



Rapport de stage ENSIETA 2^e année

Recueil d'enregistrements marégraphiques historiques de tsunamis et premières analyses

Projet MAREMOTI

Tâche 1 :

**Marégraphes et observations du niveau de la mer contenant des
signaux de tsunamis**

Gildas DELENCRE

Août 2009

Maître de stage : Ronan CREACH

TABLE DES MATIERES

Table des figures	3
Liste des abréviations	5
Introduction	6
A Présentation du projet MAREMOTI	7
B Descriptif des travaux effectués	9
B.1 RECHERCHE, INVENTAIRE	9
B.2 NUMERISATION	11
B.2.1 Intérêt du logiciel NUNIEAU	11
B.2.2 Principe de fonctionnement du logiciel	12
B.3 EXPLOITATION DU SIGNAL	14
B.3.1 Analyse préliminaire	15
B.3.2 Suppression du signal de marée.....	15
B.3.2.1 MAS	15
B.3.2.2 MARMONDE.....	15
B.3.3 Filtrage passe-haut du signal	16
B.3.4 Analyse temps-frequence	16
B.3.5 Détection du tsunami.....	17
B.3.6 Analyse statistique	18
B.4 ARCHIVAGE ET PRESENTATION DES RESULTATS	18
C Liste chronologique des tsunamis dans l'Atlantique Nord-Est	19
C.1 TABLEAU SYNTHETIQUE DES SEISMES AYANT GENERES DES TSUNAMIS	19
C.2 DESCRIPTIF DES EVENEMENTS AVEC LES DONNEES EXISTANTES	19
C.2.1 01/11/1755	19
C.2.2 18/11/1929	19
C.2.3 25/11/1941	20
C.2.4 22/05/1960	30
C.2.5 28/02/1969	31
C.2.6 07/09/1972	33
C.2.7 26/05/1975	34
C.2.8 26/12/2004	37
D Liste chronologique des tsunamis dans la Méditerranée	43
D.1 TABLEAU SYNTHETIQUE DES SEISMES AYANT GENERES DES TSUNAMIS	43
D.2 DESCRIPTIF DES EVENEMENTS AVEC LES DONNEES EXISTANTES	43
D.2.1 21/08/1856	43
D.2.2 23/02/1887	43
D.2.3 28/12/1908	44
D.2.4 09/09/1954	44
D.2.5 16/10/1979	44
D.2.6 10/10/1980	55
D.2.7 27/10/1985	61
D.2.8 21/05/2003	64
Conclusion	70
Bibliographie	71

TABLE DES FIGURES

Figure B.1 – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine.....	9
Figure B.2 – Simulation numérique de la propagation du tsunami de mai 2003 (séisme de Boumerdes) : état de la mer 68 minutes après le séisme, à son arrivée le long des côtes françaises.....	10
Figure B.3 – Hauteur maximale au large du tsunami du 21 mai 2003.....	11
Figure B.4 – marégramme de Port-Tudy (2004).....	12
Figure B.5 – visualisation des différents paramètres d’entrée de NUNIEAU	13
Figure B.6 – vérification du résultat obtenu par NUNIEAU.....	14
Figure B.7 – exemple de filtrage passe-haut réalisé par A. Rabinovich.....	16
Figure B.8 – exemple de graphique temps-fréquence réalisé par A. Rabinovich.....	16
Figure B.9 - Exemple de reconnaissance des phénomènes physiques dans la représentation temps-fréquence des signaux (source : A. Rabinovich).....	17
Figure C.1 – marégraphe de Casablanca (jetée transversale).....	20
Figure C.2 – marégramme de Casablanca (jetée transversale), 1941.....	21
Figure C.3 – numérisation du marégramme de Casablanca (jetée transversale) 1941 (UT)....	21
Figure C.4 – marégraphe de Casablanca (petite darse).....	22
Figure C.5 – marégramme de Casablanca (petite darse), 1941	23
Figure C.6 – numérisation du marégramme de Casablanca (petite darse) 1941 (UT).....	23
Figure C.7 – marégraphe de Mogador	24
Figure C.8 – marégraphe de Dieppe	24
Figure C.9 – marégramme de Dieppe, 1941.....	25
Figure C.10 – localisation de Newlyn.....	25
Figure C.11 – marégramme de Newlyn, 1941	26
Figure C.12 – marégraphe de Saint Malo.....	27
Figure C.13 – marégramme de Saint Malo, 1941.....	27
Figure C.14 – marégraphe de Lézardrieux	28
Figure C.15 – marégramme de Lézardrieux, 1941	28
Figure C.16 – localisation du marégraphe de Saint-Nazaire.....	29
Figure C.17 – marégramme de Saint-Nazaire, 1941	29
Figure C.18 – marégraphe de Dakar	30
Figure C.19 – marégramme de Dakar, 1960.....	31
Figure C.20 – marégraphe de La Rochelle - La Pallice	32
Figure C.21 – marégramme de La Rochelle, 1969 (UT+1).....	32
Figure C.22 – numérisation du marégramme de La Rochelle, 1969 (UT+1)	33
Figure C.23 – marégramme de La Rochelle, 1972	34
Figure C.24 – marégramme de La Rochelle, 1975	35
Figure C.25 – numérisation du marégramme de La Rochelle, 1975 (UT+1)	35
Figure C.26 – marégraphe du Conquet.....	36
Figure C.27 – marégramme du Conquet, 1975.....	36
Figure C.28 – représentation de la propagation du tsunami du 26/12/2004	37
Figure C.29 – marégraphe de Port-Tudy.....	38
Figure C.30 – marégramme de Port-Tudy, 2004	39
Figure C.31 – numérisation du marégramme de Port-Tudy, 2004 (UT+1).....	39

