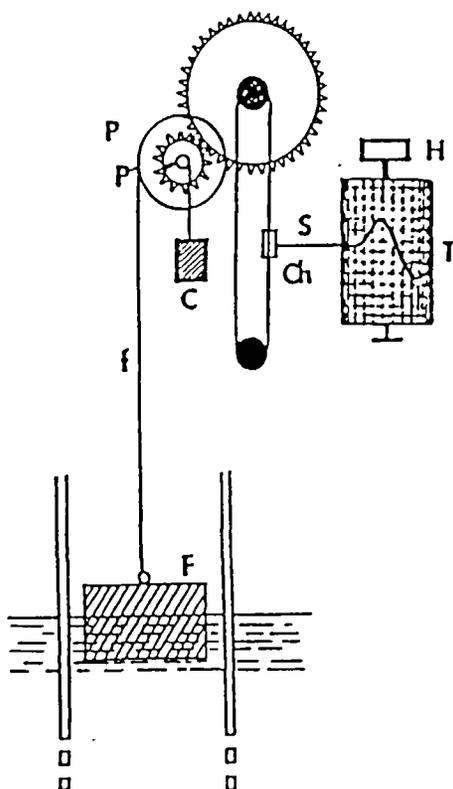
Pour obtenir des données plus fiables en éliminant une main-d'oeuvre continuelle sur le site, l'ingénieur hydrographe Chazallon vers 1842 a mis au point le premier appareil analogique de mesure des hauteurs d'eau : le marégraphe à flotteur. Cet appareil fournit des enregistrements continus du niveau de la mer. C'est encore aujourd'hui l'instrument de mesure le plus répandu.

a) Description du mécanisme d'un marégraphe traditionnel (Simon, 1994)

Dans ce type d'appareil, les variations de hauteur d'un flotteur sont transmises par l'intermédiaire d'un fil et d'engrenages démultiplicateurs à un stylet qui permet l'enregistrement sur un tambour animé d'un mouvement de rotation régulier. Le temps est donc obtenu par la rotation du tambour sur lequel est fixée la feuille. La tension du fil est assurée par un contrepoids ou un ressort.

On obtient ainsi une représentation analogique de la hauteur en fonction du temps. Généralement, le tambour fait un tour complet en 24 heures (soit une durée de révolution de 16 mm/h pour un tambour de circonférence 384 mm), plus rarement en une semaine. Il est recommandé de remonter le système horloger à chaque changement de feuille (fig. 4).

Le flotteur est situé dans un puits de tranquillisation relié à la mer par un petit orifice. Cet orifice a pour rôle de filtrer les ondes de courtes durées (houle, clapotis, vagues) qui constituent un bruit de fond sur l'enregistrement. Le puits est généralement surmonté d'un abri et le tout constitue une protection efficace contre les intempéries.



F : flotteur dont le fil de suspension, f, s'enroule autour de p.

C : contrepoids dont le fil de suspension s'enroule autour de p' lié rigidement à p de façon à assurer la tension de f.

Ch : chariot porte stylet.

S : stylet

T : cylindre sur lequel est placée une feuille de papier.

H : horloge (en général mécanique).

Fig. 4 - Principe d'un marégraphe à flotteur (in : Les marégraphes côtiers, B. Simon, 1984).

Relativement onéreux, ce type d'appareil présente le défaut de nécessiter une grosse structure verticale. Son installation est parfois impossible, car le choix du site d'implantation est primordial pour la qualité des données.

### ***b) Protocole des mesures***

Lors de la mise en place de la feuille d'enregistrement, l'opérateur effectue simultanément le calage en hauteurs et en temps en plaçant la plume sur la graduation correspondante à la hauteur lue sur l'échelle ou sur un jaugeur, et sur la graduation correspondante à l'heure d'une montre exacte.

La feuille est alors installée pour plusieurs jours (une à deux semaines en général) et ne doit ni être déplacée, ni enlevée, même si l'opérateur constate une erreur de calage. Les corrections seront apportées ultérieurement sur l'ensemble du marégramme.

Après sa mise en place, des contrôles réguliers sont effectués dans la semaine. Ils permettent de détecter les dérives horaires ou spatiales possibles. A titre d'exemple, la feuille d'enregistrement du marégraphe de Brest est mise en place pour une durée de sept jours et les contrôles se font trois fois par semaine.

Le contrôle est double. Il consiste d'une part, à comparer la hauteur d'eau inscrite sur le marégramme avec celle mesurée sur l'échelle de marée ou sur un jaugeur et d'autre part, à comparer l'heure d'une montre exacte avec celle indiquée par le style sur l'enregistrement. Les valeurs observées sont inscrites sur une feuille de contrôle.

Le contrôle n'est valable que s'il est régulier et effectué avec soin.

### ***c) Les appareils actuels***

Les marégraphe analogiques, de type OTT 20030 que l'on trouve sur le site de Brest, sont encore utilisés de nos jours et fournissent toujours les observations de la marée.

Des doublements de l'enregistrement sur papier par un enregistrement numérique ont été réalisés dans différents observatoires. Ceci élimine uniquement les erreurs de calage et non les erreurs liées aux engrenages, fils et puits.

Pour améliorer la qualité des observations, les marégraphe à flotteurs sont en cours de remplacement par des appareils numériques à ultrasons. Ces appareils effectuent des mesures dans l'air avec une précision centimétrique. Ils ont l'avantage de pallier les erreurs humaines rencontrées jusque là.

### 1.3.3. Traitement des observations

Les observations sont recueillies sur support papier, sous forme de courbes appelées marégramme. Leurs axes sont définis lors du calage : les hauteurs d'eau sont fonction du temps (fig. 5).

Sur une feuille d'enregistrement sont généralement tracées plusieurs courbes : elles ne se chevauchent pas puisque la durée de la marée astronomique est supérieure à la révolution du tambour enregistreur. Les marégrammes sont, sauf cas rares, exploitables. L'échelle de cette feuille est déterminée en fonction du cylindre enregistreur de l'appareil, et surtout en fonction du marnage de la marée (différence entre les pleines et basses mers).

#### *Remarque :*

*Si le zéro instrumental est différent du zéro hydrographique, une correction est apportée à chaque hauteur d'eau mesurée :*

$$H_c = H + (\varnothing_e - \varnothing_i)$$

avec :  $H_c$ , hauteur d'eau corrigée  
 $H$ , hauteur d'eau mesurée  
 $\varnothing_e$ , zéro de l'échelle  
 $\varnothing_i$ , zéro instrumental

Le **dépouillement** consiste en un contrôle visuel du marégramme par rapport à la feuille de contrôle de l'observatoire. Cette opération est essentielle. Elle permet de détecter les erreurs de calage horaire et, de les corriger si nécessaire. Une mauvaise interprétation de la feuille de contrôle ou une feuille mal remplie peut être une cause d'erreur.

La **numérisation** se déroule en plusieurs phases :

- lissage manuel de la courbe de marée. Ce lissage à vue élimine les irrégularités à courtes périodes. L'interprétation peut s'avérer délicate lorsque la marée présente un bruit important (pouvant atteindre 1m dans certains cas). L'opérateur est alors seul juge du tracé ;
- numérisation des points horaires de la courbe. Elle doit prendre en compte les corrections déterminées lors des calages. Les points digitalisés constituent alors un fichier informatique de données brutes ;
- contrôle de l'opération de digitalisation. Un traitement informatique permet de détecter les points numérisés qui sortent d'une plage fixée par l'opérateur, plage qui est fonction du marnage et qui se situe de part et d'autre de la courbe moyenne. Les hauteurs "anormales" sont identifiées, examinées et corrigées si nécessaire ;

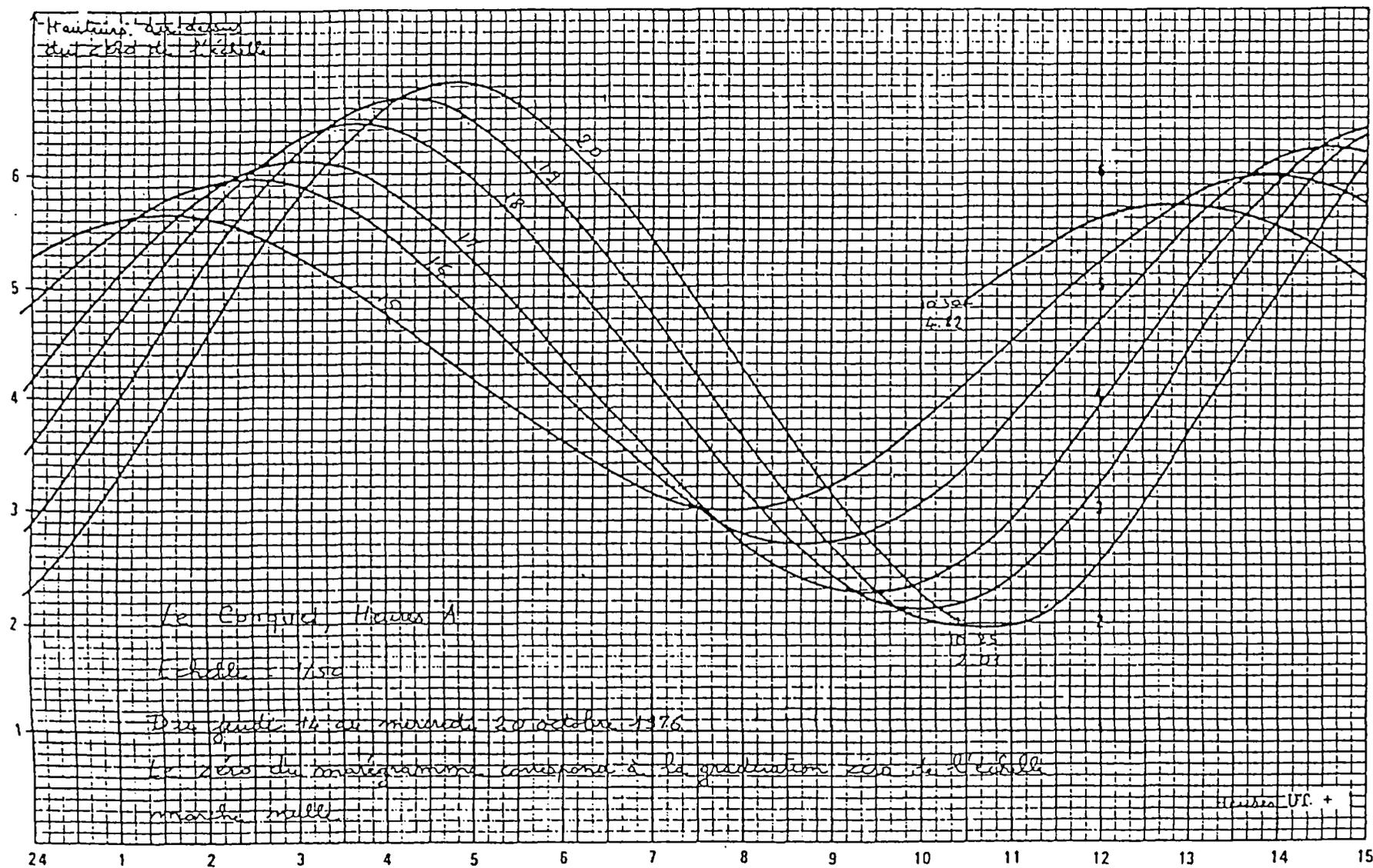


Fig. 5 - Extrait d'un marégramme renseigné (SHOM).

- à partir des fichiers informatiques, les données horaires sont filtrées pour permettre le calcul des niveaux moyens.

Le dépouillement et la numérisation sont des opérations longues : une semaine de travail pour une seule année d'observation.

#### **1.4. ERREURS LIEES AUX INSTRUMENTS ET A LA NUMERISATION**

Les erreurs dans la détermination du niveau moyen peuvent exister à plusieurs niveaux : certaines sont inhérentes aux instruments de mesure utilisés, d'autres apparaissent lors du dépouillement et de la numérisation.

##### **1.4.1. Echelle de marée**

###### ***a) Erreurs***

Les erreurs que l'on peut rencontrer sont :

- le défaut de verticalité de l'échelle (fruit non déterminé ou non détecté, oubli d'apporter la correction nécessaire...);
- les fautes de transcription sur la feuille de contrôle de l'observatoire ;
- les fautes de lecture commises par l'observateur (erreur de carreau), si l'échelle est vue sous un angle trop aigu, par exemple.

###### ***b) Qualité des observations***

Les lectures sont faites à 5 cm près en raison des clapotis et des vagues. Pour atteindre une bonne précision du niveau moyen, de nombreuses observations s'avèrent indispensables et bien suivies.

La précision de la mesure est essentiellement fonction de la mise en place de l'échelle, de l'état de la mer et surtout du sérieux de l'observateur. Ce caractère humain est le plus contesté et celui que l'on rencontre le plus dans la littérature passée : l'un des soucis majeur était de trouver une main-d'oeuvre consciencieuse.

##### **1.4.2. Marégraphe à flotteur**

Les marégraphes à flotteurs sont la source presque exclusive des enregistrements historiques de marégraphie disponibles actuellement dans le monde.

Le marégraphe à flotteur a pour avantage d'éliminer la présence continue d'un observateur sur le site. Cependant, il souffre d'un certain nombre de défauts associés aux mécanismes, au puits de tranquillisation et à la numérisation des marégrammes.

***a) Erreurs inhérentes au mécanisme de l'appareil***

Certaines erreurs sont liées au mécanisme proprement-dit :

- jeu des engrenages (après usure) ;
- corrosion du flotteur et présence d'organismes marins sur le flotteur ;
- allongement du fil du flotteur, saut des fils en dehors des réas ;
- dérapage du stylet, manque d'encre ;
- feuille mal fixée au cylindre (extrémités non jointives ou se recouvrant).

Outres ces imperfections, qui restent rares et souvent négligeables, deux catégories majeures d'erreurs sont à retenir :

- d'une part, celles qui concernent *la mesure de la hauteur* :
  - . mauvais calage de la feuille lors de sa mise en place. Par exemple, si l'échelle de réduction de la feuille d'enregistrement est 1/25 (marnage de 5 m), un mauvais calage de 0,5 cm crée une erreur de 12,5 cm sur les hauteurs,
  - . jeu du papier sous l'action des variations d'humidité ou de température, ce qui provoque une modification de l'échelle des hauteurs ;
- d'autre part, les erreurs concernant *la mesure du temps* :
  - . mauvais calage horaire de la feuille lors de sa mise en place,
  - . feuille mal adaptée au support,
  - . variation importante de la marche de l'horloge,
  - . défaut des engrenages d'entraînement du tambour faisant varier sa vitesse de rotation.

Les erreurs de calage présentent un caractère systématique. Ce sont donc les plus difficiles à mettre en évidence. Les erreurs sur le temps peuvent être détectées et donc corrigées puisque le cycle de la marée est parfaitement connu. Par contre, les erreurs sur la mesure des hauteurs sont plus difficilement détectables et ne le sont que lorsqu'elles deviennent très importantes.

***b) Défauts inhérents au puits de tranquillisation***

Le rôle du puits, comme nous l'avons vu précédemment, est de filtrer la marée. Or ce filtre n'est pas linéaire : la marée est déformée et les observations brutes sont faussées.

Le puits n'est en réalité qu'un simple manomètre : il équilibre les pressions internes et externes au puits et non les niveaux d'eau.

La réponse du puits de tranquillisation est assujettie à différentes erreurs. On retiendra les erreurs liées à l'appareil et sa structure telles, la dimension relative du puits et de l'orifice, la taille du flotteur et la forme de l'orifice.

Quant aux facteurs externes, on peut citer :

- le *fouling*, c'est-à-dire le développement de vie marine au voisinage de l'orifice ou dans le puits, et l'*envasement* au niveau de l'orifice. Ils provoquent une diminution du diamètre de l'ouverture et en conséquence modifient la réponse du puits ;
- la *différence de densité entre l'intérieur et l'extérieur du puits*, qui crée un phénomène de stratification, car le renouvellement de l'eau n'est pas continu. Ce fait est d'autant plus important lorsque le marégraphe est implanté à proximité de l'embouchure d'un cours d'eau. Dans une rivière à marée, à basse mer le puits renferme une eau fluviale plus légère ; avec le flux l'eau océanique, plus dense, soulève cette eau et crée une eau moins dense à l'intérieur du puits. On a pu constater des écarts en hauteur supérieurs à 6 cm à cause de ce phénomène ;
- la présence ou l'absence de *vagues* et de *courants*. Si les courants sont faibles, le problème ne se pose pas : la déformation est négligeable et la réponse du puits est quasiment linéaire. Mais en présence de courants supérieurs à 1,25 noeuds (soit 0,6 m/s) le puits renvoie une réponse non linéaire et provoque une diminution du niveau d'eau interne, appelée "drawdown". Cet abaissement peut atteindre 10 à 15 cm pour des vagues importantes. De même un courant perpendiculaire à l'axe de l'orifice provoque un abaissement du niveau d'eau qui peut atteindre 18 cm pour un courant de 3 noeuds, soit de 1,5 m/s ;

Ces deux derniers points ont un caractère systématique qui affecte le niveau de la mer mesuré.

Il faut noter cependant que ces défauts correspondent à des cas extrêmes. La plupart des marégraphe sont implantés dans des sites protégés, très peu sont exposés à des courants de l'ordre de 4 noeuds (2 m/s) mais plus couramment à des courants de 0,5 m/s. Pour pallier le fouling et l'envasement un entretien régulier du puits et de son orifice serait souhaitable. Il semble cependant que cette démarche ne se fasse pas systématiquement, et ce type d'erreur n'est généralement détecté que lorsqu'elle devient flagrante.

Des modèles d'erreurs ont été établis. Ainsi, des équations mathématiques peuvent être définies pour chaque type d'erreurs. Mais, ces modèles ne sont pas applicables actuellement, car ils reposent sur la détermination de nombreux éléments inconnus et propres à chaque site.

### ***c) Détection des dysfonctionnements de l'appareil***

Il est néanmoins possible d'observer et de déceler certaines erreurs par l'intermédiaire de tests, tel le test de Van de Castele ou par la comparaison de spectres.

Le premier consiste à vérifier la qualité de marche d'un appareil par la vérification précise du calage du zéro instrumental. La méthode exige de faire des relevés avec une sonde à mains, et de comparer les résultats avec les relevés du marégraphe pendant un cycle de marée complet. Un diagramme est ensuite dressé ; sa forme permet de repérer la plupart des défauts de fonctionnement décrits précédemment.

Le second consiste à comparer le spectre (représentation des ondes de marée qui fournit l'amplitude ou l'énergie en fonction de la fréquence) des observations avec celui des prédictions. Les erreurs subsistantes entraînent une modification du spectre d'amplitude qui est déduit des observations. Les erreurs les plus gênantes sont alors celles qui résultent d'un mauvais calage en temps de la feuille. Cette erreur peut être estimée pour chaque journée grâce au spectre des prédictions.

Ces tests permettent de corriger le dysfonctionnement du marégraphe et les observations passées, à condition de définir la date de parution du dysfonctionnement et son évolution.

Si une grande précision n'est pas nécessaire, les marégraphes à flotteur ne requièrent pas un personnel très qualifié pour son entretien et sa mise en oeuvre. Celle recherchée jusqu'à présent est de l'ordre du centimètre. C'est pourquoi, les erreurs inhérentes aux puits de tranquillisation ne sont pas corrigées actuellement.

#### **1.4.3. Précision du dépouillement**

Elle est fonction en grande partie de celle du lissage manuel et de la numérisation. Les programmes de contrôle ne permettent de déceler que les erreurs ponctuelles, de vérifier les observations et éventuellement de les corriger.

La numérisation a l'avantage de supprimer les défauts inhérents à la feuille d'enregistrement. Mais son caractère routinier peut être générateur d'erreurs.

En conclusion, il apparaît quasiment impossible de quantifier les erreurs sur les observations de marégraphie, car elles ont pour la plupart un caractère systématique qui rend leur détection généralement impossible. Nous ne pouvons donc réaliser qu'une étude qualitative. Le tableau 4 résume les différentes erreurs possibles ainsi que leur mode de détection et leur traitement éventuel.