Figure C.32 – Données à cadence 10 minutes des marégraphes numériques de Brest, Concarneau et des Sables d’Olonne d’après A. Rabinovich.....	40
Figure C.33 – marégraphe de Brest.....	41
Figure C.34 – marégraphe de Concarneau.....	41
Figure C.35 – marégraphe des Sables d’Olonne.....	42
Figure D.1 – marégraphe de Mandelieu La Napoule.....	45
Figure D.2 – marégramme de Mandelieu-La Napoule, 1979	45
Figure D.3 – numérisation du marégramme de Mandelieu, 1979 (UT+1).....	46
Figure D.4 – marégraphe de Nice	46
Figure D.5 – marégramme de Nice, 1979	47
Figure D.6 – numérisation du marégramme de Nice, 1979 (UT+1).....	47
Figure D.7 – marégraphe de Toulon.....	48
Figure D.8 – marégramme de Toulon, 1979.....	48
Figure D.9 – marégraphe de Port de Bouc.....	49
Figure D.10 – marégramme de Port de Bouc, 1979.....	49
Figure D.11 – numérisation du marégramme de Port de Bouc (UT+1)	50
Figure D.12 – marégramme de Gènes, 1979	50
Figure D.13 – marégraphe de Monaco	51
Figure D.14 – marégramme de Monaco, 1979.....	51
Figure D.15 – marégraphe de Sète	52
Figure D.16 – marégramme de Sète, 1979	52
Figure D.17 – marégraphe de Villefranche-sur-mer.....	53
Figure D.18 – marégramme de Villefranche-sur-mer, 1979	53
Figure D.19 – numérisation du marégramme de villefranche 1979 (UT+1).....	54
Figure D.20 – marégramme de Malaga, 1979.....	54
Figure D.21 – marégraphe du Grau de la Dent.....	56
Figure D.22 – marégrammes de Grau de la Dent, 1980	56
Figure D.23 – marégramme de Mandelieu-La Napoule, 1980	57
Figure D.24 – marégraphe de Mèze.....	57
Figure D.25 – marégramme de Mèze, 1980.....	58
Figure D.26 – marégrammes de Nice, 1980	59
Figure D.27 – marégramme de Sète, 1980.....	60
Figure D.28 – marégramme de Villefranche-sur-mer, 1980	61
Figure D.29 – marégramme de Mandelieu - La Napoule, 1985	62
Figure D.30 – marégramme de Nice, 1985	63
Figure D.31 – marégraphe de Port Vendres	63
Figure D.32 – marégramme de Port-Vendres, 1985.....	64
Figure D.33 – marégraphe de Marseille	66
Figure D.34 – marégraphe d’Ajaccio	66
Figure D.35 – marégrammes et leurs numérisations de Marseille, Nice, Monaco, Toulon et Ajaccio en 2003.....	67
Figure D.36 – marégraphe de Senetosa	68
Figure D.37 – marégramme et numérisation de Senetosa, 2003 (UT).....	68
Figure D.38 – marégramme de Palma de Mallorca, 2003	69

LISTE DES ABREVIATIONS

- **MAREMOTI** : MAREgraphie, observations de tsunaMis, mOdélisation et éTudes de vulnérabIilité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale
- **SHOM** : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
- **ANR** : Agence Nationale de la Recherche
- **CEA** : Commissariat à l'Énergie Atomique
- **DASE** : Département Analyse, Surveillance, Environnement
- **CETE** : Centre d'Étude Technique de l'Équipement
- **DDE** : Direction Départementale de l'Équipement
- **NUNIEAU** : NUmérisation des NIveaux d'EAU
- **MAS** : MArée Simon
- **LEGOS** : Laboratoire d'Étude en Géodésie et Océanographie Spatiale
- **BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- **IGN** : Institut Géographique National

INTRODUCTION

La mission qui m'a été confiée visait à initier la contribution du SHOM au volet « Marégraphes et observations du niveau de la mer contenant des enregistrements de tsunamis » du projet MAREMOTI (MAREgraphie, observations de tsunaMis, mOdélisation et éTudes de vulnérabIilité pour le nord-est Atlantique et la Méditerranée occidentale).

Ce projet de recherche, soutenu par l'ANR, et impliquant neuf organismes français et un portugais pendant trois ans, a pour but de réaliser des études et de constituer des bases de données opérationnelles nécessaires au futur centre national d'alerte aux tsunamis. Le centre couvrira les côtes françaises de métropole et aura un rôle régional pour le bassin de la Méditerranée occidentale.

Ce risque pourrait paraître lointain car le terme « tsunami » fait désormais penser à la catastrophe du 26 décembre 2004 dans l'Océan Indien et on n'imagine pas un tel événement se produire en France métropolitaine. Néanmoins, l'activité sismique du bassin méditerranéen et d'une zone au large du Portugal nécessite un système d'alerte qui soit capable de prévenir les populations s'il y a un risque de tsunami sur nos côtes à la suite d'un séisme. Même s'il est relativement rare, le risque tsunami existe bel et bien.

Mon rôle dans ce projet était d'amorcer les recherches d'enregistrements marégraphiques et d'initier la numérisation et l'analyse des signaux. Ce stage intervient peu de temps après le lancement du projet pour lequel le SHOM emploiera un ingénieur dès septembre et ce pour une durée de deux. Je devais donc amorcer le travail c'est-à-dire récolter des informations marégraphiques pour des séismes donnés et les référencer afin d'établir un premier aperçu de tsunamis ayant atteints les côtes françaises. Je devais également chercher le maximum d'informations possible sur les marégraphes utilisés, leur localisation, leur fonctionnement... Ensuite, mon rôle était de numériser les marégrammes papier au moyen du logiciel NUNIEAU. Enfin un travail de mise en forme et de prétraitement du signal sous MATLAB s'avéra nécessaire afin de déterminer les caractéristiques de chaque phénomène. La suppression du signal de marée des enregistrements m'a conduit à réaliser des prédictions de marée à l'aide des programmes du SHOM.

A PRESENTATION DU PROJET MAREMOTI

Les bases de données existantes sur des événements historiques et récents, telle que celle mise en place par le BRGM pour les côtes françaises, indiquent que la Méditerranée et l'Atlantique nord-est peuvent potentiellement être atteints par un tsunami.

De plus, le tsunami de 2003 généré par le séisme de Boumerdès nous a rappelé l'éventualité de dommages causés par un tsunami de taille moyenne. D'autant plus que les études sur les flux migratoires nous laissent penser que la densité de population sur les côtes va s'accroître considérablement durant les cinquante prochaines années et le nombre de personnes exposées au risque de tsunami sera d'autant plus grand.

C'est pourquoi il est nécessaire de se munir d'un système d'alerte performant et de préparer la population à l'éventualité d'un tsunami. Pour cela, il est important de créer une base de données complète des tsunamis ayant atteints les côtes françaises.

Le projet MAREMOTI se développe ainsi sur 5 points essentiels qui sont :

1. **L'observation marégraphique** : comprenant la collecte et l'analyse des marégrammes historiques portant la trace d'un tsunami dans le but d'enrichir les bases de données et valider les résultats obtenus par la modélisation.
2. **Les observations géologiques et historiques** des tsunamis dans le but d'enrichir les bases de données des zones géographiques concernées.
3. **La modélisation numérique** pour étudier les événements historiques ou établir les conséquences des scénarios possibles.
4. **Les études de scénarios possibles** pour les zones dont l'activité sismique est importante.
5. **L'étude de vulnérabilité et des dommages potentiels** en ce qui concerne les côtes françaises.