ERREUR	NATURE	MODE DE DETECTION	OBSERVATIONS
<b>ECHELLE DE MAREE</b>			
* Fruit non déterminé	faute	contrôle	Correction des observations si le fruit est déterminé
* Transcription - Lecture	faute	aucune	Eviter par le soin porté à la mesure
<b>MAREGRAPHE A FLOTTEUR</b>			
* Mécanique : Jeu des engrenages - corrosion - dérapage du stylet - saut du fil - feuille mal fixée	accidentelle	test Van de Castele	Évitée par un entretien régulier
* Mesure des hauteurs			
⇨ Calage	systematique	dépouillement (erreur grossière)	Corrigée (si elle est détectée) lors de la numérisation
⇨ Jeu du papier	systematique		Corrigée par la numérisation
* Mesure du temps			
⇨ Calage	systematique	dépouillement, comparaison aux prédictions	Corrigée (si elle est détectée) lors de la numérisation
⇨ Variation de marche de l'horloge	systematique	comparaison aux prédictions	Corrigée (si elle est détectée)
* Puits de tranquillisation			
⇨ Fouling - Envasement	systematique		Eviter par un entretien régulier du puits
⇨ Dimensionnement de la structure - Densité de l'eau (salinité) - Présence de vagues et de courants	systematique		Quantifiée par des modèles mathématiques théoriques - Pas de correction actuellement
<b>DEPOUILLEMENT : Lissage et Numérisation</b>	accidentelle	Programme de contrôle - Comparaison des écarts-types entre observations et prédictions	

Tabl. 4 - Erreurs sur les données du niveau moyen de la mer.

L'étude sur la qualité des données est focalisée sur les deux marégraphes fondamentaux :

- Brest, entretenu par le SHOM, qui sert à la prédiction des marées ;
- Marseille, entretenu par l'IGN, sur lequel est placé le repère qui sert de zéro de référence pour le nivellement de la France.

#### **1.4.4. Etude sur la Bretagne**

Pour une étude qualitative et relative des hauteurs d'eau, deux méthodes peuvent être envisagées :

- la comparaison des niveaux moyens entre observatoires voisins ;
- la comparaison des observations aux prédictions de marée.

##### ***a) Comparaison des niveaux moyens***

Cette méthode consiste à superposer les courbes du niveau moyen de ports voisins. Il est donc préférable de rapporter les hauteurs à une même référence qui peut être le zéro du nivellement national ou une référence choisie arbitrairement.

Les courbes de la figure 6 sont rapportées au zéro du nivellement IGN69, afin de pouvoir les comparer entre elles (l'île de Groix où se trouve Port-Tudy n'a pas été nivelée au temps du nivellement Lallemand).

Il apparaît :

- d'une part, que les fluctuations du niveau moyen restent encore importantes malgré le filtrage du puits et des signaux à courtes périodes ;
- d'autre part, que d'une façon générale les variations vont dans le même sens. Elles sont donc dues à des causes physiques de même origine. Si elles sont opposées, on ne peut cependant pas conclure qu'une erreur de mesure en soit la cause : à une période donnée, les effets météorologiques et les courants peuvent être différents d'un observatoire à l'autre.

L'interprétation graphique, comme le montre les figures 7 et 8, permet néanmoins de connaître la qualité relative des données. La superposition de courbes du niveau moyen permet de déceler les périodes où les observations sont d'une qualité insuffisante par rapport à un autre observatoire : il faut donc émettre un doute sur ces observations. Mais cette hypothèse ne peut être réellement validée que par la comparaison avec un troisième ou d'autres observatoires voisins. Il aurait été intéressant par exemple, de

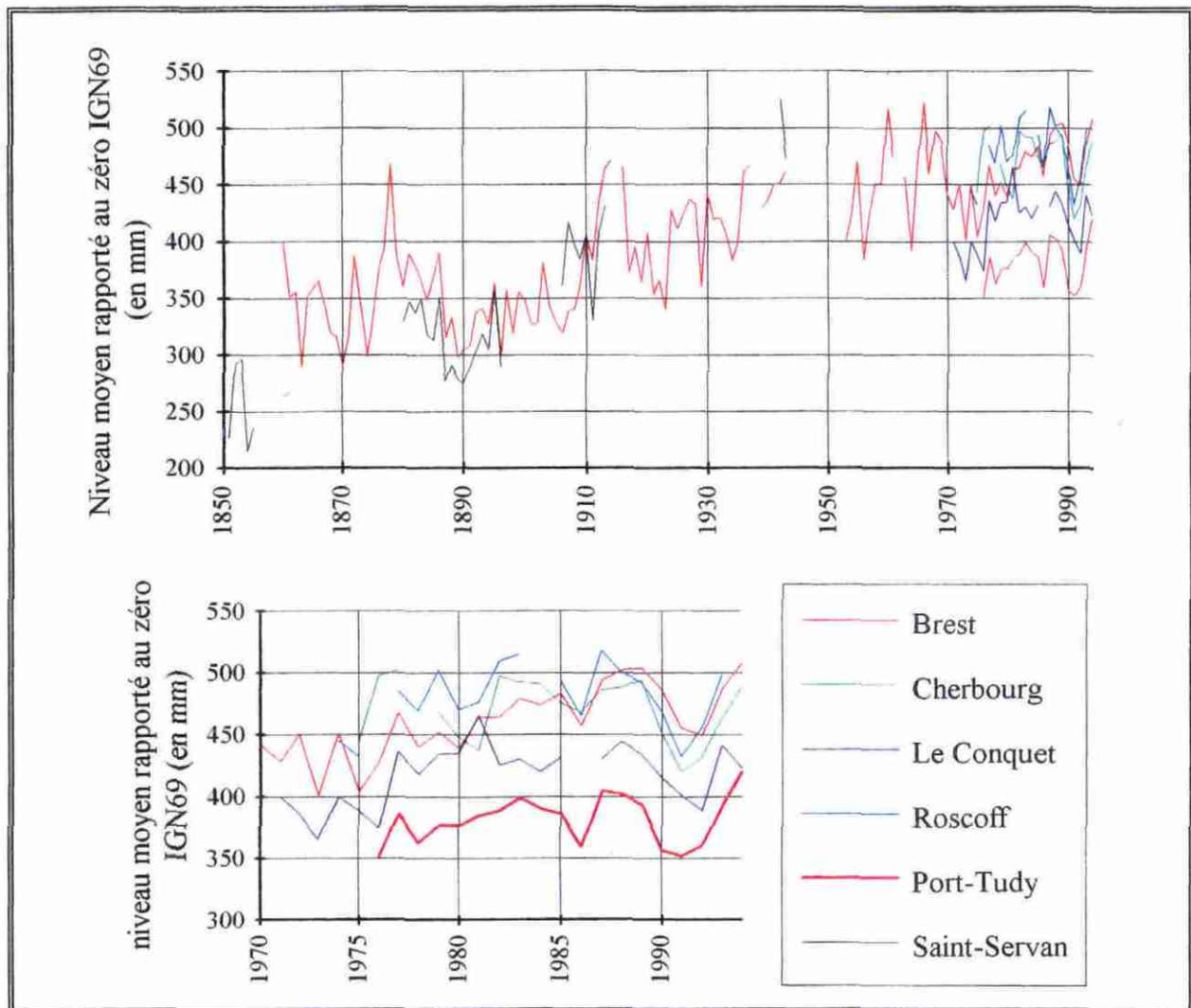


Fig. 6 - Comparaison des variations du niveau moyen annuel en différents lieux de Bretagne et à Cherbourg (données SHOM).



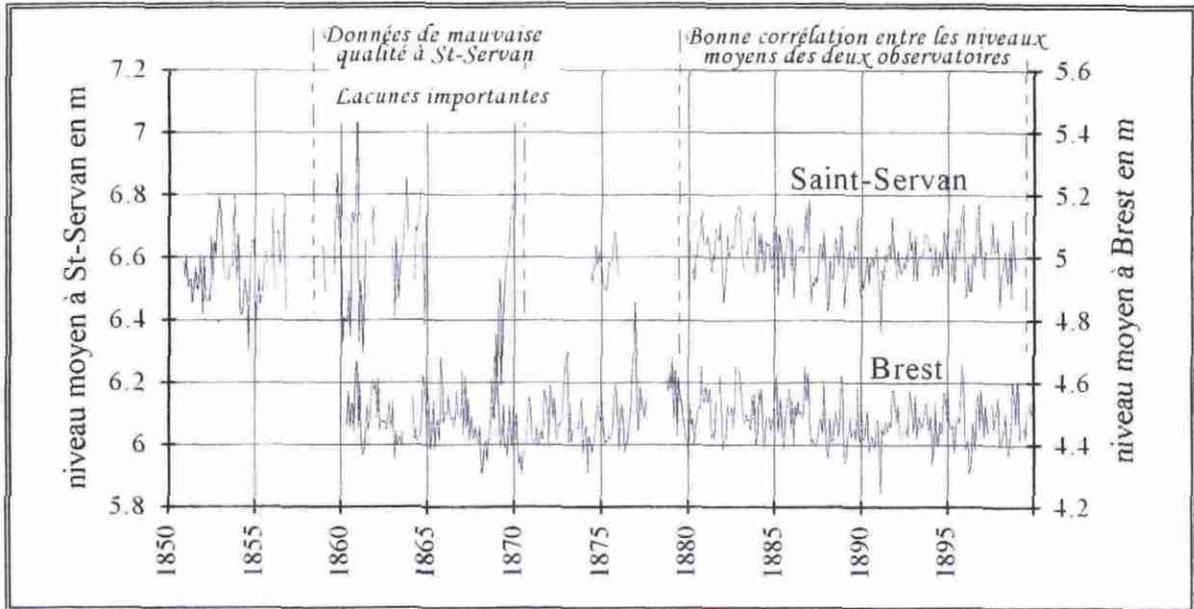


Fig. 7 - Comparaison des variations du niveau moyen entre Brest et Saint-Servan au siècle dernier (données SHOM).

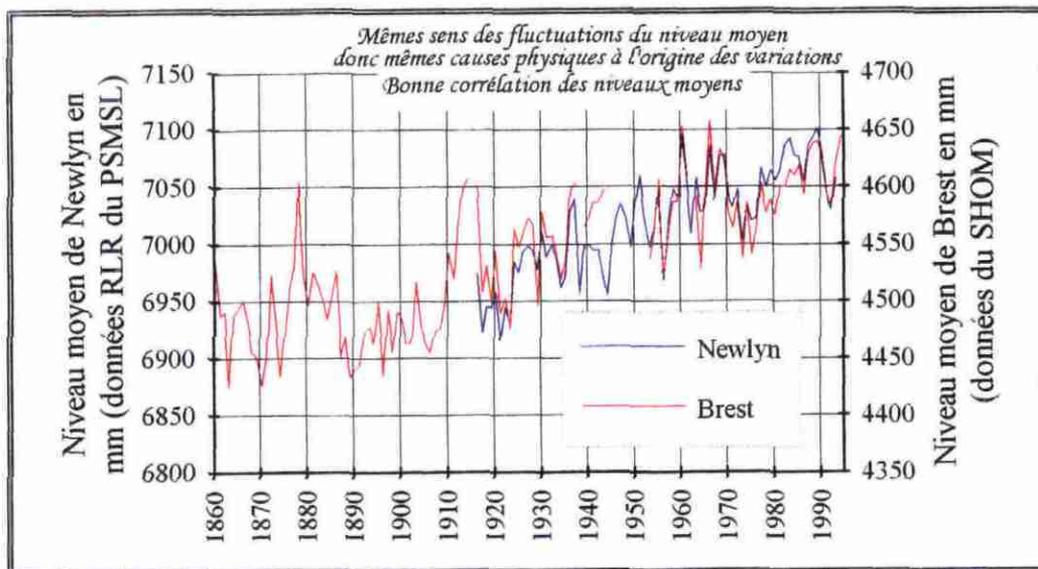


Fig. 8 - Comparaison des variations du niveau moyen annuel entre Brest, données SHOM et Newlyn (données PSMSL).

Il est alors possible de calculer des écarts-types journaliers et annuels des résidus  $r$ , et d'étudier la répartition et les valeurs de ces écarts-types pour un observatoire donné. En effet, on peut admettre d'une façon générale que les causes de variation du niveau de la mer sont constantes au cours du temps (les conditions météorologiques ont guère changées depuis le siècle dernier). En conséquence, si les valeurs de l'écart-type sont grandes, alors on peut considérer que ce sont les "erreurs" qui en sont la cause.

Pour l'observatoire de Brest, on constate que l'écart-type entre observations et prédictions n'est pas constant (fig. 9) au fil des ans. Or, d'une part la technique de mesure n'a pas changé (les observations se font sur marégraphe à flotteur jusqu'en 1984), et d'autre part on peut considérer sans se tromper que les conditions météorologiques ont guère changé. Plus précisément :

- deux nuages de points se distinguent, celui d'après guerre témoigne du manque de vigilance et d'intérêt pour la mesure. Le marégraphe a été détruit en 1940, mais il a été reconstruit en repositionnant le zéro hydrographique correctement et le matériel est de bonne qualité (OTT 20030). Il faut également noter que depuis 1984 les valeurs sont plus faibles et rejoignent les valeurs d'avant guerre. Cette date correspond en fait au changement de mode de mesure de la marée : les observations numérisées ne résultent plus des mesures faites depuis le marégraphe à flotteur mais sont issues d'un marégraphe numérique placé dans le puits de tranquillisation et qui minimise les erreurs humaines.

Il faut également savoir que de 1953 à 1970 et de 1976 à nos jours, les observations ont été effectuées par le personnel du service de la marine. Alors que les observations de 1970 à 1976 ont été faites par le personnel du SHOM. Il semble que ce dernier suivait plus consciencieusement le protocole de mesure que le service de la marine : les écarts-types sur cette période sont plus faibles. Les observations étaient donc de meilleure qualité ;

- certaines valeurs des écarts-types annuels sont surprenantes. Elles correspondent en général à une erreur grossière : numérisation d'une mauvaise courbe, erreur d'un jour, d'une heure ou encore de calage. La figure 9 présente, par exemple, en 1907 une valeur aberrante de l'écart-type annuel. Le tracé (fig. 10) de la courbe de marée numérisé et de celle des prédictions à cette date montre un décalage qui pourrait être dû à une mauvaise numérisation. Il faut alors rechercher le marégramme origine afin de vérifier et de déterminer exactement la cause de l'erreur pour la corriger.

On constate donc, que l'analyse de graphiques représentant la répartition des valeurs de l'écart-type entre observations et prédictions demande souvent de connaître le plus précisément possible l'historique de l'observatoire : changement d'appareillage, modification du support, protocole de mesure et précautions prises.

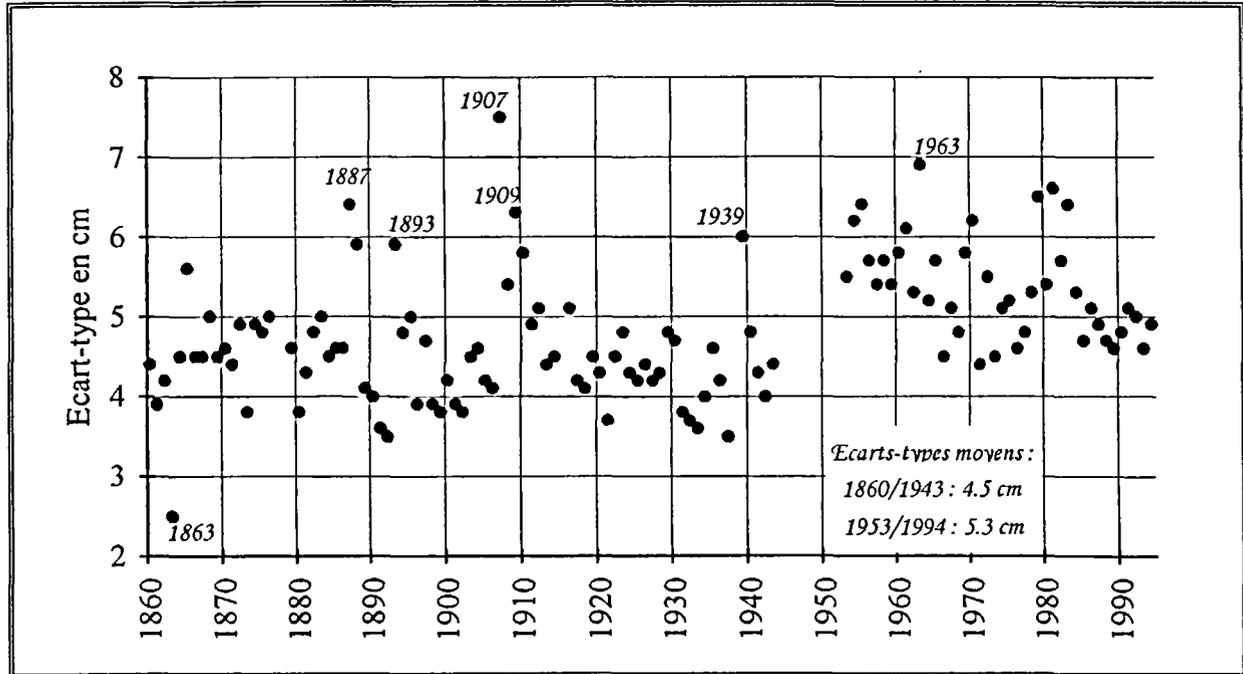


Fig. 9 - Répartition des écarts-types annuels entre observations et prédictions pour l'observatoire de Brest (données SHOM).

Ainsi, pour l'observatoire de Roscoff (fig. 11), on note des valeurs plus faibles de l'écart-type annuel à partir de 1984. Cette date correspond au remplacement du marégraphe à flotteur par un appareil numérique côtier. A Port-Tudy, on pourrait penser la même chose (fig. 12). Or l'appareil est toujours de type analogique, mais en 1979 le marégraphe à flotteur OTT R16 a été remplacé par un marégraphe à flotteur OTT 20030. Ce dernier est plus précis et l'écart-type est donc plus faible, sauf en 1983. Il serait alors intéressant d'étudier de plus près cette année.

L'étude des écarts-types n'est en fait qu'un moyen de contrôle de l'opération de numérisation. La localisation de valeurs fortes de l'écart-type journalier permet de corriger toutes les erreurs grossières et donc d'améliorer le niveau moyen.

Pour un observatoire qui présente une série temporelle suffisamment longue, une valeur moyenne de l'écart-type correspond aux données entachées du moins d'erreurs possibles. L'écart-type jugé correct est fonction du bruit présent sur le site d'observation.

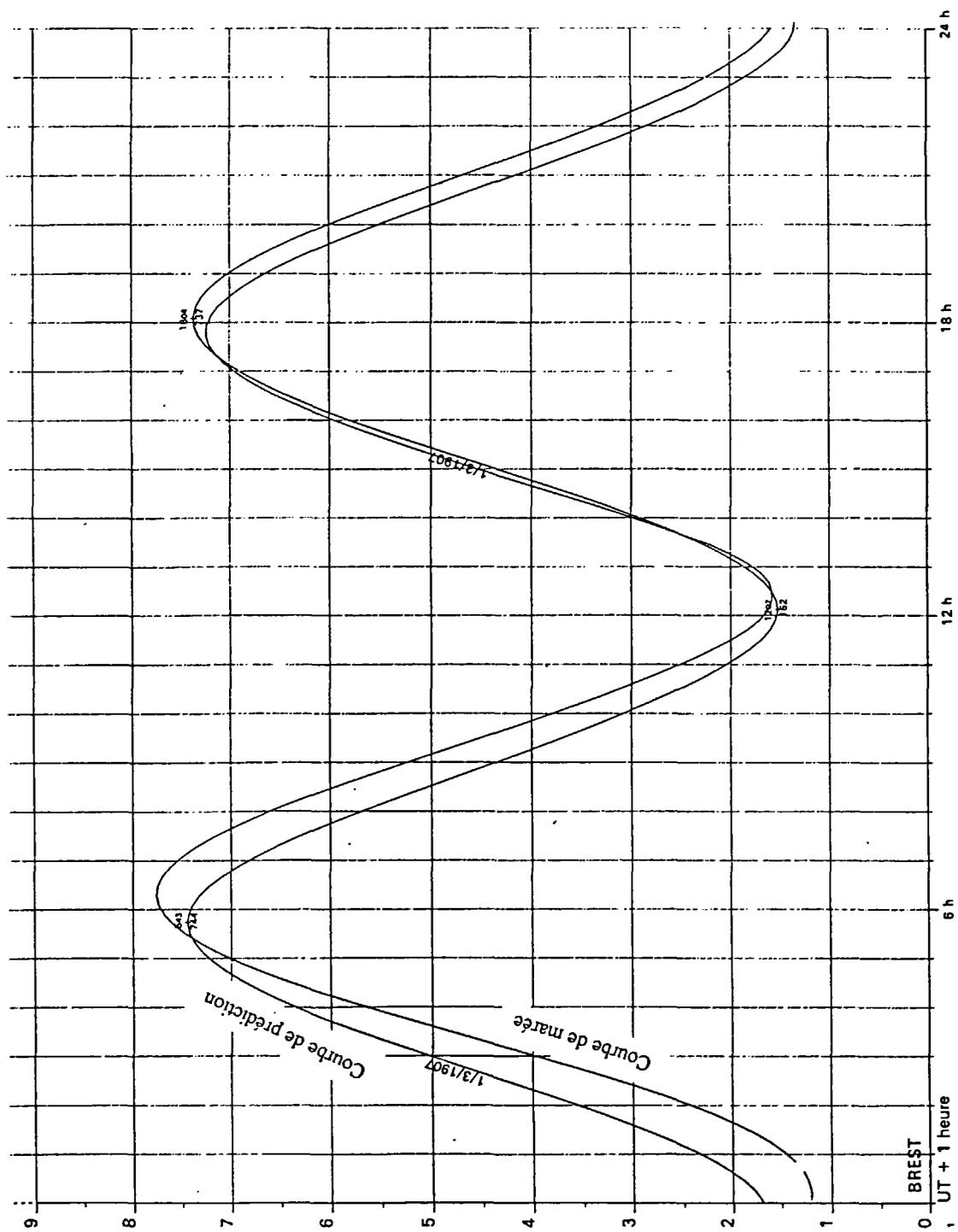


Fig. 10 - Courbes des observations et des prédictions à Brest 28 février 1907 (SHOM).

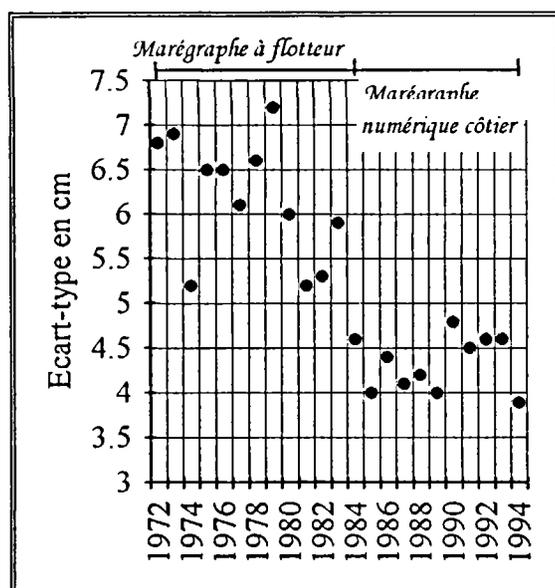


Fig. 11 - Répartition des écarts-types annuels entre observations et prédictions pour l'observatoire de Roscoff.

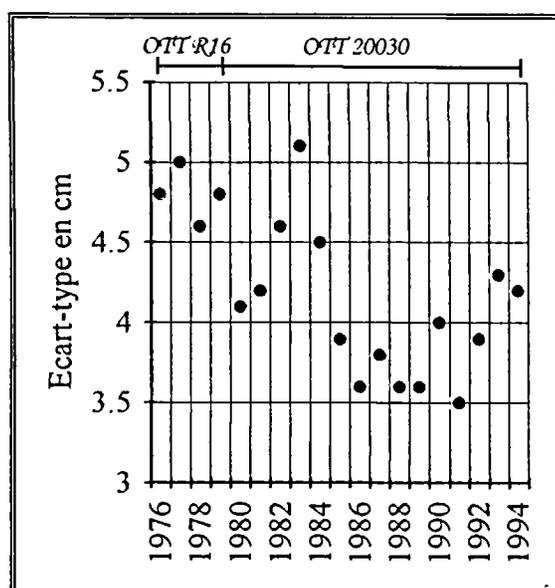


Fig. 12 - Répartition des écarts-types annuels entre observations et prédictions pour l'observatoire de Port-Tudy.

A titre d'exemple (tabl. 5), pour la façade Atlantique, un écart-type annuel de 4 cm environ est considéré correct et un écart-type journalier supérieur à 10 cm doit susciter un intérêt car on peut soupçonner des erreurs cachées.

	$\sigma$ journalier	$\sigma$ annuel
Brest / façade atlantique	- de 10 cm	[4 ; 5] cm
Le Havre / Saint-Servan	- de 15 cm	[7 ; 8] cm

Tabl. 5 - Exemple de valeurs de l'écart-type entre observations et prédictions jugées correctes en fonction du site.

On retiendra de cette analyse que :

- l'opérateur, par le soin qu'il porte à l'observation, influence la qualité de la mesure ;
- un changement d'appareil ou un changement d'opérateur sur le site peut influencer la qualité des observations ;
- l'analyse des écarts-types journaliers permet de localiser les erreurs grossières de numérisation.

Une telle étude demande :

- d'une part, la numérisation complète des hauteurs d'eau horaires pour les séries temporelles ;
- d'autre part, celle des prédictions que le SHOM fournit (organisme national chargé de l'établissement des annuaires de marée) ;
- mais aussi, de connaître l'historique de l'observatoire. Mais alors se pose le problème de l'archivage des données et renseignements utiles. Il est parfois difficile de retrouver des informations anciennes. Une base de données est en cours de réalisation au SHOM, elle retrace actuellement l'historique des observatoires depuis la seconde guerre mondiale (ce sont les fiches d'observatoire de marée qui sont reprises sous support informatique).

#### 1.4.5. Marégraphe de Marseille

Le marégraphe fondamental de Marseille, enregistre des données depuis (1885). L'observatoire comprend deux appareils :

- un médimarégraphe (marégraphe totalisateur) mis au point au siècle dernier par Lallemand. Il fournit automatiquement le niveau moyen journalier. Ces valeurs sont numérisées et envoyées au PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level, cf. § 1.5) ;
- un marégraphe à flotteur classique dont les enregistrements sur support papier, sont en cours de numérisation.

Les données du PSMSL donnent une tendance d'élévation du niveau de la mer de + 1,2 mm/an (fig. 13) sur le dernier siècle.

Le médimarégraphe, au principe séduisant, reste un appareil délicat qui demande un entretien rigoureux pour garantir la fiabilité des données. Les résultats du test de Van de Castele, effectués avant et après nettoyage de l'orifice du puits, ont mis en évidence des dysfonctionnements de l'appareil. La seule façon d'apprécier la qualité des données est de les comparer aux données du marégraphe à flotteur (comparaison des niveaux moyens journaliers fournis par les marégraphe du site). Or ces dernières n'existaient que sur document papier lors de cette étude. Depuis elles sont en cours de numérisation. L'étude sur la qualité des données du marégraphe de Marseille n'a donc pu être poursuivie plus en avant.

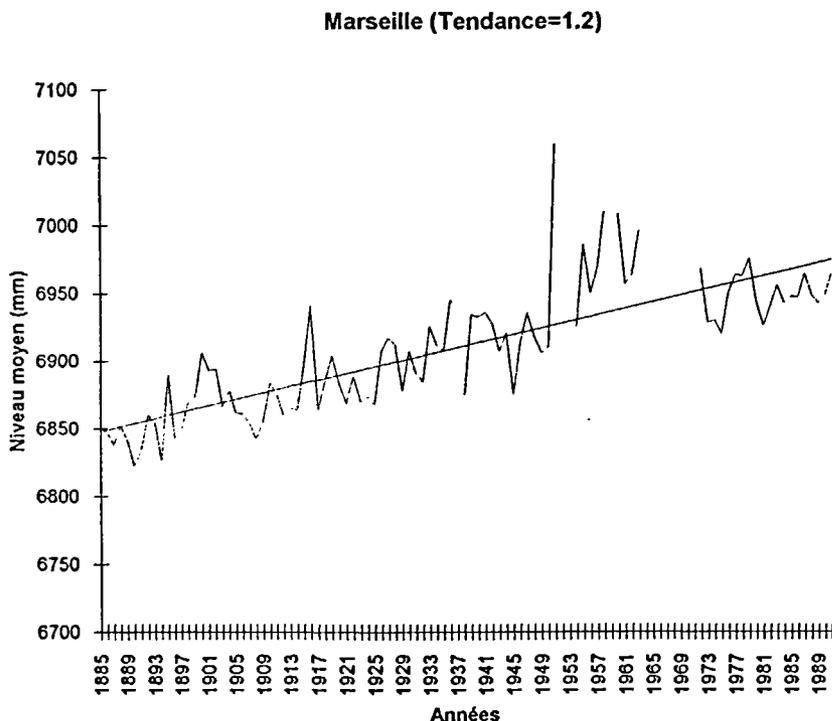


Fig. 13 - Données PSMSL du marégraphe de Marseille.

## **1.5. ETUDE QUALITATIVE DE LA VARIATION DU NIVEAU DE LA MER**

### **1.5.1. Les données disponibles**

Les données sont accessibles au niveau national, généralement sous forme analogique, parfois sous forme numérique. Il existe également une base internationale regroupant l'ensemble des observations du niveau moyen de la mer.

#### ***a) Banques nationales***

Au niveau national, différentes autorités qui détiennent et entretiennent un ou plusieurs marégraphes peuvent fournir des données relatives au niveau de la mer. Il s'agit du SHOM, de l'IGN (pour le marégraphe de Marseille), de ports autonomes, des DDE ou encore de EDF. Ces organismes centralisent généralement les valeurs horaires de la marée ainsi que les moyennes quotidiennes, mensuelles et annuelles du niveau de la mer. Le SHOM recueillent certaines des observations faites par d'autres autorités et les numérise pour établir les annuaires de marée (cas de l'observatoire de Saint-Servan dont la maintenance incombe à EDF).

#### ***b) Banque internationale de données : PSMSL***

Le Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) a été créé en 1993 en tant que centre international des données relatives au niveau moyen de la mer. Il est situé dans les locaux de l'Institute of Oceanographic Sciences à Bidston au Royaume Uni. Il est actuellement chargé de la collecte, de la publication et de la distribution des données ainsi que de leur analyse et de leur interprétation. Il met gratuitement à la disposition de la communauté scientifique les données et d'autres informations concernant les marégraphes. Celles-ci sont disponibles sur serveur par le réseau INTERNET à l'adresse suivante : [http://www.nbi.ac.uk/psmsl/sea\\_level.html](http://www.nbi.ac.uk/psmsl/sea_level.html).

Le PSMSL reçoit les valeurs des niveaux moyens mensuels et annuels de plus de 1628 observatoires dispersés dans le monde. Il s'efforce de les contrôler au mieux en recueillant le maximum de renseignements : indication du niveau de référence, des données incomplètes ou interpolées, des lacunes journalières, des modifications de repère et toutes autres informations utiles.

Il ne peut cependant juger les niveaux moyens envoyés par les autorités nationales que dans la limite des informations mises à sa disposition. Il n'est en aucun cas maître des observations et, à moins de connaître la qualité des données d'origine, on ne peut que faire des hypothèses sur leur signification. L'utilisation des données du PSMSL doit être faite avec précaution, en examinant soigneusement la nature et la qualité des données disponibles, comme le montre l'exemple du marégraphe de Brest. Le PSMSL publie les niveaux moyens mensuels et annuels issus de l'observatoire de Brest pour la période de

1807 à 1835. Au début du XIX<sup>e</sup>, les observations étaient faites sur échelle. Mais en exploitant les carnets de l'époque, on se rend compte que ces valeurs ne correspondent pas à des niveaux moyens, mais à des niveaux de mi-marée. Ces derniers se calculent avec les données de pleines et basses mers et non les données horaires. Les niveaux sont donc différents car leur définition a évolué.

Il existe néanmoins une relation théorique entre ces deux niveaux qui est fonction des amplitudes et phases entre les différentes composantes harmoniques de la marée. Pour une marée semi-diurne la relation est :

$$NMM = NM + M_4 \cdot \cos(2M_2 - M_4) - \frac{0.03(K_1 + O_1)^2}{M_2} \cdot \cos(M_2 - K_1 - O_1)$$

avec :  $NMM$ , niveau de mi-marée  
 $NM$ , niveau moyen  
 $M_4$ ,  $M_2$ ,  $K_1$  et  $O_1$ , composantes harmoniques

Le terme  $\left( \frac{0.03(K_1 + O_1)^2}{M_2} \cdot \cos(M_2 - K_1 - O_1) \right)$  est négligeable, car il est de l'ordre de  $10^{-5}$  mm alors que les niveaux moyens sont donnés en mm.

Il résulte, tout calcul fait que :  $NMM_{(cm)} = NM_{(cm)} + 2,9 \text{ cm}$

Cette valeur bien que théorique est valable, car les différences réelles entre les deux niveaux, liées aux vagues, vents et autres éléments, ne s'écartent que très peu de cette valeur.

Il est donc nécessaire de corriger les valeurs communiquées par le PSMSL de cette grandeur constante pour la période considérée.

**Remarque :**

Le PSMSL publie les niveaux moyens tels qu'ils sont fournis par les autorités nationales : ce sont les valeurs "metric". Mais pour l'étude sur les séries temporelles, il publie les niveaux moyens référencés dans un système appelé "RLR", Revised Local Reference. Ce niveau n'est qu'une référence locale propre à chaque observatoire ; il n'y a aucun lien apparent entre chaque site. Pour passer des données "metric" au données "RLR", il suffit d'ajouter une constante, distincte en chaque lieu et définie arbitrairement par le PSMSL pour être approximativement à 7 m sous le niveau moyen des mers. Ainsi toutes les valeurs mondiales sont positives.

### 1.5.2. Qualité des données publiées, exemple de Brest

Nous avons examiné la qualité des données restituées par le PSMSL en les comparant aux données de base transmises par l'organisme fournisseur. Elles ne sont pas strictement équivalentes. Ceci qui peut paraître surprenant s'explique en fait assez facilement.

La figure 14 représente la répartition des écarts, pour le marégraphe de Brest, entre les niveaux moyens annuels du PSMSL et du SHOM, autorité responsable de l'appareil. La comparaison n'a pu être établie qu'à partir de 1860, date à partir de laquelle les données sont informatisées par le SHOM. Les données antérieures à 1860 sont conservées sous forme manuscrite. Elles ont néanmoins été communiquées au PSMSL.

Les données du PSMSL sont fidèles aux données origines, et relativement de bonne qualité :

- 60,8 % des écarts sont dans l'intervalle [-1 ; 1] mm ;
- 91,5 % des écarts sont dans l'intervalle [-10 ; 10] mm.

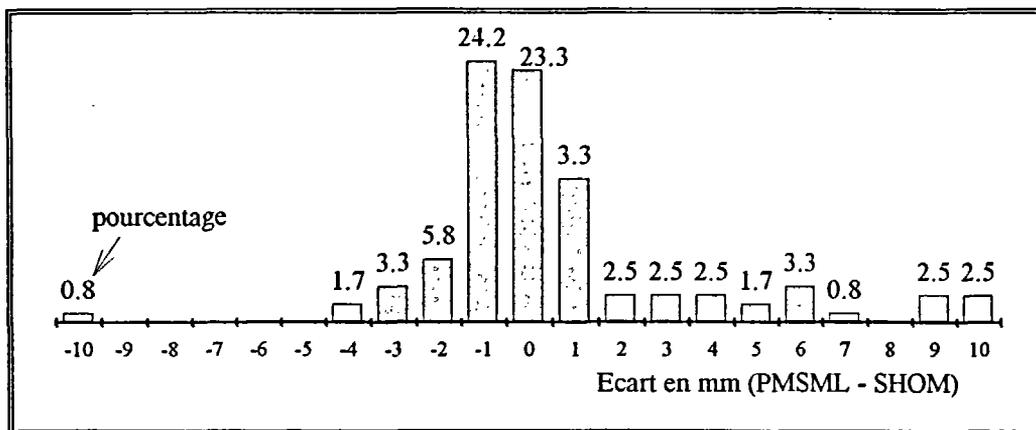


Fig. 14 - Répartition (en pourcentage) des écarts entre les moyennes annuelles fournies par le PSMSL et le SHOM.

Seulement 6,4 % des écarts sont supérieurs à 15 mm en valeur absolue, et la plupart des écarts supérieurs à 10 mm sont dus à des lacunes journalières. Ceci s'explique par le fait que le SHOM fournit des moyennes mensuelles et annuelles calculées en fonction du nombre de jours observés, sans tenir compte des lacunes ; alors que le PSMSL opère par interpolation dans le but de combler les données manquantes. L'interpolation se fait selon certains critères : nombre de données incomplètes inférieur à 15 jours, comparaison avec des observatoires voisins et avec le cycle de la marée si la série temporelle le permet (fig. 15).

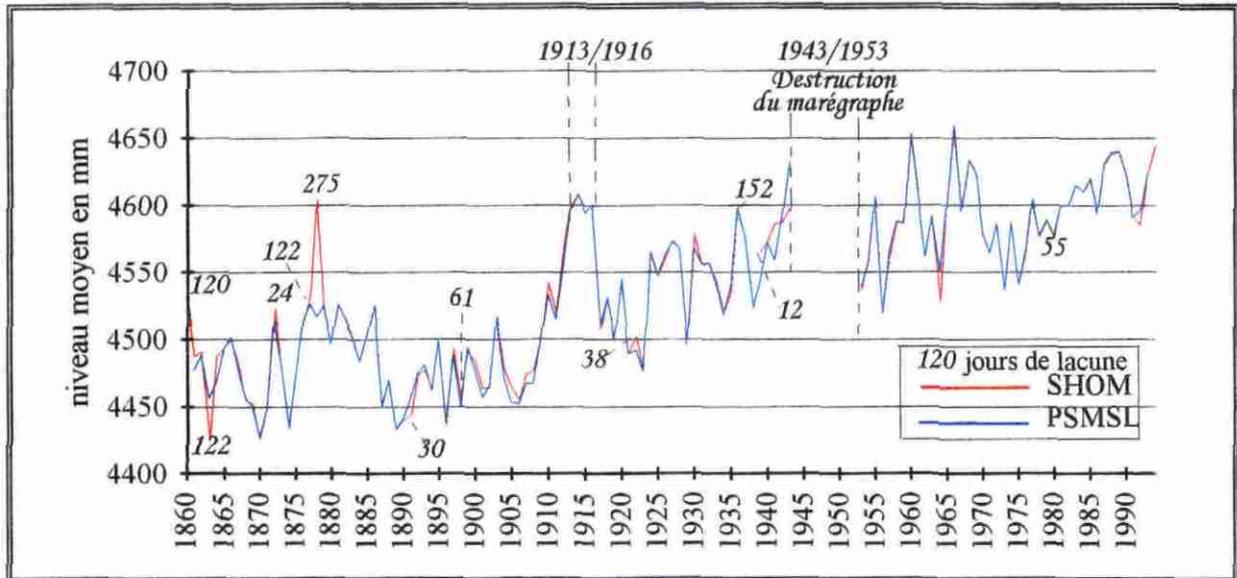


Fig. 15 - Comparaison des niveaux moyens fournis à Brest par le SHOM et le PSMSL.

En conclusion, on peut dire que les moyennes du PSMSL sont de bonne qualité :

- si la qualité des données origine est prouvée ;
- les interpolations sont raisonnables ;
- un contrôle préalable des données est fait au mieux.

### 1.5.3. Observatoires permanents français

La figure suivante (fig. 16) donne la répartition des 30 observatoires permanents situés sur le littoral français métropolitain, dont les données numérisées figurent dans les fichiers du PSMSL. Les séries de données sont de longueur très inégales selon les marégraphes (fig. 17 et 18). Les seuls marégraphes disposant de longues séquences sont ceux de Brest (depuis 1807) et de Marseille (depuis 1885).

Une interruption d'un mois dans une série temporelle peut provoquer une variation atteignant 1,5 cm dans la moyenne annuelle. S'il manque 15 jours de données dans un mois, la moyenne annuelle peut varier de 6 mm au maximum, ce qui reste négligeable, mais le niveau moyen mensuel peut être modifié de 20 cm. Ces valeurs démontrent la nécessité d'un fonctionnement constant du marégraphe.

Des observatoires temporaires, mis en place durant des travaux maritimes, sont de plus en plus nombreux le long des côtes de France, mais les séries d'enregistrement qui ne sont que de l'ordre de quelques semaines, ne présentent pas d'intérêt pour une étude des tendances d'évolution du niveau de la mer.

La liste du PSMSL n'est pas exhaustive. Il existe notamment d'autres données, plus anciennes et, non numérisées, dont l'étude permettrait de compléter les analyses du niveau moyen pour les observatoires concernés. Le marégraphe de Cherbourg, par exemple, présente des données anciennes.