Le rôle du SHOM dans ce projet est d'effectuer les recherches nécessaires dans toutes les archives françaises afin de trouver des enregistrements marégraphiques de tsunamis historiques en Atlantique Nord-Est et Méditerranée occidentale et de développer des outils spécifiques aux signaux de tsunamis contenus dans des enregistrements marégraphiques. D'autant plus que la base de données actuelle du BRGM ne comprend pas les mesures marégraphiques.

L'observation éventuelle de l'amplification ou de l'atténuation des sites d'observations de marée et des types d'installations marégraphiques est un élément important pour les marégraphes qui participeront à la surveillance du niveau de la mer au profit du futur centre national d'alerte.

"...The spectra of tsunamis from different earthquakes are similar at the same location but are quite different for the same event for nearby locations..." [Omori, 1902, and many others...]

Les enregistrements marégraphiques sont les seules données physiques des tsunamis et souvent les seules observations disponibles. De plus, le fait que les marégraphes soient

positionnés dans des ports augmente dans de nombreux cas la probabilité de détecter ce phénomène. En effet, il ne faut pas oublier l'étymologie du mot tsunami qui signifie onde de port. En dehors de certains ports très fermés et retirés, c'est à ces endroits que le phénomène est le plus souvent visible et le plus important.

Il faut noter que tous les enregistrements originaux sont importants. L'observation du phénomène est aussi importante que la preuve lors d'un événement donné qu'aucune vague n'ait été enregistrée par l'ensemble des marégraphes ou quelques marégraphes situés dans des ports particuliers. Seuls les marégrammes permettent d'évaluer précisément le risque de tsunami dans un port donné et d'en déduire par la mesure de son amplitude et de la période des ondes sa sensibilité à l'aléa tsunami.

La continuité et la disponibilité des données marégraphiques enregistrées à une cadence suffisante pour voir les vagues de tsunami constituent les requis nécessaires pour constituer des bases de données fiables et complètes. En effet les enregistrements marégraphiques sont des données uniques qui permettent de confirmer si un tsunami a été induit ou non par un tremblement de terre ou par tout autre phénomène géophysique comme un glissement de terrain par exemple.

Le but, à terme, est donc de créer une base de données comprenant :

- les informations sur les enregistrements marégraphiques : début, durée, échantillonnage, temps d'arrivée du tsunami, premier mouvement, amplitude et période maximum, amplitude et période de la première vague, date et heure de l'événement.
- les caractéristiques de l'événement sismique initiateur : lieu, date, heure...

Cette base sera utilisée par le centre d'alerte lors d'un nouvel événement, il lui suffira de consulter les amplitudes mesurées dans les différents ports constatées lors d'événements antérieurs similaires à celui qui vient de se produire.

B DESCRIPTIF DES TRAVAUX EFFECTUES

B.1 RECHERCHE, INVENTAIRE

La France est très riche en observations systématiques de hauteur d'eau le long des côtes sur de longues périodes de temps (Figure B.1). Ce sont les astronomes La Hire et Picard qui, en 1679, réalisent les premières séries de mesures en France, à Brest, pendant une dizaine de jours. Dès 1700, les observatoires du niveau de la mer vont se multiplier sur les côtes de France avec le soutien particulier de l'Académie des Sciences. L'invention d'un appareil mécanique à enregistrement automatique, le marégraphe, en 1839, est attribuée à l'Ingénieur Hydrographe français R. Chazallon.