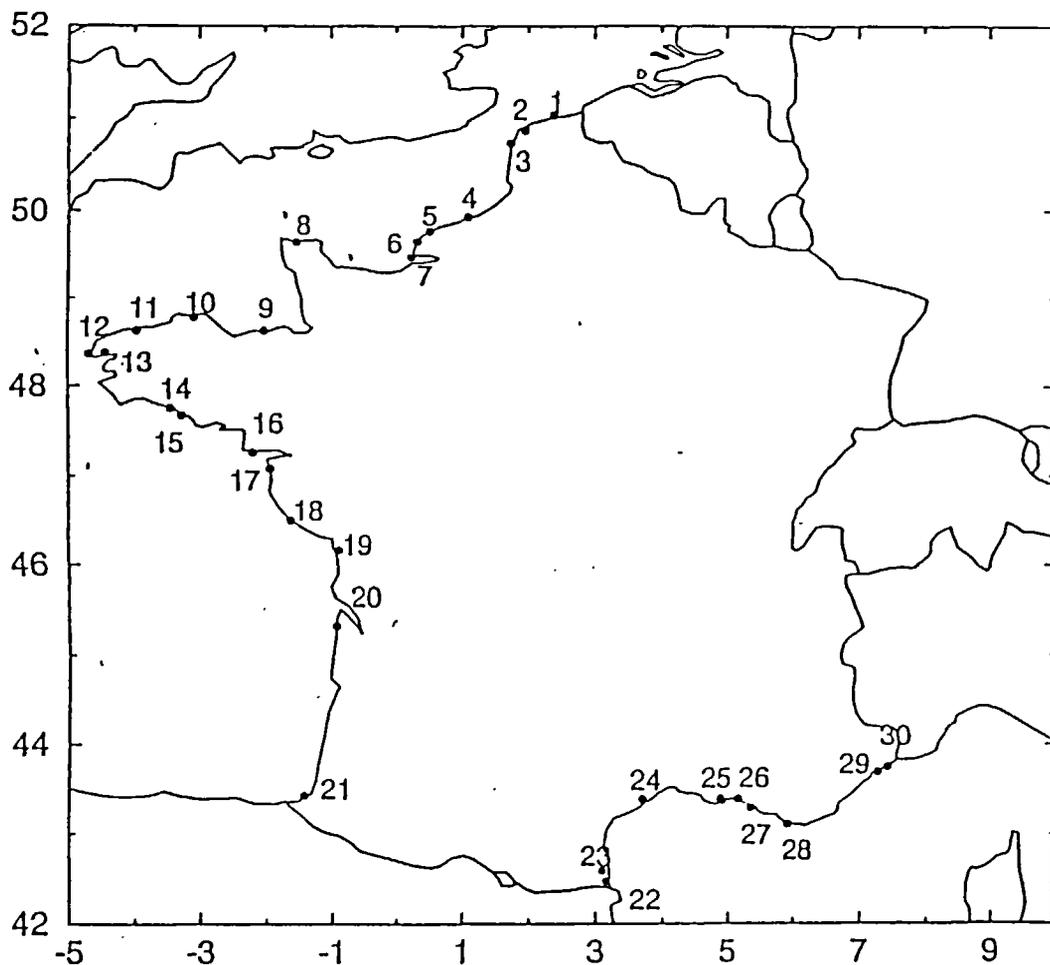


Fig. 16 - Marégraphes en France métropolitaine pour lesquels le PSMSL a des moyennes.

- 1 : Dunkerque ; 2 : Calais ; 3 : Boulogne ; 4 : Dieppe ; 5 : Fécamp ; 6 : Antifer ; 7 : Le Havre ;
- 8 : Cherbourg ; 9 : Saint-Malo ; 10 : Lézardrieux ; 11 : Roscoff ; 12 : Le Conquet ; 13 : Brest ;
- 14 : Lorient ; 15 : Port Tudy ; 16 : Saint-Nazaire ; 17 : Pointe Saint Gildas ; 18 : Les sables d'Olonne ; 19 : La Pallice ; 20 : Le Verdon ; 21 : Saint-Jean-de-Luz ; 22 : Banyuls ; 23 : Port Vendres ; 24 : Sète ; 25 : Port de Bouc ; 26 : Martigues ; 27 : Marseille ; 28 : Toulon ; 29 : Nice ; 30 : Monaco.

### France Atlantique

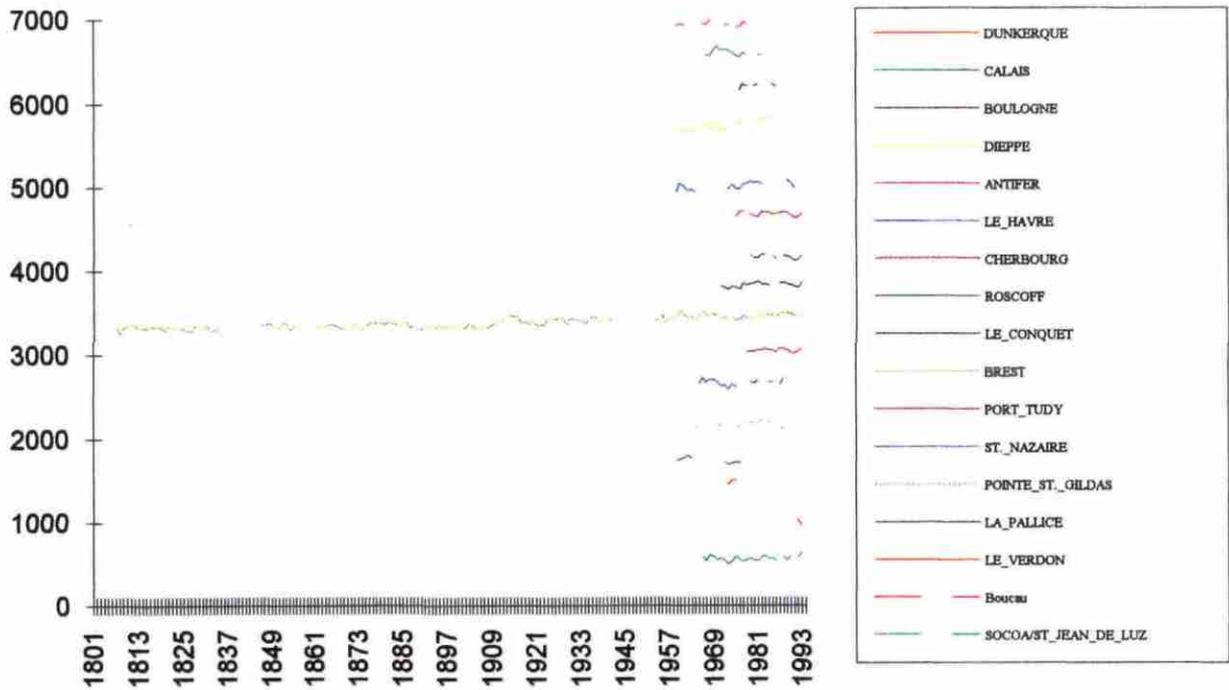


Fig. 17 - Données PSMSL de la façade Manche et Atlantique.

### France Méditerranée

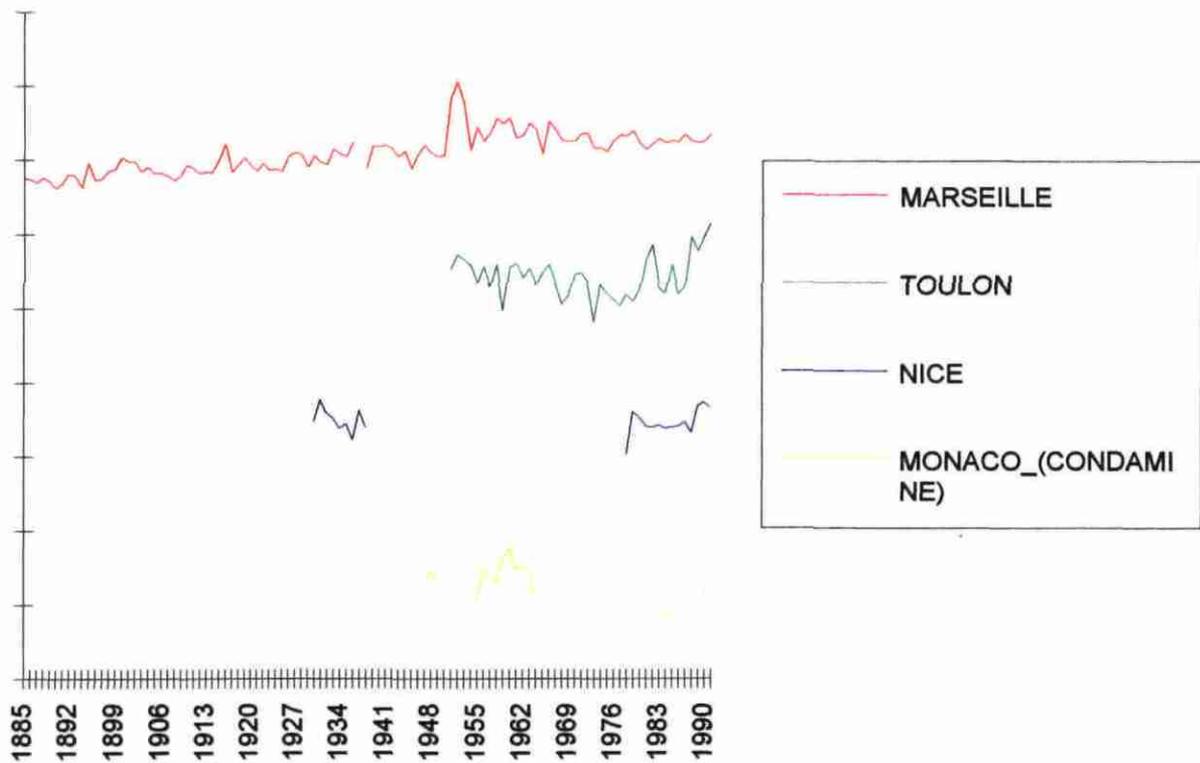


Fig. 18 - Données PSMSL de la façade méditerranéenne.

## **1.6. ETUDE DES TENDANCES DU NIVEAU MOYEN DE LA MER**

### **1.6.1. Rappels**

Les niveaux moyens mensuels et annuels sont calculés en fonction du nombre de jours d'observation. Les observations sont numérisées et données en centimètre, et les niveaux moyens calculés sont arrondis au millimètre.

La tendance de l'évolution du niveau moyen de la mer est obtenue par simple régression linéaire par une méthode de moindres carrés. A chaque tendance est associée un écart-type. Celui-ci représente une estimation du calcul de la régression, mais non les erreurs liées au calcul du niveau moyen.

Suite à l'analyse détaillée effectuée sur la qualité des données du marégraphe de Brest, l'étude des tendances est également réalisée sur ce marégraphe. Il présente aussi l'avantage d'une longue série temporelle ce qui devrait donc permettre de mieux prévoir les évolutions.

### **1.6.2. Séries temporelles utiles**

Pour cette analyse, les tendances du niveau de la mer à Brest ont été déterminées pour différentes séries temporelles (tabl. 6 et 7, fig. 19). La longueur des séries a été choisie en fonction de celles des autres observatoires permanents de Bretagne. Ainsi, nous pouvons établir le niveau de corrélation entre les séries temporelles courtes (20 ans d'observations) et celle de Brest (120 ans).

Les calculs sont basés sur les données annuelles et mensuelles communiquées par le SHOM.

A chaque tendance est associée une erreur. Cette erreur représente l'estimation du calcul de la régression et non les erreurs liées à l'appareil, au puits de tranquillisation, à la mesure ou à la numérisation (erreurs inquantifiées jusqu'à présent).

A Brest, le niveau de la mer remonte de 1,2 mm/an depuis le début des observations faites sur le marégraphe à flotteur en 1860 (tabl. 6). On note qu'en fonction du tri effectué sur les données, les valeurs obtenues sont légèrement différentes. Pour cette même période d'observation, les valeurs obtenues dans le cas -2- et -3- du tableau 6 correspondent approximativement aux valeurs estimées par le PSMSL ( $0,94 \pm 0,05$  mm/an). Ce dernier a effectué un tri préalable et procédé à des interpolations, c'est pourquoi les valeurs ne sont pas toujours identiques. Il est donc judicieux d'effectuer un tri sur les données en supprimant les années qui présentent trop de lacunes journalières. Ce tri n'est pas à négliger pour des séries courtes. Mais avec une si grande série temporelle, il est inutile, d'une part parce que le centième de millimètre n'est pas

significatif et la corrélation est bonne, et d'autre part parce que la série présente peu de lacunes.

type de données	annuelles			mensuelles
	nombre d'année	123 ans (1)	111 ans (2)	
tendance	1,16 mm/an	1,23 mm/an	1,25 mm/an	1,18 mm/an
corrélation	0,79	0,81	0,80	0,48
erreur type sur la tendance	$\pm 0,08$ mm/an	$\pm 0,08$ mm/an	$\pm 0,09$ mm/an	$\pm 0,05$ mm/an

(1) : le calcul prend en compte toutes les données et englobe 1252 jours de lacune.

(2) : un tri sur les moyennes a été effectué. Les années où, il y a plus d'un mois de lacunes, sont supprimées.

(3) : les années où il y a plus de quinze jours de lacunes sont éliminées.

Tabl. 6 - Tendances à Brest pour la période de 1860 à 1994 (données SHOM).

La figure 19 et le tableau 7 montrent bien qu'en fonction de la période choisie et de sa durée, les valeurs de la tendance moyenne sont différentes. Ainsi il apparaît que le niveau de la mer est stable ( $- 0,03 \pm 0,33$ ) jusqu'à la fin du siècle dernier. Par contre depuis 1900/1910, il ne cesse de monter ( $1,24 \pm 0,13$ ) à Brest.

Durant la première guerre mondiale (1913 à 1916) les valeurs du niveau moyen sont très fortes (fig. 10), ceci explique la tendance de  $2,34$  mm/an sur la période de 1900 à 1943. Aucune explication n'existe actuellement pour justifier ces valeurs à Brest.

Période	Nombre d'année	Tendance en mm/an	
		Données annuelles	Données mensuelles
1860 à 1909	50	$- 0,03 \pm 0,33$	/
1900 à 1994	82	$1,24 \pm 0,13$	$1,21 \pm 0,03$
1860 à 1900	41	$- 0,33 \pm 0,48$	$- 0,31 \pm 0,32$
1900 à 1943	42	$2,34 \pm 0,44$	$2,27 \pm 0,30$
1953 à 1994	41	$1,10 \pm 0,40$	$1,09 \pm 0,32$
1860 à 1880	21	$1,94 \pm 1,49$	$0,91 \pm 1,08$
1880 à 1900	21	$- 1,87 \pm 0,96$	$- 2,08 \pm 0,79$
1900 à 1920	20	$4,83 \pm 1,44$	$5,15 \pm 1,03$
1920 à 1943	23	$3,20 \pm 0,85$	$3,02 \pm 0,73$
1953 à 1974	21	$1,02 \pm 1,29$	$1,66 \pm 0,85$
1974 à 1994	21	$2,96 \pm 0,68$	$3,14 \pm 0,87$

Les calculs ont été faits à partir des niveaux moyens bruts, sans tri préalable.

Tabl. 7 - Tendances pour des périodes de 20, 40 ans et plus à Brest (données SHOM).

## Niveau moyen à BREST ( données RLR du PMSML )

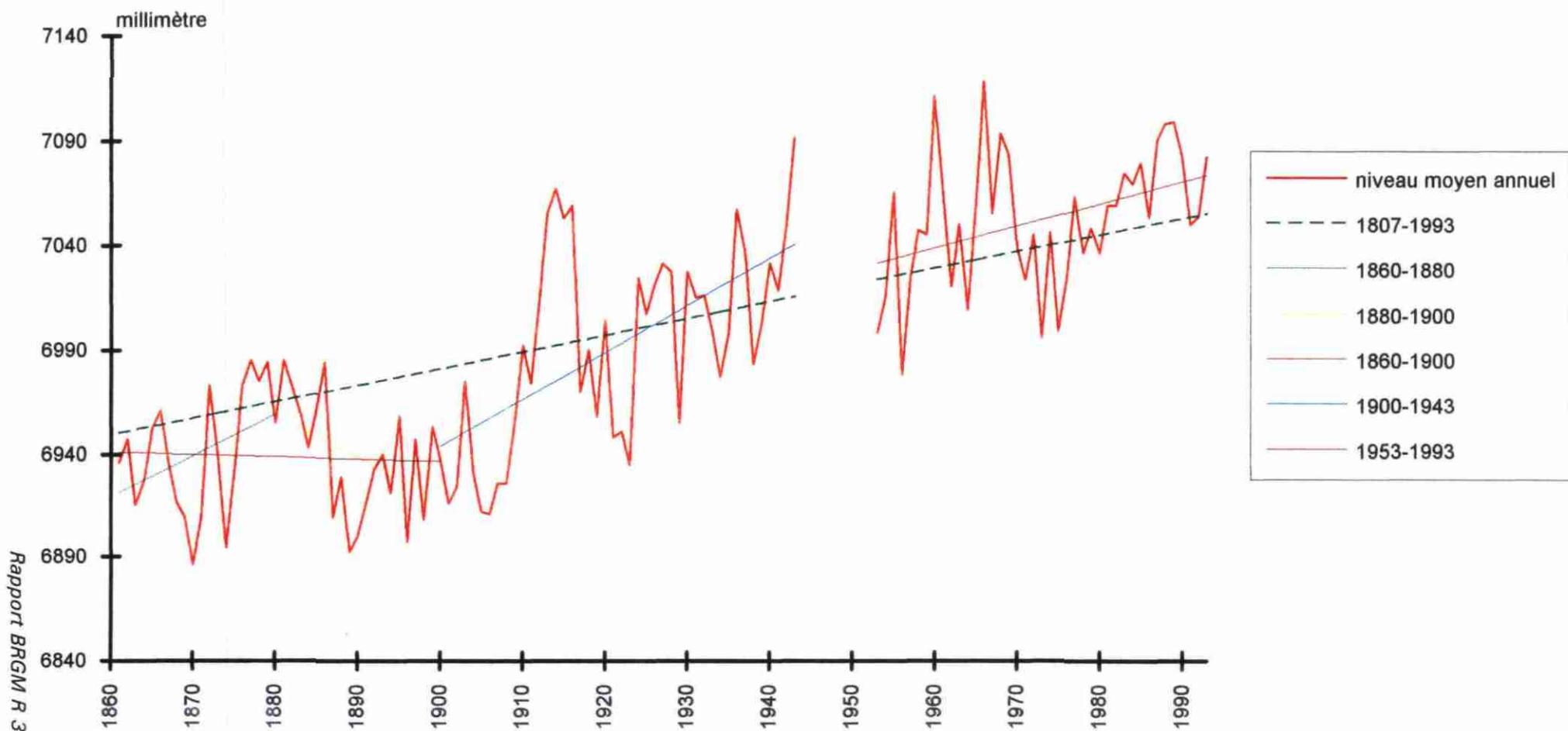


Fig. 19 - Données PSMSL du marégraphe de Brest.

Il ressort du tableau 7 qu'une étude de la tendance du niveau de la mer basée sur des séries temporelles de vingt ans n'est pas significative. En effet, les tendances ont une grande variabilité (- 1,87 mm/an entre 1880 et 1900 ; + 4,83 mm/an entre 1900 et 1920, par exemple) et ne correspondent plus à celle établie sur 120 ans d'observation. De plus l'erreur sur leur détermination est souvent très forte (par exemple : - 1,87 ± 0,96). A cette erreur, il ne faut pas oublier qu'il faudrait intégrer les erreurs de mesure. Elles sont actuellement inquantifiées, mais on imagine très bien que la détermination de la tendance n'en serait que plus mauvaise, au risque d'obtenir une erreur plus grande que la tendance elle-même.

Ce dernier point est confirmé si l'on observe les tendances pour l'ensemble des observatoires permanents de la Bretagne et qu'on les compare à celles de Brest pour les mêmes dates d'observation (tabl. 8).

	nombre d'années	lacunes en %	dates d'observations	tendances en mm/an	
				à chaque observatoire	à Brest sur les mêmes périodes
Brest	111		1860 / 1994	1,23 ± 0,08	/
Cherbourg	21	12,2	1963 / 1994	0,53 ± 0,23	1,67 ± 0,49
Le Conquet	23	6,1	1971 / 1994	1,44 ± 0,42	3,09 ± 0,74
Saint-Servan	38	17,4	1851 / 1943	1,45 ± 0,54	1,10 ± 0,51
Roscoff	18	8,5	1974 / 1993	0,76 ± 0,17	2,81 ± 0,79
Port-Tudy	20	3,6	1969 / 1994	-1,46 ± 0,31	1,53 ± 0,44

Les calculs ont été faits à partir des niveaux moyens bruts, sans tri préalable.

Tabl. 8 - Tendances du niveau moyen de la mer en différents lieux de Bretagne et à Cherbourg (données annuelles SHOM).

En conclusion, nous considérons qu'un marégraphe doit couvrir de façon ininterrompue plus d'une trentaine d'années de mesures pour être exploitable dans la problématique de la tendance du niveau moyen de la mer. Or ce n'est pas le cas pour une bonne partie des marégraphes installés sur le littoral français.

## 1.7. CONCLUSION : VERS UNE METHODE D'ETUDE

### 1.7.1. Choix des observatoires

Des observatoires temporaires sont de plus en plus nombreux le long des côtes de France, mais les séries d'enregistrement ne sont que de l'ordre de quelques semaines. Dans le cadre de l'étude qui consiste en une détermination de la tendance du niveau de la mer, l'intérêt est porté sur des observatoires permanents qui fournissent des séries temporelles longues et qui ont peu de lacunes journalières.

Le PSMSL établit la liste des marégraphes permanents. Mais cette liste n'est pas exhaustive. Il existe notamment d'autres données plus anciennes, et non numérisées, dont l'étude permettrait de compléter les analyses du niveau moyen pour les observatoires concernés. Le marégraphe de Cherbourg, par exemple, présente des données anciennes.

### **1.7.2. Choix des données**

Après avoir identifié les observatoires permanents, il faut s'intéresser aux données à exploiter.

Comme nous l'avons constaté précédemment, la lecture sur échelle de marée est précise à 5 cm près. Cependant, cet instrument est le seul qui permette une mesure directe des hauteurs d'eau. Il n'y a aucun intermédiaire, donc l'erreur est uniquement une erreur humaine. Si l'on dispose de séries continues et longues d'observations pour établir un niveau moyen, on peut considérer que les observations des échelles sont aussi bonnes que les données issues de marégraphes à flotteur puisque ce dernier introduit d'autres erreurs. Les données anciennes issues des échelles de marée ne sont donc pas à exclure. Mais il faut contrôler le mode de calcul employé et le type de données fournies, car l'étude doit se faire avec des données de même nature (niveaux moyens). Or, les niveaux anciens sont généralement des niveaux de mi-marée.

Avec les marégraphes à flotteur, une part des erreurs humaines liées au soin de la mesure sont éliminées, mais de nouvelles (erreurs de calage, du puits et de l'appareil) sont apparues. Ces appareils analogiques ont l'avantage de permettre une mesure autonome, continue et le calcul de niveaux moyens.

Une étude faite à partir des données filtrées est préférable car les signaux de courtes périodes sont éliminés.

Il est également important de connaître l'historique de l'observatoire, en particulier :

- les dates de changement de mode de mesure, de type d'appareil, ou encore d'observateur ;
- l'autorité ou les autorités successives responsables du maintien et de l'entretien de l'observatoire ;
- les dates d'observations et de lacunes ;
- les modifications intervenues sur le site (dragage des fonds marins par exemple).

### **1.7.3. Qualité des données**

Dans le cadre d'une analyse des variations du niveau moyen de la mer, le choix des observatoires et des données est primordial. Une étude qualitative est nécessaire, mais

elle ne peut être que relative. Elle consiste à apprécier la qualité relative des données d'un observatoire par comparaison avec des observations voisines, ou par comparaison avec les données de prédictions.

Il est également important de connaître l'historique de l'observatoire, en particulier :

- les dates de changement de mode de mesure, de type d'appareil, ou encore d'observateur ;
- l'autorité ou les autorités successives responsables du maintien et de l'entretien de l'observatoire ;
- les dates d'observations et de lacunes ;
- les causes des lacunes et des modifications ;
- les modifications intervenues sur le site (dragage des fonds marins par exemple).

#### **1.7.4. Calcul des tendances**

Après avoir soigneusement sélectionné les données (observatoires permanents sans lacunes importantes), la tendance du niveau de la mer est calculée par ajustement linéaire (méthode des moindres carrés) à partir des niveaux moyens annuels.

Le calcul fournit l'erreur sur la détermination de la tendance. Les autres erreurs (humaines de lecture ou de calage, de mesures de l'appareil, du puits de tranquillisation et de numérisation) ne peuvent actuellement pas être intégrées à cette détermination. C'est donc aux observatoires permanents, bien entretenus, et présentant des séries temporelles d'au moins une trentaine d'années ainsi qu'un minimum de lacunes de données qu'il faut s'intéresser.

#### **1.8. CONCLUSION**

Les erreurs de marégraphie peuvent être identifiées : elles résultent du mécanisme de l'appareil, du filtrage non linéaire du puits, des erreurs de mesure et de numérisation des observations. Mais elles demeurent actuellement inquantifiables :

- les erreurs humaines sont inquantifiables car il s'agit essentiellement de fautes : elles sont fonction uniquement du manque de vigilance apporté à la mesure. La comparaison avec les prédictions ne permet que de juger à priori la qualité des données, en comparant l'écart-type journalier à un écart-type moyen jugé significatif pour l'observatoire ;
- les erreurs des appareils et du puits de tranquillisation ne sont actuellement pas quantifiées. Il existe néanmoins des modèles d'erreurs mais, le manque d'informations ne permet pas l'application pratique de ces modèles. Ces erreurs sont propres à chaque marégraphe car elles sont liées au site (salinité, profondeur). Il faudrait donc effectuer

des observations supplémentaires dans chaque observatoire, afin de vérifier ces modèles et pouvoir quantifier les erreurs réelles du puits de tranquillisation et du flotteur ;

- les erreurs de numérisation peuvent être éliminées au mieux par la méthode qui consiste à comparer les observations aux prédictions. Les erreurs résiduelles ont alors un caractère systématique.

Il faut noter que les erreurs accidentelles, aléatoires, du mécanisme et les erreurs de numérisation ne peuvent être corrigées qu'à partir du moment où elles sont détectées, c'est-à-dire lorsqu'elles deviennent grossières.

Il apparaît très difficile de déterminer quantitativement la qualité des données de marégraphie :

- d'une part, du fait du nombre important d'erreur à caractère systématique ;
- et d'autre part, parce que l'entretien des observatoires n'est pas toujours régulier et est fonction de l'intérêt qu'y porte l'autorité.

L'étude qualitative ne peut donc être que relative, c'est-à-dire que la qualité des données d'un observatoire est appréciée en fonction des observations faites sur un autre site voisin.

L'analyse qualitative des données marégraphiques, utilisées pour la détermination du niveau moyen de la mer et de ces variations, ne peut être que relative donc insatisfaisante. Pour la validité de la détermination des tendances du niveau marin, il faudrait pourtant intégrer les erreurs. Or elles ne sont pas quantifiées actuellement. On peut toutefois envisager pour l'avenir une étude plus poussée sur les erreurs du puits de tranquillisation, en s'appuyant sur des observations supplémentaires aujourd'hui inexistantes.

En France, deux observatoires présentent des séries temporelles séculaires : celui de Brest entretenu par le SHOM et celui de Marseille dont l'entretien incombe à l'IGN. L'analyse de ce dernier n'a pu être menée à bien, notamment la qualité des données du marégraphe à flotteur n'a pas été possible (données non numérisées). C'est donc sur le marégraphe de Brest que s'est focalisée l'analyse.

Pour une étude des tendances du niveau de la mer, les données exploitées (niveaux moyens annuels) doivent être de bonne qualité. Mais cette notion de "bonne qualité" est relative. Elle implique une analyse basée sur des séries temporelles suffisamment longues (trente ans d'observation), avec peu de lacunes, un entretien régulier et suivi de l'appareil et du puits de tranquillisation, et des mesures faites avec soin. Cependant ces conditions ne sont pas toujours réunies. En effet les marégraphes permanents, implantés le long des côtes françaises, ont malheureusement des séries temporelles encore trop courtes (vingt ans) pour permettre une étude réelle des variations du niveau de la mer.

## **2. OBSERVATION DES MOUVEMENTS VERTICAUX ACTUELS DE LA CROÛTE TERRESTRE**

Une des techniques utilisées pour la mise en évidence des mouvements verticaux actuels de la croûte terrestre est la comparaison de nivellements.

De 1857 à nos jours, trois réseaux de nivellement primordial se sont succédé en France :

- le réseau Bourdalouë, établi entre 1857 et 1862, qui fut le premier réseau de nivellement à l'échelle de la métropole ;
- le réseau Lallemand dit Nivellement Général de la France (NGF) effectué de 1884 à 1892 pour le 1er ordre ;
- le réseau IGN dit IGN69 réalisé entre 1962 et 1969 par l'Institut Géographique National pour le 1er ordre ; les mesures du 2ème ordre se sont achevées en 1985 pour la France métropolitaine.

Ces trois réseaux ont de très larges portions communes, notamment à proximité du littoral, ce qui permet leur comparaison. Il faut toutefois rappeler que les mesures de nivellement sont acquises pour fournir des données précises d'altitude sur le territoire national et qu'elles répondent parfaitement à cet objectif. Comme nous allons les utiliser dans un autre but, il est indispensable d'examiner la possibilité de leur exploitation, et donc de leur précision, pour leur utilisation dans la mise en évidence de mouvements verticaux actuels.

Ces nivellements portent sur les mêmes périodes de temps (une centaine d'années) que les enregistrements des marégraphes. Il est donc intéressant de rapprocher ces deux types de données.

Depuis quelques années, les techniques satellitaires (telles que VLBI (Very Long Baseline Interferometry), GPS (Global Positioning System), DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite) permettent l'étude de variations des mouvements de la croûte terrestre. Avec ces techniques, il est possible d'obtenir simultanément, en un même point sa position en X, Y, Z. Toutefois, la bibliographie est beaucoup plus abondante sur les déformations horizontales et leur précision en X - Y, que sur les déformations verticales et leur précision associée. Le système le plus utilisé est le GPS américain. Il faut savoir que la précision de GPS est très variable en fonction du matériel utilisé, du nombre de répétitions de mesures en un même point, des corrections et des calculs effectués. De plus, il est généralement admis que la précision horizontale est trois fois meilleure que la précision verticale. A titre d'exemple, Larson et Agnew (1991) ont menés des travaux sur la précision des données GPS provenant de 22 sites de Californie, la distance entre les points variant de 50 à 450 km. La précision en X-Y est de  $5 \text{ mm} \pm 1.10^8$  de la distance entre les balises et en Z de  $12 \text{ mm} \pm 13.10^8$  de cette même distance. La valeur de  $10^8$  est tout à fait inhabituelle ; elle est plus

communément de l'ordre du ppm ( $10^6$ ) pour les GPS-ultra précis. Un autre exemple peut être donné sur le réseau GPS-Alpes installé pour quantifier la déformation de cette chaîne montagneuse. Les mesures effectuées en 1993 donnent une précision de 5 mm dans la direction N-S, de 9 mm en E-W et de 15 mm en Z (communication orale de C. Vigny). Ces différents résultats montrent bien que pour des mouvements verticaux de l'ordre du mm/an, il faut avoir des mesures sur une dizaine d'années pour sortir du domaine d'incertitude. Les techniques satellitaires présentent une solution d'avenir mais actuellement les séquences temporelles sont trop courtes (inférieures à 10 ans) pour, d'une part mesurer les mouvements verticaux et d'autre part, permettre la mise en évidence d'une tendance à long terme (la centaine d'années).

## **2.1. DESCRIPTION DES CAMPAGNES DE NIVELLEMENTS**

Le nivellement a pour objet de fournir des repères d'altitude d'une région, c'est-à-dire les altitudes de points caractéristiques au-dessus d'une même surface de référence. Jusqu'à la moitié du siècle dernier, les altitudes étaient fournies par un procédé expéditif, peu précis et uniquement de façon locale. Ces nivellements par visées inclinées devaient être menés conjointement avec des opérations de planimétrie. Ce n'est que dans les années 1850 que le nivellement de précision a vu le jour.

Le nivellement de précision est une opération indépendante et autonome dont le principe est simple. Un niveau pour donner des visées strictement horizontales est placé à égale distance (100-150 m) entre deux mires verticales graduées. Les distances étant égales, les effets de la courbure de la terre et de la réfraction s'annulent. La différence d'altitude des supports des deux mires est égale à la différence des lectures faites sur elles. Cette opération élémentaire est appelée nivelée. On procède ainsi par cheminement, de proche en proche, entre des points déterminés. Des repères fixés au sol matérialisent la place de certains points de mesure.

Le principe du nivellement direct ou géométrique dit aussi de précision a été adopté pour ces trois réseaux qui se sont succédé depuis le siècle dernier sur la métropole. Dans tous les cas, les cheminements du réseau primordial ont été effectués à pied. La technique de l'aller-retour a été systématiquement utilisée afin de mettre en évidence des systématismes d'observation liés au sens de marche que l'on corrigeait de proche en proche sur chaque travée (dénivelée entre deux repères consécutifs). Le nivellement IGN69 a de plus été réalisé par la méthode dite du tour d'horizon qui consistait en l'exécution de deux cheminements parallèles, effectués en aller-retour ce qui a permis de doubler le nombre d'opérations et par conséquent d'améliorer la qualité des mesures.

Un réseau de nivellement général est subdivisé en un certain nombre de réseaux partiels, de plus en plus denses. Ainsi en France, il existe 4 réseaux imbriqués les uns dans les autres, le 1er, le 2ème, le 3ème, le 4ème ordre. Ces réseaux sont nivelés avec une précision individuelle décroissante. Le réseau de 1er ordre, le plus précis, est le seul

compensé dans son ensemble, c'est-à-dire que les écarts de fermeture des valeurs brutes le long des boucles sont répartis sur l'ensemble du réseau. Chacun des réseaux d'ordre supérieur est compensé à l'intérieur des polygones fermés délimités par le précédent.

Seuls les deux nivellements les plus récents (NGF et IGN) peuvent convenir pour procéder à une comparaison : leurs différentes qualités (précision, méthode, réseau,...) sont comparables entre elles. Les mailles de 1er et 2ème ordre sont les seules à présenter des garanties de précision et de qualité compatibles avec le but recherché.

Les données des nivellements NGF et IGN69, acquises auprès de l'IGN, sont traitées de deux manières différentes :

- par profil de comparaison de nivellement ;
- estimation de la vitesse des mouvements verticaux en traitant les données d'altitude comme un semi de points.

Ces deux approches différentes donnent des résultats complémentaires

## **2.2. PROFIL DE COMPARAISON DE NIVELLEMENTS**

### **2.2.1. Estimation de la précision d'un profil de comparaison de nivellements**

Aussi performants que soient les instruments de mesures et les méthodes de calcul, ils n'en demeurent pas moins entachés d'erreurs. Pour estimer la précision de la comparaison de nivellements, il est nécessaire de lister et de quantifier les erreurs.

#### ***a) Qualité des mesures***

- **Les erreurs accidentelles**

Elles ont un comportement aléatoire et sont dues essentiellement aux limites des instruments utilisés et à l'imperfection de nos sens. Parmi elles, on peut citer les erreurs de pointé et de lecture.

- **Les erreurs systématiques**

Les erreurs systématiques sont les plus redoutées à cause de leur effet cumulatif. Elles sont généralement éliminées par des modes opératoires adéquats. Les plus courantes dans le nivellement sont les suivantes :

- l'erreur de colimation, éliminée par des portées égales ;

- l'erreur de distance au talon. Pour remédier à cette erreur, on règle la mire en atelier ou bien on utilise la même mire, au même emplacement du talon, en visée avant et en visée arrière ;
- le défaut de verticalité de la mire ;
- le défaut de calibration et de dilatation de la mire. Pour corriger ceci, on apporte des corrections aux lectures, après étalonnage ;
- l'erreur de réfraction résiduelle. Elle est due au fait que les couches d'air ne sont pas toujours des sphères de même centre que la Terre, mais, à hauteur du sol, sont parallèles au terrain naturel. Par temps ensoleillé, des inversions de densité peuvent même se produire, les couches les plus chaudes et donc les moins denses étant les plus basses. La mesure du gradient de température et l'emploi de modèles permettent de corriger cette erreur ;
- les anomalies de la pesanteur. Non seulement les surfaces équipotentiellles ne sont pas parallèles, mais en plus elles sont soumises à des anomalies, à des oscillations dues à la variation du niveau global des océans (fonte des glaciers) c'est-à-dire au mouvement eustatique. Elles sont également influencées par la distribution des masses à l'intérieur de la terre et par le mouvement du géocentre. Pour palier à ces effets, il est nécessaire de prendre en compte des valeurs de la gravité ;
- les effets de la marée. Sous l'effet du couple luni-solaire, se produit une marée terrestre et une marée océanique, cette dernière exerçant en retour une charge sur le continent. Des corrections astronomiques doivent être apportées aux observations ;
- les effets de charge de l'atmosphère. Pour cela des modèles sont appliqués ;
- les erreurs liées au sens de parcours. Il s'agit principalement des erreurs consécutives à l'instabilité, variable dans le temps, des crapauds et du trépied. On brise ces systématismes en alternant le sens de marche ou par des cheminements aller-retour ;
- l'erreur causée par la dilatation différentielle du support d'instrument et de la nivelle évoquée par Charlot et Hottier (1979). Elle peut, lorsqu'on utilise des niveaux à calage non automatique, provoquer un systématisme nord-sud mais cette hypothèse reste très controversée.

Nous considérons que les erreurs de nivellement, après correction par mode opératoire des principaux systématismes, obéissent aux lois classiques de Gauss sur la probabilité des erreurs accidentelles.

#### • Estimation de la précision

Il s'agit des erreurs résultant uniquement des opérations de terrain. Les erreurs à caractère accidentel ne peuvent pas être corrigées (sauf contrôle systématique des fichiers), et les erreurs de nature systématique sont corrigées au mieux par des modes

opérateurs. L'erreur résiduelle, alors accidentelle, a été calculée de manière globale par l'IGN, pour chaque nivellement de 1er ordre, en écart équiprobable  $e_p$ , ce qui représente 50 % des erreurs :

$$e_{p(NGF)} = 1,7\text{mm}/\sqrt{km} \text{ et } e_{p(IGN)} = 1,3\text{mm}/\sqrt{km}$$

En conformité avec l'usage le plus répandu, l'erreur peut être donnée en écart-type par la formule  $\sigma = 1,5e_p$

$$\sigma_{(NGF)} = 2,5\text{mm}/\sqrt{km} \text{ et } \sigma_{(IGN)} = 1,9\text{mm}/\sqrt{km}$$

Les mesures faites sur ces deux réseaux étant à priori indépendantes, on obtient la précision en composant quadratiquement les écarts-types kilométriques propres à chaque réseau :

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{(NGF)}^2 + \sigma_{(IGN)}^2} = 3,14\text{mm}/\sqrt{L(km)}$$

L = longueur du cheminement

### ***b) Différence entre les deux systèmes d'altitude***

Les deux réseaux de nivellement ont été définis dans deux systèmes d'altitudes différents : en altitudes orthométriques pour le NGF et en altitudes normales pour l'IGN. Les deux réseaux ont été calculés à partir de la même origine, le marégraphe de Marseille ce qui évite une source d'erreur.

L'IGN a calculé les altitudes normales IGN69 et les altitudes orthométriques calculées à partir des mêmes observations du nivellement IGN69 mais d'après le mode de calcul de Lallemand. La différence entre ces deux types d'altitude établie sur les noeuds du réseau primordial donne l'écart-type suivant :

$$\sigma_2 = 4 \text{ mm}$$

### ***c) Discordance sud-nord***

Une première approche de la comparaison des deux nivellements les plus récents (NGF Lallemand et IGN69) a amené l'IGN à constater une discordance systématique entre les deux réseaux qui atteint progressivement 60 cm aux environs de Dunkerque. Celle-ci varie, en gros, en fonction de la latitude.

Il faut signaler l'existence de telles discordances dans d'autres pays : côte ouest des USA (Montgomery, 1969), Grande-Bretagne (Edge, 1959) où les valeurs de cette discordance sont du même ordre de grandeur c'est-à-dire entre 0,6 et 0,7mm/km. Il est difficile d'incriminer l'un ou l'autre des deux nivellements. Malgré diverses études, aucune certitude n'a pu être acquise quant à l'origine de ce phénomène. Pour la France, Charlot et Hottier (1979) ont la même opinion sur le sujet que Edge (1959) qui, suite aux expériences qu'il a menées en Angleterre, pense qu'il s'agirait d'un échauffement du trépied (et donc une dilatation) exposé au soleil c'est-à-dire au nord, la plupart des campagnes de nivellement ayant lieu pendant l'été. Un nivellement de très haute précision, réalisé en 1983 par l'IGN entre Marseille et Dunkerque (Kasser, 1989), n'a pu résoudre définitivement le problème. En effet, ce nivellement se situe entre les deux précédents (25 cm en dessous de l'IGN et 35 cm au-dessus du NGF).

Cette discordance constitue l'élément prépondérant dans la gêne causée par l'ensemble des erreurs qui interviennent dans l'étude de la comparaison. Il est important par conséquent d'en estimer la valeur, de la corriger au mieux et surtout de connaître l'erreur commise sur la correction qu'on lui attribue afin d'assurer à la comparaison une fiabilité suffisante au regard de ses applications.

Le principe de correction de cette discordance (Lenôtre *et al.*, à paraître) consiste à considérer que l'existence d'un gradient nord-sud entre les deux nivellements NGF et IGN est avant tout dû à un systématisme linéaire qui peut être modélisé de façon très régulière par un plan moyen. Ce plan (qu'on appelle "meilleur plan") est déterminé à partir d'un nuage de points : les noeuds du réseau primordial pour lesquels on connaît d'une part les coordonnées planimétriques et d'autre part, la discordance séparant les deux réseaux dans un même système d'altitude (orthométrique). En effet, les altitudes IGN69 ont été calculées, par l'IGN et pour la circonstance, exactement de la même façon que les altitudes NGF. L'équation de ce meilleur plan, établie à partir de 80 points (noeuds de premier ordre fournis par l'IGN) par la méthode des moindres carrés, est de type :

$$z = 2,00323 \cdot 10^{-7} \cdot x + 6,6845 \cdot 10^{-7} \cdot y - 1,35011 \cdot 10^{-3}$$

Ce meilleur plan fonctionne comme un filtre (au sens géophysique du terme) que l'on applique sur le réseau de nivellement IGN. La correction de la discordance N-S est appliquée aux données avant tout autre traitement.

Suite au calcul du meilleur plan par la méthode des moindres carrés, la répartition plus ou moins homogène des résidus est l'indice de la qualité de cette modélisation. Sur un repère, la discordance est de la forme  $z = ax + by + c$ , et sur une dénivelée  $\Delta z = a \cdot \Delta x + b \cdot \Delta y$ . La précision sur la discordance est donc fonction, d'une part, de la précision des coordonnées planimétriques  $x$  et  $y$  et, d'autre part, de celle des coefficients  $a$  et  $b$ .

Les coordonnées planimétriques sont connues à l'hectomètre près, ce qui donne une incertitude négligeable à l'échelle de travail des nivellements (entre 1:250 000 et 1:1000 000). La précision sur la discordance est donc uniquement fonction des coefficients de l'équation du "meilleur plan", soit :

$$\delta\Delta z = \delta a \cdot \Delta x + \delta b \cdot \Delta y$$

L'erreur sur la discordance nord-sud s'écrit :

$$\sigma_3 = \sqrt{s_a^2 \cdot D x^2 + s_b^2 \cdot D y^2}$$

où  $\sigma_a$  et  $\sigma_b$  représentent les erreurs sur les coefficients

La matrice de variance-covariance permet d'obtenir l'erreur sur les coefficients a et b. Il en résulte que :

$$a = 0,029 \quad \text{et} \quad b = 0,023$$

on peut donc estimer que  $\sigma_a \approx \sigma_b \approx 0,026$  mm/km .

En conséquence, l'erreur sur la correction de la discordance nord-sud est :

$$\sigma_3 = \sigma_a \cdot \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = 0,026 \cdot d(\text{km})$$

avec : d, distance cartésienne entre repères.

On peut toutefois assimiler la distance cartésienne d à la longueur L du cheminement entre les deux repères. On obtient alors :

$$\sigma_3(\text{mm}) = 0,026 \cdot L(\text{km})$$

avec : L, longueur du cheminement entre repères.

#### d) Erreurs prises en compte pour les profils de comparaison de nivellement

Trois sources d'erreurs liées à la comparaison des nivellements sont prises en compte :

- l'erreur sur la qualité des mesures de chaque nivellement  $\sigma_1$  ;
- la différence entre les deux systèmes d'altitudes (orthométrique pour le nivellement NGF et normal pour l'IGN)  $\sigma_2$  ;
- la discordance nord-sud existant entre les deux opérations de nivellement  $\sigma_3$ .

L'erreur totale sur un profil de comparaison de nivellement est la somme des trois erreurs explicitées ci-dessus, c'est-à-dire :

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}$$

L'erreur sur la correction de la discordance nord-sud étant négligeable, l'erreur globale s'écrit :

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{(3,14 \cdot \sqrt{L})^2 + 4^2}$$

$$\sigma = \sqrt{9,86 \cdot L_{\text{km}} + 16}$$

avec : L, longueur du cheminement entre repères.

#### 2.2.2. Interprétation des profils de nivellements

La méthode de construction de profil de comparaison de nivellement reprend les bases établies par Fourniguet (1987) à savoir que la comparaison porte non pas directement sur les altitudes mais sur les différences d'altitude entre deux repères consécutifs. Cette comparaison porte sur les altitudes orthométriques compensées de 1er et 2ème ordre du nivellement Lallemand et sur les altitudes normales compensées des réseaux de même ordre du nivellement IGN. Seuls les repères strictement communs aux deux opérations sont pris en compte.

L'interprétation d'un profil de nivellement est réalisée en fonction d'un abaque construit en tenant compte de la formule ci-dessus et en fonction de règles précises (Lenôtre *et al.*, à paraître).

Suite à l'étude sur la qualité des marégraphes réalisée au chapitre précédent, l'étude des profils de nivellements est focalisée sur les deux régions où sont situés les deux marégraphes fondamentaux de France : la Bretagne avec le marégraphe de Brest entretenu par l'EPSHOM et la Provence avec le marégraphe de Marseille entretenu par

l'IGN. Pour ces deux régions, on retiendra les profils qui cheminent au plus près du littoral.

#### **a) Bretagne**

Deux profils de comparaison de nivellement passent à proximité du littoral breton : l'un longe la côte nord et l'autre la côte sud.

##### **• Profil de Dol-de-Bretagne à Brest (pl. 1)**

Ce profil de 1er ordre a été mesuré en 1889 et repris en 1962, soit un écart-temps de 73 ans entre les deux mesures. Il chemine d'est en ouest et a une longueur totale de 237 km. Il débute à Dol-de-Bretagne pour se terminer à Brest, à quelques centaines de mètres du marégraphe du SHOM.

Il s'élève progressivement d'est en ouest. Il est accidenté par 4 pentes significatives c'est-à-dire qui sortent de la marge d'erreur. La dernière partie du tracé, se terminant à Brest, est une portion de 75 km considérée comme stable. Les repères situés à proximité du marégraphe sont de bonne qualité. Ces repères reposent sur des formations géologiques dures (des gneiss et des schistes) et peu altérées (Chauris *et al.*, 1980).

Les marégraphes, sur la côte nord de la Bretagne, sont situés à quelque distance des repères de nivellements composant ce profil. Ils sont respectivement à une distance de 22 km pour Le Conquet, quelques centaines de mètres pour Brest, 20 km pour Roscoff et 13 km pour Saint-Servan.

##### **• Profil de Lorient à Brest (pl. 2)**

Le profil, long de 258 km, a également été mesuré en 1889 et en 1962. Il débute à Redon et chemine vers l'ouest le long de la voie ferrée pour atteindre le littoral à Vannes ; il se dirige ensuite vers Lorient et Quimper puis bifurque vers le nord pour se terminer à la gare de Landerneau où il vient s'ancrer sur le profil précédent.

La partie la plus littorale de ce profil, de Vannes à Landerneau, est relativement calme et monte légèrement jusqu'au nord de Châteaulin sans présenter de mouvement significatif, puis il descend rapidement jusqu'à Daoulas par une pente bien marquée. Le profil se termine par un secteur horizontal en position basse jusqu'à la gare de Landerneau. Les derniers repères forment une zone affaissée. Ces repères étant sur des supports peu fiables tels que pont ou aqueduc, susceptibles de s'affaisser uniquement par des phénomènes de gravité, il est préférable de ne pas en tenir compte.

Les seuls marégraphes localisés à une relative proximité du profil sont ceux de Brest et Port Tudy. Ce dernier, situé sur l'île de Groix, n'est à l'évidence pas rattaché à un profil de comparaison de nivellement. Il n'est donc pas possible de savoir s'il existe des mouvements verticaux actuels près de ce marégraphe.

***b) Provence (pl. 3)***

Ce profil débute à Carnoules et emprunte la voie ferrée, d'abord vers le sud-ouest en direction de Toulon puis il suit la côte méditerranéenne jusqu'à La Ciotat pour finir au nord de Marseille.

Ce profil présente en première partie, une forte pente significative s'abaissant vers l'ouest jusqu'à Aubagne. La portion de profil située entre Aubagne et le marégraphe de référence IGN (repères 27 à 38) est perturbée avec des pics négatifs fiables et positifs moyennement fiables. Il n'y a pas d'interprétation claire pour expliquer ce comportement. Sous l'angle des nivellements, la qualité des supports des repères est bonne. D'un point de vue géologique (Guieu, 1969), il n'existe pas de faille connue à proximité de ces repères. Cette série de repères repose sur des formations géologiques de deux natures : des alluvions et des formations détritiques du Stampien. Si l'on compare la nature de ces formations avec la position haute ou basse des repères de nivellement (tabl. 9), on constate que les repères en position basse sont plus fréquents dans les alluvions et que les 3 repères situés sur des formations stampiennes plus solides sont en position élevée où stable. Il semble donc qu'il y ait une relation entre formation géologique meuble de type alluvions (pouvant se compacter) et repères en affaissement. Cette configuration n'est cependant pas la règle générale rencontrée dans l'interprétation de la plupart des profils de nivellements.

Le marégraphe de Marseille est situé sur un tronçon de profil en position basse et d'une façon plus générale le profil de comparaison de nivellement est assez bruité laissant supposer une certaine activité tectonique. Le cheminement du profil passe par le marégraphe de Marseille où se trouve le zéro de référence qui sert à établir les altitudes. Il y a donc un rattachement direct entre les nivellements et l'observatoire marégraphique.

N° Repère	Position du repère par rapport à la droite moyenne	Formation géologique
27	-	Alluvions
28	-	Alluvions
29	=	Alluvions
30	=	Stampien
31	=	Stampien
32	+	Stampien
33	=	Alluvions
34	=	Alluvions
35	-	Alluvions
36	-	Alluvions
37	-	Alluvions
38	=	Alluvions

Tabl. 9 - Comparaison entre les formations géologiques et le profil de nivellement de la Provence.

### 2.3. ESTIMATION DE LA VITESSE

Les repères de nivellements sont considérés comme un semi de points sur lesquels 2 mesures ont été réalisées à 2 époques différentes. En chaque point, la différence d'altitude et l'écart-temps entre les deux mesures permet donc de calculer une vitesse de mouvements verticaux actuels. Soit :

$$V = (A2(n) - A1(n))/Dt$$

avec : A1(n) = altitude NGF du repère n

A2(n) = altitude IGN du repère n

DT = écart-temps entre les mesures de A1 et A2.

#### 2.3.1. Estimation de l'erreur sur la vitesse

La quantification de l'erreur sur les vitesses doit prendre en compte :

- l'erreur sur l'écart-temps entre les mesures ;
- l'erreur sur les altitudes.

**a) Erreur sur l'écart-temps**

Aux noeuds des réseaux de nivellement, l'altitude du repère a été fixée lors du calcul global des altitudes par compensation (méthode des moindres carrés). Mais les écarts-temps entre les observations sont différents pour chaque cheminement. Pour un noeud où les profils sont uniquement de premier ou deuxième ordre, les vitesses ne varient presque pas car les écarts-temps entre les cheminements d'un même ordre sont peu différents. Par contre, ces écarts sont plus importants pour les noeuds où un cheminement de deuxième ordre se raccroche au premier ordre. L'évaluation de cette erreur est faite sur les 91 noeuds où se croisent des profils de 1er et 2ème ordre ce qui revient à prendre un cas majorant. Lorsque l'on compare les vitesses d'un même repère, situé en position de noeud mixte (1er et 2ème ordre), on obtient sur cet ensemble de 91 points :

- un écart sur la vitesse au maximum de 0,246 mm/an et avec un minimum de - 0,404 mm/an ;
- une moyenne de - 0,0014 mm/an ;
- un écart-type de 0,0964 mm/an.

L'erreur sur l'écart-temps est donc arrondie à :  $\sigma_t = 0,10$  mm/an

**b) Erreur sur les altitudes**

Les repères de nivellement sont considérés comme un semi de points couvrant la France. Une carte des mouvements verticaux actuels (carte isocine) est réalisée en interpolant ce semi de points et en donnant des valeurs aux noeuds d'une grille régulière dont la maille est choisie en fonction du nombre de données, de leur répartition et de la superficie étudiée.

L'estimation de l'erreur se fait à l'aide d'outils géostatistiques et du krigeage. La géostatistique permet de prendre en compte la structure spatiale du phénomène étudié, ici les vitesses de mouvements verticaux, donnant ainsi un estimateur robuste de la vitesse aux noeuds d'une grille régulière. La géostatistique étant fondée sur une approche probabiliste, elle associe à chaque valeur interpolée un intervalle de confiance qui quantifie la précision de l'estimation. Cette estimation intègre toutes les erreurs aléatoires. Les erreurs liées aux altitudes, c'est-à-dire les erreurs sur la qualité des mesures de chaque nivellement et la différence due au fait que les altitudes ne sont pas calculées dans le même système (orthométrique pour le NGF et normal pour l'IGN), sont des erreurs aléatoires. Les altitudes utilisées pour le calcul de la vitesse sont déjà corrigées de la discordance nord-sud ce qui enlève le problème du systématisme. Il ne reste plus que des erreurs aléatoires. L'erreur résiduelle sur la correction du meilleur plan étant aléatoire elle est incluse dans l'estimation globale de l'erreur faite par krigeage. Cette erreur inclut également les approximations de l'interpolation.

L'erreur moyenne due aux altitudes, après étude géostatistique pour toute la France, est égale à :

$$\sigma_a = \pm 0,16 \text{ mm/an}$$

### ***c) Erreurs sur les vitesses***

L'erreur globale moyenne sur les vitesses de mouvements verticaux actuels obtenues par comparaison de nivellements, s'écrit donc :

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_a^2} = \sqrt{0,16^2 + 0,1^2}$$

$$\sigma_v = \pm 0,19 \text{ mm/an}$$

Cette erreur moyenne est raffinée grâce à l'étude géostatistique, car à la vitesse calculée pour chaque repère est associée une estimation de l'erreur. La carte des mouvements verticaux actuels est donc accompagnée d'une carte d'estimation d'erreur.

Toute étude géostatistique suppose une étude statistique préliminaire concernant la variable étudiée, la vitesse, et en particulier sa stationnarité (ou son degré de variabilité spatiale). Cette étude est, pour chaque zone, un cas particulier, les données n'étant pas identiques d'un secteur à l'autre. Cette étude est donc détaillée ci-dessous, pour les deux régions étudiées.

### **2.3.2. Mouvements verticaux actuels par comparaison de nivellements**

Les vitesses de mouvements verticaux calculées ont une valeur relative car on ne connaît pas le zéro absolu c'est-à-dire les secteurs réellement stables. Plus qu'aux valeurs des vitesses en elles-mêmes, il est important de s'attacher à leur gradient et donc aux variations relatives.

#### ***a) Bretagne***

La carte des vitesses de mouvements verticaux actuels calculée pour la Bretagne (fig. 20) montre un accroissement des vitesses de l'est vers l'ouest signifiant ainsi un soulèvement du Finistère par rapport à la Bretagne centrale. Le gradient entre la zone la plus basse et la zone la plus élevée de Bretagne est de 1,1 mm/an pour une distance de 130 km. Ce phénomène de basculement et de surrection de l'ouest de la Bretagne a été mis en évidence avec cette carte. Il n'était pas réellement connu auparavant dans la littérature.

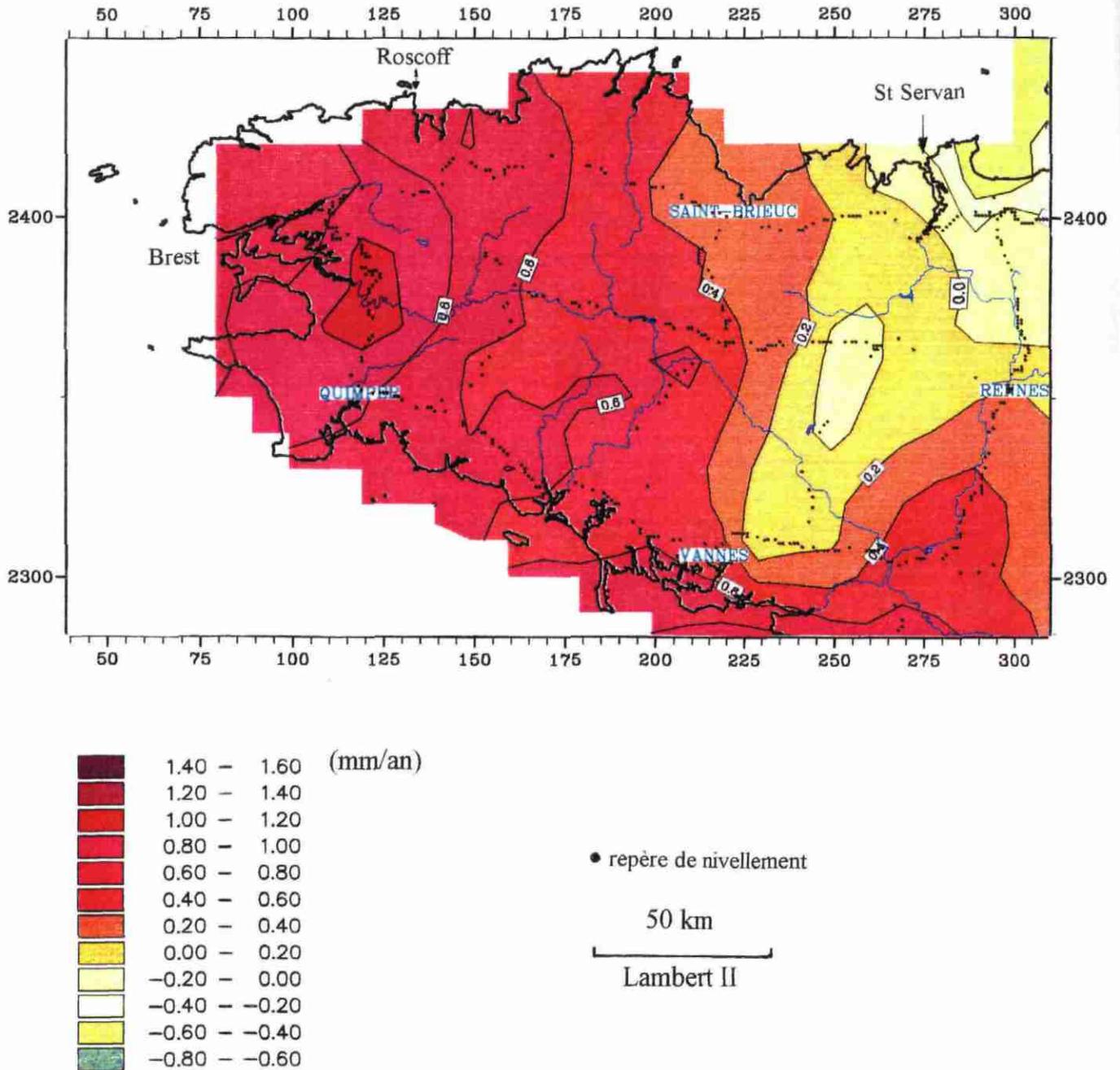


Fig. 20 - Carte des vitesses de mouvements verticaux actuels par comparaison de nivellement en Bretagne.

La carte d'estimation de l'erreur sur ces vitesses (fig. 21) montre, comme on pouvait s'y attendre, une erreur plus faible au droit des repères de nivellement et plus élevée (avec un maximum de 0,4 mm/an) lorsqu'on s'éloigne de ces points.

La comparaison de nivellements met en évidence des mouvements verticaux mais ne permet pas de savoir quel est le "moteur" : s'agit-il de tectonique, de réajustements glacio-isostatiques suite à la fonte des glaces lors du dernier interglaciaire,... Il est intéressant de savoir si ce basculement et cette surrection s'inscrivent dans une tendance géologique à plus long terme. Les travaux d'Hallégouët sur la Bretagne ouest montrent des niveaux marins littoraux quaternaires au-dessus du niveau actuel de la mer. Ainsi des dépôts attribués à l'Eémien (interstade glaciaire entre 120 000 et 70 000 ans) ont été décrits sur la côte des Abers (Finistère) à une altitude de 10 m au-dessus du niveau actuel de la mer (Hallégouët et Van Vliet-Lanoë, 1986). D'autres hauts cordons de galets de plage, présumés émiens, sont connus à une altitude de + 10 à 15 m dans le sud Finistère (Guilcher et Hallégouët, 1981). Des formations de galets marins culminant à une altitude de 200 m sont connus dans le centre Finistère (Hallégouët, 1972 ; Guilcher *et al.*, 1975). Ils sont attribués sans preuve décisive à la transgression pliocène. Pour une époque plus récente, l'Holocène, Pirazzoli (1991) précise que les différents essais de quantification des changements du niveau marin sur les côtes atlantiques françaises sont peu précis. Le taux d'incertitude est suffisamment fort pour rendre incertaines les fluctuations proposées par les auteurs.

Deux problèmes restent posés : l'âge des dépôts littoraux quaternaires et la part tectonique/glacio-isostatique. L'âge des dépôts reste un problème car tous les âges donnés sont attribués ou présumés sur des critères morphologiques, des corrélations latérales, des analogies pétrographiques mais jamais sur des datations absolues. Est-on en présence d'une surrection ou d'un haut niveau marin ou bien les deux phénomènes interviennent-ils en concomitance... Le débat reste ouvert entre les adeptes du "tout tectonique" et ceux du "tout oscillation du niveau marin avec stabilité terrestre" et seules des datations absolues pourront résoudre le problème.

#### ***b) Provence***

La carte de vitesses de mouvements verticaux actuels (fig. 22) montre un accroissement des vitesses vers le nord-est, la partie la plus basse étant centrée sur Marseille et le delta du Rhône. Le gradient maximal de ce secteur est de 0,6 mm/an sur une distance de 20 km. Il présente donc des valeurs tout à fait significatives en regard de la précision des données de nivellements.

La carte d'estimation de l'erreur de ces vitesses (fig. 23), comme pour la Bretagne, varie en fonction de l'éloignement aux repères.

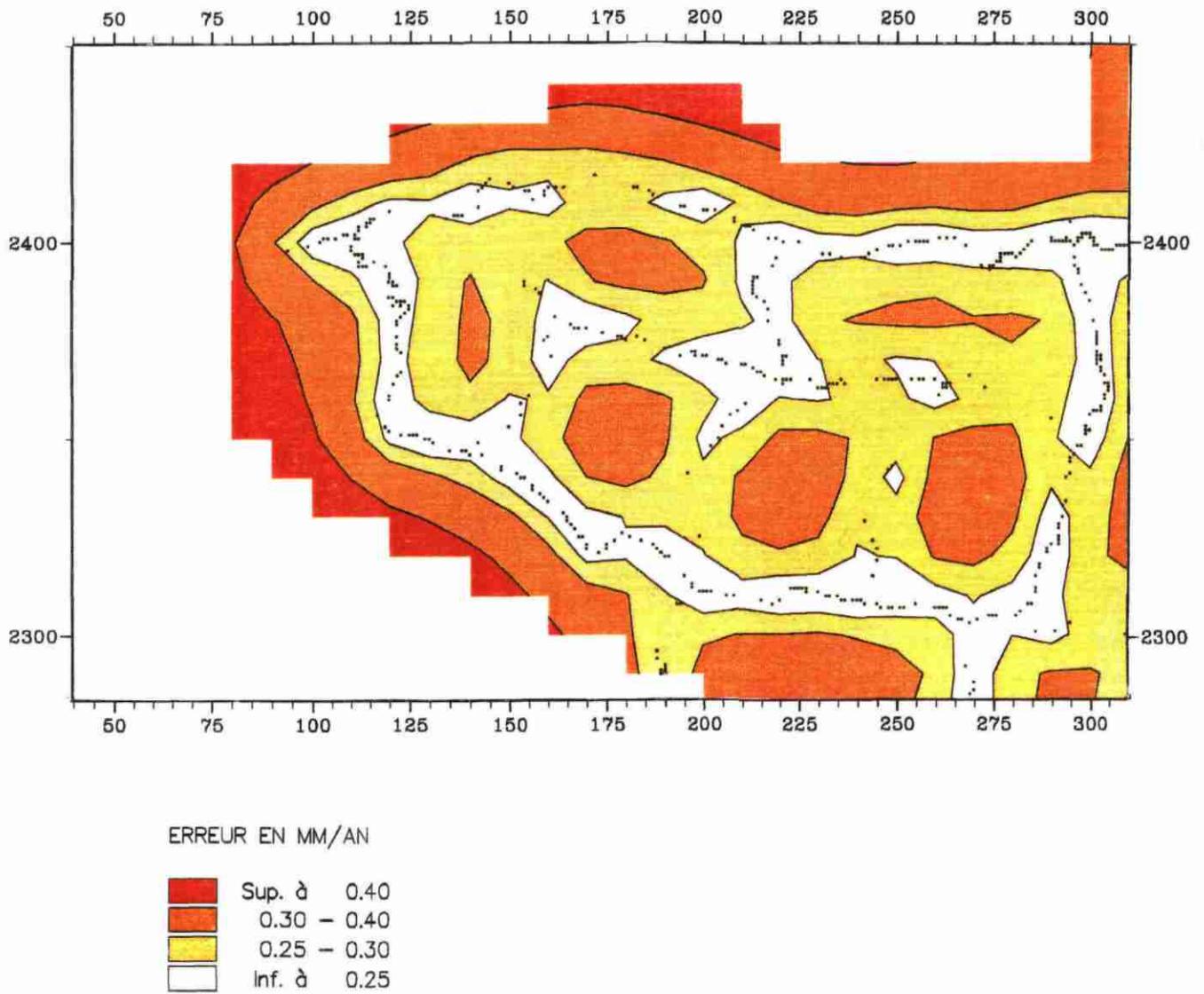


Fig. 21 - Carte d'estimation des mouvements verticaux actuels en Bretagne.

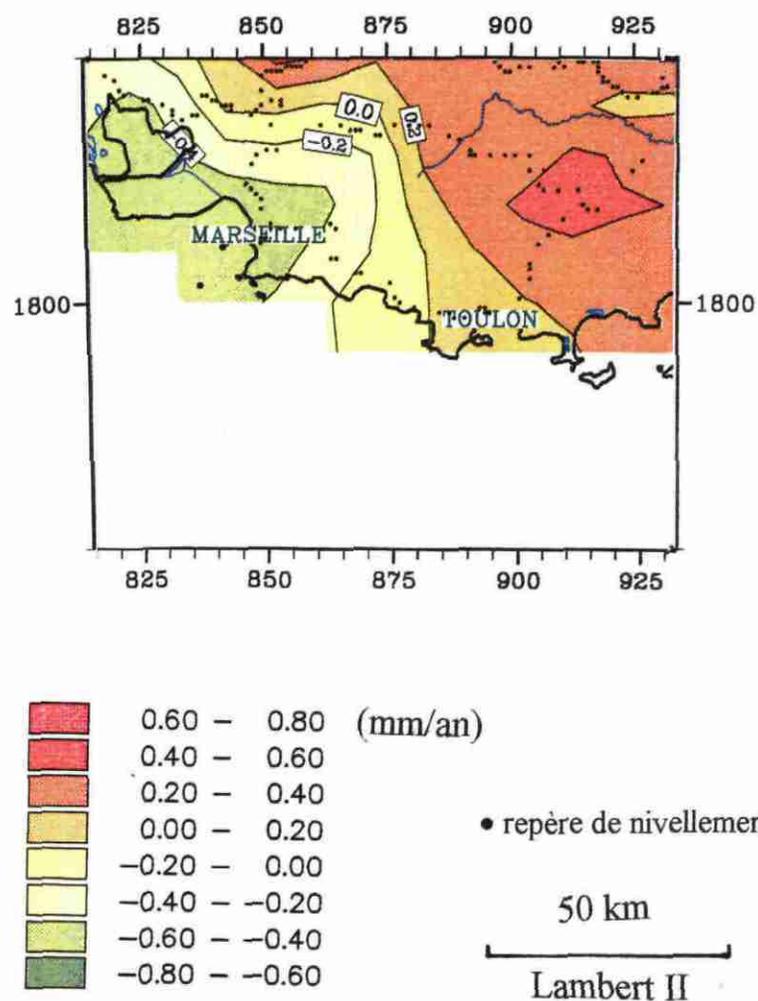


Fig. 22 - Carte des vitesses de mouvements verticaux actuels par comparaison de nivellement en Provence.

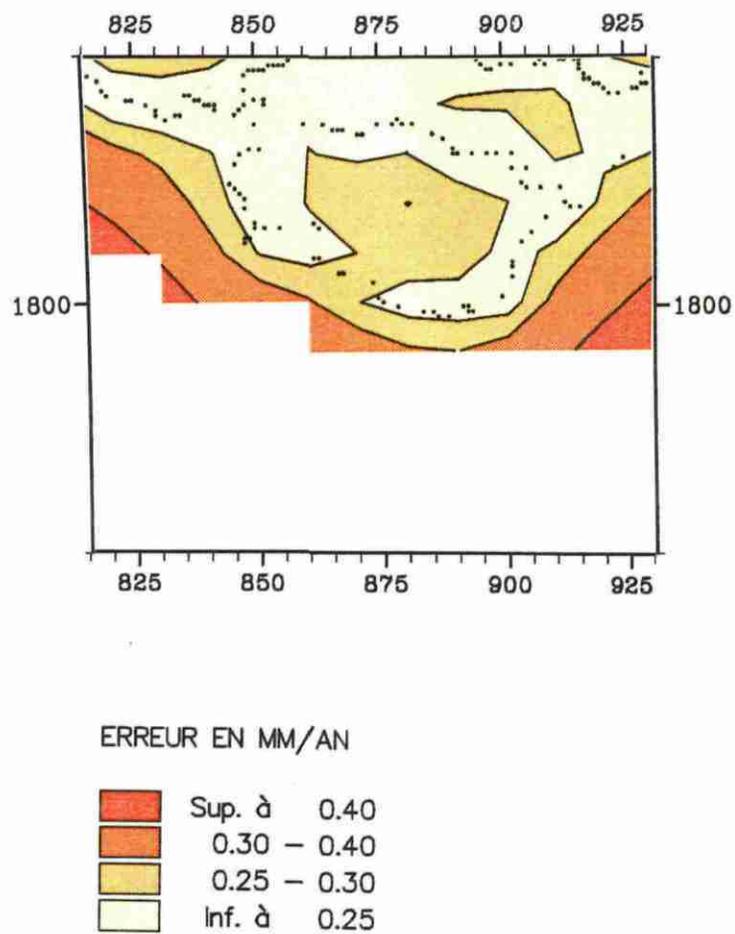


Fig. 23 - Carte d'estimation des mouvements verticaux actuels en Provence.

Si l'on regarde la tendance géologique, les études menées sur la région montrent une activité tectonique assez soutenue au Tertiaire et au Quaternaire. L'affaissement des structures est connu (Guieu *et al.*, 1969) et n'a cessé de jouer depuis le Pliocène comme le prouve l'inclinaison des séries miocènes dans cette direction. D'après cet auteur, le bassin de Marseille a continué de s'affaisser pendant le Quaternaire : les formations lacustres villafranchiennes (Gunz) sont inclinées vers le front de mer témoignant de la permanence des affaissements jusqu'au Mindel. Plus récemment, des datations au C14 ont été effectuées sur des encroûtements coralliens se développant sur les falaises littorales depuis l'interface air-eau jusqu'à des profondeurs de 25 m (Laborel *et al.*, 1994) et considérés comme de bons marqueurs des mouvements du niveau de la mer. Les datations réalisées sur le site de La Ciotat donnent un niveau de la mer à 2,5 - 3 m en dessous du niveau actuel, il y a 6000 ans BP. Ces résultats montrent une valeur moyenne de l'action conjuguée de la remontée du niveau marin et de la tectonique de 0,5 mm/an. Il est toutefois nécessaire de préciser que ces datations ont été effectuées à une trentaine de kilomètres du marégraphe de Marseille et qu'il est donc possible que les mouvements verticaux actuels de la croûte ne soient pas exactement les mêmes entre ces deux points.

#### **2.4. CONCLUSION**

La carte des vitesses de mouvements verticaux actuels, établie à partir de la comparaison de nivellements, montre des variations significatives de ces vitesses pour les deux régions étudiées. En effet, ces variations sont supérieures à la marge d'erreur qui est en moyenne de  $\pm 0,19$  mm/an. Elles sont donc à prendre en compte dans la problématique de l'élévation du niveau de la mer.

La Bretagne montre un basculement avec une élévation de la partie occidentale et les profils de nivellements sont stables à proximité du marégraphe de Brest. Pour la Provence, on constate également un basculement mais cette fois-ci avec un affaissement vers le sud-ouest c'est-à-dire vers le marégraphe de Marseille. Dans ce secteur, le profil de nivellement est perturbé sans que l'on en sache avec certitude la cause.

Actuellement, il semble que les tendances observées pour les deux zones étudiées s'inscrivent dans une tendance géologique mais le problème reste ouvert tant que l'on n'aura pas de datations absolues fiables.

### **3. RATTACHEMENT DES MAREGRAPHES A LA TERRE**

Les observations de marée et le niveau moyen qui en est déduit doivent être rapportés à un élément de référence terrestre considéré comme fixe. Des opérations de rattachement des observatoires par nivellement sont donc nécessaires.

Le rattachement des marégraphes est un élément important à prendre en compte car il permet de faire la connexion entre les mouvements de la mer et ceux de la terre. Il est important d'examiner comment s'effectue ce rattachement, avec quelle qualité et quelle précision ? En effet, différents phénomènes peuvent intervenir :

- le puits dans lequel est situé le marégraphe est installé sur le fond marin qui peut être vaseux. Dans ce cas-là, il y a tendance à compaction sous le poids du puits et donc affaissement. L'élévation du niveau de la mer constatée par le marégraphe est alors augmentée artificiellement ;
- la possibilité de déformation de la croûte terrestre (faille, plis, subsidence, surrection) entre le marégraphe et le réseau de nivellement situé le plus souvent à quelques kilomètres de la côte.

#### **3.1. REPERAGE DES OBSERVATOIRES**

Le but du repérage est d'assurer la pérennité des niveaux de référence en matérialisant la cote du zéro hydrographique adopté. Le repérage permet aussi de vérifier que l'échelle n'a pas bougé. Si elle doit être remplacée car devenue illisible par exemple, un nouveau nivellement est effectué.

##### **3.1.1. Les repères de nivellement**

Les repères, au nombre de trois minimum, doivent être suffisamment éloignés les uns des autres pour être réellement utilisables et pour contrôler leur stabilité par des opérations régulières de nivellement. L'un des repères est choisi comme repère fondamental, car il présente à priori une meilleure garantie de durabilité et est relativement éloigné du marégraphe.

Si l'observatoire est situé non loin de repères du réseau national de nivellement, alors ces derniers servent de repères d'appuis. Les deux marégraphes fondamentaux, Brest et Marseille, sont directement rattachés au réseau de nivellement de 1er ordre. Pour les autres marégraphes, il s'agit en général de nivellement de troisième ou quatrième ordre. Les cotes sont ainsi référencées par rapport au zéro du nivellement.

Si les repères du nivellement national sont trop éloignés, alors les points d'appuis peuvent être des points naturels locaux (anneau, mur d'un quai, rocher découvrant) ou des repères matérialisés par des rivets scellés dans une surface verticale (mur ou quai par exemple). Les points naturels sont aujourd'hui rares et déconseillés.

Les repères doivent toujours être des points clairement marqués, stables et identifiables.

### **3.1.2. Rattachement**

Le rattachement du zéro hydrographique et des instruments de mesure des hauteurs d'eau se fait par nivellement géométrique en cheminement fermé ou encadré entre les repères d'appui.

Les repères scellés sur la structure (margelle du puits) et l'échelle sont nivelés en tant que points intermédiaires. Ils définissent des plans horizontaux et parallèles au plan de référence du zéro hydrographique.

Pour des raisons pratiques, c'est le sommet de l'échelle qui est nivelé. En présence de plusieurs échelles (si le marnage est important), un nivellement dit hydrographique peut être réalisé afin d'assurer la coordination des lectures entre échelles. Il s'agit de lire en même temps les hauteurs sur toutes les échelles de l'observatoire.

Pour un marégraphe à flotteur, il faut considérer un point au voisinage du bord supérieur du puits. C'est ce repère qui est nivelé. Une sonde à main, mise à zéro sur le repère, est descendue dans le puits jusqu'à ce que son extrémité entre en contact avec la surface de l'eau. Par conséquent, connaissant l'altitude du point de repère et en soustrayant la distance de ce point à la surface de l'eau, telle qu'elle est indiquée par la sonde à main, on obtient la valeur que le marégraphe devrait indiquer au même moment.

### **3.2. QUALITE DU RATTACHEMENT - EXEMPLE DE BREST**

Certains observatoires ont été rattachés par des opérations de nivellement de précision effectuées par l'IGN : par exemple en 1973 et 1985 pour Brest et en 1968 pour Marseille. Cependant, la plupart des nivellements de rattachement sont réalisés par le service entretenant l'observatoire. Ces nivellements ne sont pas de précision et n'ont pas la qualité de ceux réalisés par l'IGN, du fait du matériel employé (mire en bois) et de la précision requise (le millimètre). Cela ne signifie pas que les rattachements soient de mauvaise qualité : cette précision était jusqu'à présent largement suffisante puisque les observations de la marée, nécessaires à la navigation et à la prédiction de la marée, sont faites au centimètre.

Le cas de l'observatoire de Brest fournit une bonne illustration du problème du calage d'un marégraphe. Le local du marégraphe à flotteur de Brest est situé sur la rive gauche de la Penfeld (dans le port militaire), et il est posé sur de la vase. Il est donc possible qu'il soit instable. L'échelle de marée actuelle est fixée à l'extérieur de l'abri du marégraphe depuis octobre 1952.

Depuis l'installation de l'observatoire, les repères n'ont cessé de changer et ceux du siècle dernier ne sont pas significatifs. Il est donc difficile de vérifier la stabilité de la structure abritant l'appareil.

Avec le nivellement NGF Lallemand, les points d'appui sont des repères du réseau national, fixés sur des structures stables et éloignés du marégraphe. L'ensemble des repères ne présente donc pas de mouvements verticaux apparents, car les nivellements se font à une échelle locale et l'on peut supposer que les mouvements verticaux des repères sont peu différents (tabl. 10).

Ce n'est que depuis 1973 qu'un repère (-8- dans le tableau 10) a été scellé sur la margelle du puits de tranquillisation et permet d'étudier les variations du support. Mais les opérations de nivellement effectuées par le SHOM ne laissent pas apparaître de mouvements apparents en vingt ans d'observation. Par contre, l'IGN a effectué des rattachements en 1973 et 1985 (tabl. 11). Les dénivelées entre repères indiquent une variation sur ce repère (-8-) de -1,1 mm entre les deux opérations de nivellement soit un affaissement probable de 0,09 mm/an.

Il apparaît donc que les nivellements effectués par le SHOM ne sont pas des nivellements de précision. Or, seul un nivellement précis peut être fiable pour une étude des variations du support et permettre de contrôler la stabilité de l'abri du marégraphe.

L'échelle de marée fixée sur la structure présente des écarts variables de 1958 à 1994 (repère 3- dans le tableau 10) : soit de 1967 à 1975 une variation de 0,81 mm/an, de 1977 à 1994 une variation de 0,12 mm/an et de 1958 à 1994 une variation de 0,30 mm/an. Ces valeurs ne sont pas à considérer comme exactes car les écarts-temps ne sont pas précis. Cependant, on peut noter que l'échelle présente des variations alors que la structure abritant le marégraphe n'en présente pas. Or l'échelle est fixée sur la paroi de l'abri.

On peut donc émettre un doute sur la qualité du nivellement. Il semble en fait que le millimètre des altitudes déterminées par le service entretenant l'observatoire ne soit pas significatif.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1889	4,4528	/	/	/	/	/	/	/
1900	4,4507	8,396	/	/	/	/	/	/
1903	4,452	8,398	/	10,037	/	/	/	/
1928	/	8,400	/	/	/	/	/	/
1958	4,452	/	8,792	10,041	10,122	/	/	/
1959	4,452	/	/	/	/	/	/	/
1967	4,452	/	8,794	10,041	10,122	/	/	/
1975	4,452	/	8,801	10,041	10,122	9,933	8,944	9,259
1977	/	/	8,801	10,041	10,122	9,933	8,944	9,259
1994	4,452	/	8,803	10,041	10,122	9,933	8,957	9,259

1. Zéro NGF.
2. Rivet sur échelle coté 3,9461 m.
3. Sommet de l'échelle (graduation 8,80 m) fixée contre l'abri du marégraphe.
4. Repère NO 1 coté 5,589 NGF, situé sur le pilier Est, près de l'entrée Nord du tunnel du château. (Repère fondamental).
5. Repère NO 2 coté 5,670 NGF, scellé à l'entrée Nord du tunnel du château.
6. Repère NO Oa coté 5,481 NGF, scellé à droite de l'entrée NW des souterrains du château.
7. Repère NO O1 coté 4,492 NGF, rivet scellé sur le quai à droite de la passerelle d'accès au marégraphe.
8. Repère NO O coté 4,807 NGF, situé sur la margelle du puits du marégraphe.

Tabl. 10 - Cotes (en mètre) du zéro hydrographique de Brest sous différents repères de 1889 à 1994 (données SHOM).

N° de repère du tableau 10	Repère	1973		1985		Différence d'altitude en mm
		Dénivelée en m	Altitude NGF en m	Dénivelée en m	Altitude NGF en m	
4	1		5,5895		5,5895	
6	Oa	- 0,1081	5,4814	- 0,1089	5,4806	- 0,8
7	O1	- 0,9890	4,4924	- 0,9797	4,5009	8,5
8	O	0,3149	4,8073	0,3075	4,8084	1,1

Tabl. 11 - Variation des repères de nivellement entre 1973 et 1985 à Brest (données IGN).

Pour des écarts-temps de l'ordre de ceux des nivellements nationaux, il est impossible de définir les variations exactes de la structure abritant le marégraphe. En effet, il est très difficile de retrouver l'historique des observatoires et les altitudes ne sont pas définies avec la précision requise pour une telle étude.

Pourtant on voit l'importance du rattachement avec les récentes mesures réalisées par l'IGN : elles laissent présager un enfoncement du puits de tranquillisation du marégraphe dans la vase. Mais l'écart-temps de 12 ans entre les 2 mesures est insuffisant et trop proche de la limite de précision des appareils pour le prendre en compte.

## 4. VARIATION ABSOLUE ET VARIATION RELATIVE DU NIVEAU DE LA MER

Les variations du niveau moyen calculées à partir des enregistrements marégraphiques sont en réalité des variations relatives. En effet, le marégraphe est placé sur un support terrestre dont la stabilité est loin d'être garantie (mouvements géologiques, affaissement des quais, etc.).

### 4.1. ETUDE THEORIQUE

Les repères de nivellement de référence sont considérés comme stables par les océanographes. Ils déterminent la cote du zéro hydrographique qui est fixe dans le temps par rapport à ces repères.

La surface de l'eau peut être déterminée par sa hauteur  $h$  par rapport au zéro hydrographique. Si  $Z_e$  représente l'altitude de la surface de l'eau par rapport au zéro du nivellement alors on a (fig. 24 et 25) :

$$Z_e = Z_r + h_0 - h$$

où  $h_0$  est la cote du zéro hydrographique par rapport au repère de référence terrestre et  $Z_r$  est l'altitude de ce repère.

Pour un période donnée  $\Delta t$ , on a :

$$\Delta Z_e = \Delta h + \Delta Z_r \quad (1)$$

avec :  $\Delta Z_e$ , variation absolue du niveau d'eau moyen.

$\Delta Z_r$ , variation du repère terrestre de référence.

$\Delta h$ , variation du niveau moyen mesuré par le marégraphe.

Mais, si l'appareil de mesure qui fixe le zéro hydrographique est posé sur un sol instable, alors il faut intégrer la propre variation de son support dans la relation précédente .

A un instant  $t$  on a :

$$Z_e = Z_r - (Dn/r + ho/n) + h$$

avec :  $Dn/r$ , dénivellée entre un repère  $n$  situé sur la structure du marégraphe et un repère de référence  $r$

$ho/n$ , cote du zéro hydrographique sous un repère  $n$



Pour une période  $\Delta t$ , on a :

$$\Delta Z_e = \Delta Z_r - \Delta D + \Delta h$$

avec,  $\Delta D = (Z_r - Z_{n_2}) - (Z_r - Z_{n_1})$   
 $= -Z_{n_2} + Z_{n_1}$   
 $= -\Delta Z_n$   
et  $Z_{n_i}$  altitude du repère  $n$  à la date  $i$

D'où, la variation du niveau moyen s'écrit :

$$\Delta Z_e = \Delta h + \Delta Z_r + \Delta Z_n \quad (2)$$

Dans la réalité, la mise en oeuvre de cette relation apparaît délicate : les repères scellés sur la structure de l'abri du marégraphe n'existent pas toujours ou n'ont pas toujours existé ou encore sont mal identifiés. Il faut alors supposer que la variation du support est identique à celle du repère de référence de nivellement  $\Delta Z_r$ , et en conséquence appliquer la relation (1) qui constitue de fait l'équation fondamentale.  $\Delta Z_e$  représente la variation absolue du niveau moyen, différente de la variation relative observée sur les enregistrements marégraphiques. Ceci signifie par exemple que pour deux marégraphes situés dans une zone de même évolution du niveau de la mer, le niveau moyen observé sur le marégraphe soumis à des mouvements tectoniques verticaux vers le haut sera plus faible que celui observé sur un marégraphe stable.

#### 4.2. APPLICATION A LA BRETAGNE NORD

L'essai de quantification de la variation absolue du niveau de la mer est limité à la Bretagne. La côte sud de la Bretagne n'a pas de marégraphe, à part celui de île de Groix qui n'est pas relié à un nivellement. L'essai n'est pas poursuivi sur les autres côtes de France pour plusieurs raisons :

- la durée des séries temporelles de mesures est la plus part du temps trop courte (de l'ordre de 20 ans) et donc pas significative ;
- devant l'impossibilité actuelle de pouvoir quantifier les erreurs de mesures sur le niveau moyen de la mer, il est essentiel de procéder à une analyse qualitative détaillée de ces données. Or cela n'a pas été possible pour les autres marégraphes, notamment celui de Marseille. Pour ce dernier, cela devrait pouvoir se faire prochainement, les données des marégrammes étant en cours de numérisation.

Cette quantification ne tient pas compte du rattachement entre marégraphes et réseau de nivellement car, lorsque les données existent, elles n'ont pas la précision suffisante ou lorsque cette précision est bonne c'est l'écart-temps entre les séries de mesures qui n'est pas suffisant.

Le tableau 12 donne une élévation absolue du niveau de la mer de  $1,93 \pm 0,26$  mm/an à Brest et des valeurs inférieures sur le reste de la côte. L'erreur associée prend en compte les erreurs dues aux nivellements ainsi que l'erreur sur la tendance du niveau de la mer (tracé de la droite de régression) mais pas les erreurs propres aux marégraphes. L'erreur est donc sous-estimée.

Les résultats du tableau 12 appellent quelques commentaires :

- la valeur de 1,23 mm/an retenue pour la variation relative du niveau de la mer à Brest prend en compte la période de 1860 à 1994. Si l'on s'en tient aux mêmes dates que celles où ont eu lieu les deux missions de nivellement (1889 et 1962), on a alors une valeur de 1,8 mm/an pour la variation relative du niveau de la mer. La variation absolue du niveau de la mer (marégraphe + nivellement) est alors de 2,5 mm/an. Ceci montre qu'en fonction des écarts-temps retenus pour établir la tendance de la variation, les chiffres varient tout en restant dans le même ordre de grandeur ;
- les marégraphes de Roscoff et de Saint-Servan sont situés à plusieurs kilomètres du réseau de nivellement et en l'absence de rattachement précis, il n'est pas possible de connaître les éventuels mouvements de la croûte entre ces 2 points ;
- le marégraphe de Roscoff présente une série temporelle très courte de 18 ans (cf. tabl. 8) qui n'est donc pas représentative ;

Les remarques précédentes montrent qu'il faut avoir un oeil critique sur les chiffres. L'élévation absolue du niveau de la mer pour laquelle les données sont les plus précises, est celle de Brest avec une valeur de l'ordre de  $2 \text{ mm/an} \pm 0,26$ . Il est toutefois probable quelle soit surestimée du fait de l'enfoncement possible de l'observatoire dans les sédiments vaseux de la Penfeld.

	$\Delta h$ Variation relative du niveau de la mer mm/an*	$\Delta Z_r$ Variation relative de la croûte terrestre mm/an	$Z_e$ Variation absolue du niveau de la mer mm/an*
Saint-Servan	$1,45 \pm 0,54$	$- 0,1 \pm 0,3$	$1,35 \pm 0,62$
Roscoff	$0,76 \pm 0,17$	$0,75 \pm 0,3$	$1,61 \pm 0,3$
Brest	$1,23 \pm 0,08$	$0,7 \pm 0,25$	$1,93 \pm 0,26$

\* l'erreur associée est incomplète.

Tabl. 12 - Variation absolue du niveau de la mer sur les côtes de la Bretagne Nord.

L'élévation du niveau de la mer obtenue avec les données satellitaires TOPEX-POSEIDON (Minster *et al.*, 1995) entre octobre 1992 et février 1995 donnent une tendance de  $+ 4,2 \pm 2,5$  mm/an dans l'hémisphère nord. Ces valeurs sont intéressantes et vont dans le même sens que celles données ci-dessus. Toutefois, elles sont à prendre à titre indicatif car la série temporelle de mesures reste encore très courte et révèle surtout des variations saisonnières ou interannuelles dont l'amplitude peut être importante mais qui n'apparaît pas sur les tendances long terme obtenues par moyenne.

## CONCLUSION

Pour connaître la part réelle de la tectonique actuelle dans les variations du niveau de la mer, il est indispensable d'intégrer les valeurs de la comparaison des nivellements aux données de marégraphie. Mais, dans la pratique, les inexactitudes liées à chaque type de données apparaissent nombreuses.

L'analyse qualitative des données marégraphiques ne peut être que relative, donc insatisfaisante. Pour la validité de la détermination des tendances du niveau marin, il faudrait pourtant intégrer les erreurs. Or, elles ne sont pas quantifiées actuellement. On peut toutefois envisager pour l'avenir une étude plus poussée sur les erreurs du puits de tranquillisation, en s'appuyant sur des observations supplémentaires, aujourd'hui inexistantes. En France, deux observatoires présentent des séries temporelles séculaires : celui de Brest entretenu par le SHOM, et celui de Marseille dont l'entretien incombe à l'IGN. Mais seul le marégraphe de Brest présente réellement une longue série d'observation dont la qualité a pu être examinée. L'analyse de la qualité des données du marégraphe de Marseille n'a pu être menée à bien car les données n'étaient pas numérisées lors de cette étude.

Pour une étude des tendances du niveau de la mer, les données exploitées (niveaux moyens annuels) doivent être de bonne qualité. Mais cette notion de "bonne qualité" est relative. Elle implique une analyse basée sur des séries temporelles suffisamment longues (trente ans d'observation), avec peu de lacunes, un entretien régulier et suivi de l'appareil et du puits de tranquillisation, et des mesures faites avec soin. Cependant, ces conditions ne sont pas toujours réunies. En effet, les marégraphes permanents implantés le long des côtes françaises, ont malheureusement des séries temporelles encore trop courtes (vingt ans) pour permettre une étude réelle des variations du niveau de la mer. En effet, le niveau de corrélation entre des séries de vingt ans d'observations et la série de cent vingt ans de Brest n'est pas satisfaisant.

Les mouvements verticaux actuels peuvent être mis en évidence par comparaison de nivellements. Les erreurs sur les nivellements sont soit corrigées soit prises en compte pour l'analyse et l'interprétation des données. La carte isocène montre des variations significatives des vitesses pour la Bretagne et la Provence. En effet, ces variations sont supérieures à la marge d'erreur qui est de  $\pm 0,19$  mm/an. Elles sont donc à prendre en compte dans la problématique de l'élévation du niveau de la mer. La Bretagne montre un basculement avec une élévation de la partie occidentale et des profils de nivellements stables à proximité du marégraphe de Brest. Pour la Provence, on constate également un basculement mais cette fois-ci avec un affaissement vers le sud-ouest c'est-à-dire vers le marégraphe de Marseille. Dans ce secteur, le profil de nivellement est perturbé sans que l'on en sache avec certitude la cause. Il semble que les mouvements observés pour les deux zones étudiées s'inscrivent dans une tendance géologique à plus long terme.

Les rattachements des marégraphes à la terre ne sont pas satisfaisants pour une étude sur l'élévation du niveau de la mer et ceci pour deux raisons :

- les rattachements sont réalisés par les organismes qui entretiennent les marégraphes avec des précisions suffisantes pour leur problème mais non pour notre problème ;
- les rattachements sont réalisés par des nivellements de 3ème ou 4ème ordre donc moins précis que le 1er ou le 2ème ordre nécessaire.

Malgré les réserves émises ci-dessus et grâce au travail effectué sur les causes d'erreurs et leur quantification, un essai d'estimation de la variation absolue du niveau de la mer est fait sur Brest : on obtient une élévation absolue de l'ordre de  $2 \pm 0,26$  mm/an.

Il serait intéressant de poursuivre l'étude en élargissant la zone étudiée par l'intégration de nouvelles observations, par exemple en utilisant les données d'outre Manche ou en exploitant les observations anciennes de marégraphes français, qui ne sont pas encore numérisées. Ainsi, ceci permettrait de confirmer et de compléter l'étude faite sur le niveau moyen de Brest.

## BIBLIOGRAPHIE

AINSCOW B., BLACKMAN D., KERRIDGE J., PUGH D., SHAW S. (1995) - Manuel on Sea Level - Measurement and Interpretation. UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission. Manuels and guides 14.

BESSERO G. (1985) - Cours sur les marées. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

CHARLOT P., HOTTIER P. (1979) - Les réseaux de nivellement modernes exécutés avec un niveau non automatique sont entachés d'une erreur systématique à pente positive vers le nord. Rapport IGN.

CHAURIS L., PLUSQUELLEC Y. (1980) - Carte géologique à 1/50 000 de Brest. Ed. BRGM.

EDGE R.C.A. (1959) - Some considerations arising from results of the second and third geodesic levellings of England and Wales. Bull. Géol., Nelle Série, n°52, pp. 28-36.

GUIEU G. et coll. (1969) - Notice de la carte géologique à 1/50 000 d'Aubagne-Marseille. Ed. BRGM.

GUILCHER A., HALLEGOUET B. (1981) - Le haut cordon de galets pléistocènes de Ruvein en Plovan (Finistère) et ses enseignements généraux. Bull. de l'A.F.E.Q., pp. 75-82.

GUILCHER A., HALLEGOUET B., MENEZ S. (1975) - Les formations superficielles du Mené (Bretagne Centrale). C.R. Acad. Sci., Fr., t. 281, Série D, pp. 219-222.

HALLEGOUET B. (1972) - Découverte d'un gisement de galets marins vers 200 m d'altitude près de Scaër (Finistère). C.R. Acad. Sci., Fr., t. 275, Série D, pp. 1859-1861.

HALLEGOUET B., VAN VLIET-LANOE B. (1986) - Les oscillations climatiques entre 125 000 ans et le maximum glaciaire, d'après l'étude des formations marines, dunaires et périglaciaires de la côte des Abers (Finistère). Bull. de l'A.F.E.Q., n°1/2, pp. 127-138.

KASSER M. (1989) - Un nivellement de très haute précision : la traversée Marseille-Dunkerque 1983. C.R. Acad. Sci., Fr., t. 309, Série II, pp. 695-700.

LABOREL J., MORHANGE C., LAFONT R., LE CAMPION J., LABOREL-DEGUEN F., SARTORETTO S. (1994) - Biological evidence of sea level rise during the last 4500 years on the rocky coasts of continental southwestern France and Corsica. *Marine geology*, n°120, pp. 203-223.

LARSON K.M., AGNEW D.C. (1991) - Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement. Precision and accuracy. *J. Geophys. Research*, vol. 96, n° B10, pp. 16547-16565.

LENOTRE N., THIERRY P., BROCHARD G., STEMMELIN I. (à paraître) - Une méthode de mise en évidence de mouvements verticaux actuels (la comparaison de nivellements).

MINSTER J.F., BROSSIER C., ROGEL P. (1995) - Variation of the mean sea level from TOPEX/POSEIDON, data, *JGR vol. 100*, n° C12, pp. 25153-25161.

MONTGOMERY R.B. (1969) - Comments on oceanic levelling. *Deep Sea Research*, sup. to volume 16.

PASKOFF R. (1993) - *Côtes en danger*, Ed. Masson, 247 p.

PIRAZZOLI P.A. (1991) - *World atlas of Holocene Sea-level Changes*, Elsevier, 299 p.

SIMON B. (1984) - *Les marégraphes côtiers - Référence 223 EPSHOM/E/OC/NP*.

SIMON B. (1994) - *La marégraphie. In : colloque "Elévation du niveau de la mer le long des côtes de France", séminaire Eau-Environnement n°4 du ministère de l'Environnement*, pp. 67-75.

VALLEY H. (1980) - *Niveaux zéros des mers. Mémoire 8053 de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes*.

**BRGM**  
Service Reprographie  
Impression et façonnage



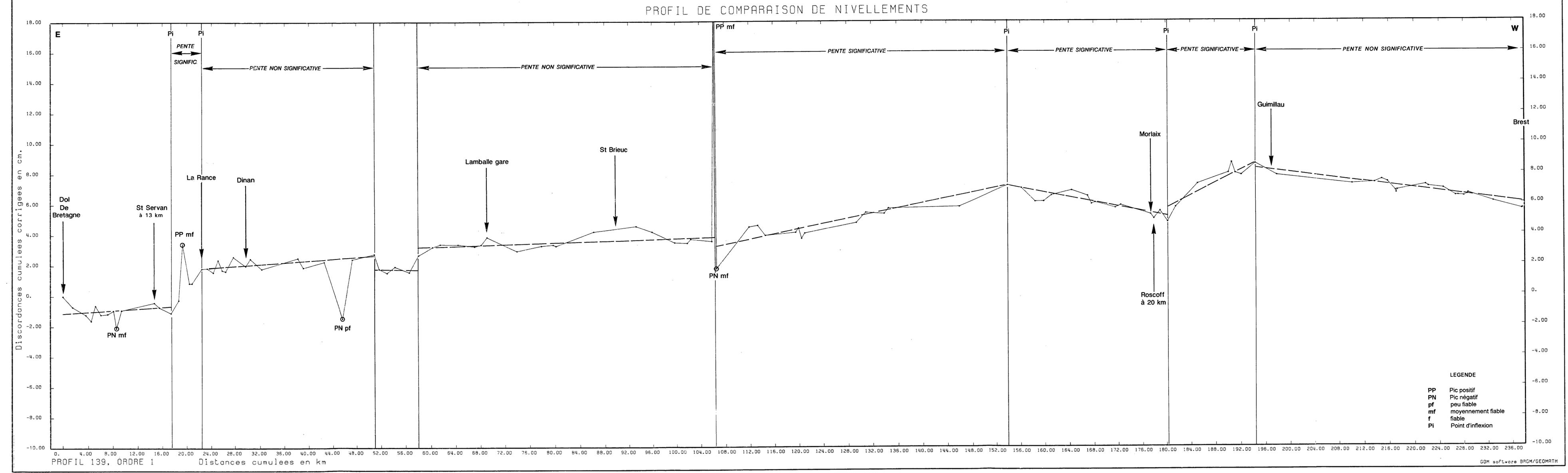
**Élévation du niveau moyen de la mer  
et tectonique actuelle  
Application à la Bretagne**

Profil de comparaison de nivellement  
Profil 139

Planche 1

juin 1996  
R 38964

**BRGM**  
DIRECTION DE LA RECHERCHE  
Département Géophysique et Imagerie géologique  
BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 02 - France - Tél.: (33) 38 64 34 34





Elévation du niveau moyen de la mer  
et tectonique actuelle  
Application à la Bretagne

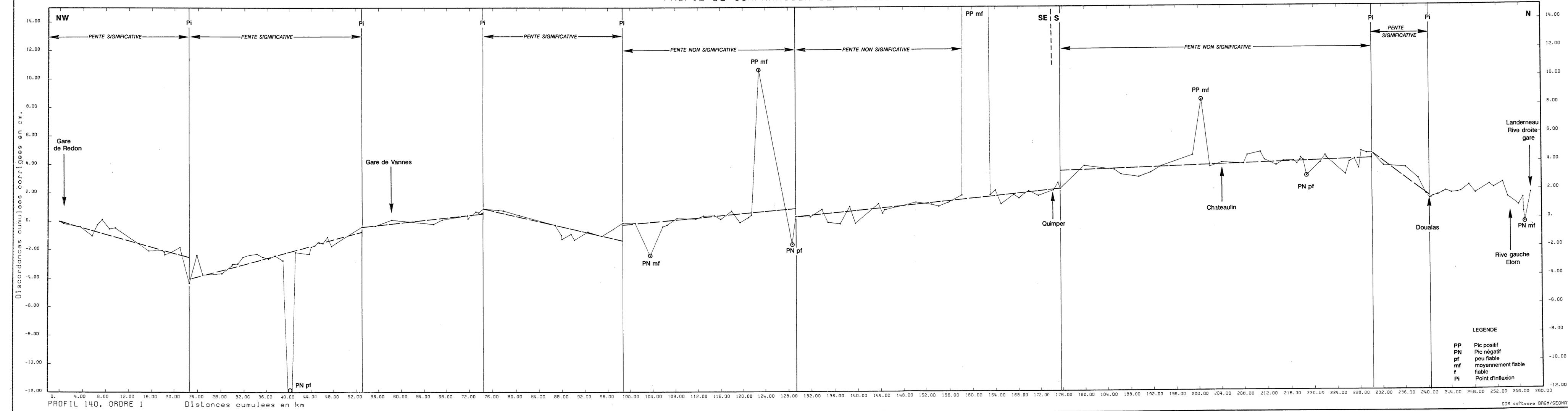
Profil de comparaison de nivellement  
Profil 140

Planche 2

juin 1996  
R 38964

BRGM  
DIRECTION DE LA RECHERCHE  
Département Géophysique et Imagerie géologique  
BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 02 - France - Tél.: (33) 38 64 34 34

PROFIL DE COMPARAISON DE NIVELLEMENTS





**Élévation du niveau moyen de la mer  
et tectonique actuelle  
Application à la Bretagne**

Profil de comparaison de nivellement  
Profil 200

Planche 3

juin 1996  
R 38964

**BRGM**  
DIRECTION DE LA RECHERCHE  
Département Géophysique et Imagerie géologique  
BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 02 - France - Tél.: (33) 38 64 34 34

**PROFIL DE COMPARAISON DE NIVELLEMENTS**