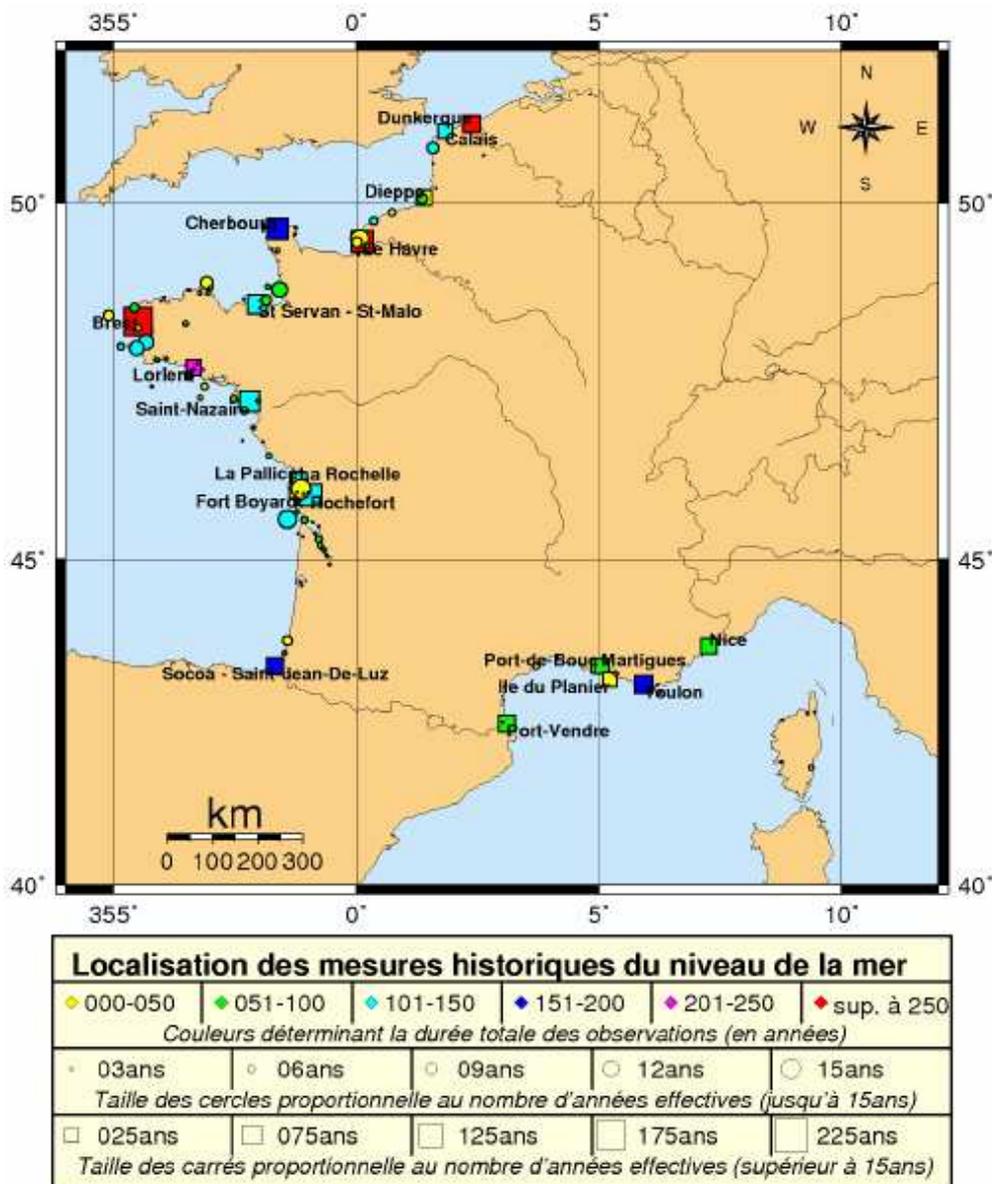


Figure B.1 – Localisation des observations du niveau de la mer en France métropolitaine

source : 300 ans de mesures marégraphiques en France de Nicolas Pouveau

Le SHOM est un des organismes français ayant le plus grand nombre d'archives marégraphiques, il lui est donc apparu important de contribuer au projet MAREMOTI en effectuant dans toutes les archives nationales la recherche d'enregistrements de tsunamis ayant pu atteindre les marégraphes existants sur nos côtes à l'époque des faits. Plus exactement, la recherche couvrira les marégraphes opérés par la France et ayant été mis en œuvre en Atlantique Nord-Est et Méditerranée occidentale et pourrait donc inclure à certaines époques des données collectées au Sénégal, au Maroc, en Algérie, en Tunisie...

Les enregistrements obtenus au cours du stage ont principalement été recherchés en se focalisant sur une liste de séismes potentiellement tsunamigènes et principalement pour le XXème siècle.

Comme expliqué précédemment, ces marégrammes historiques sont d'une importance capitale pour pouvoir valider les modèles actuels de propagation de tsunami développés par le CEA (Figure B.2 et Figure B.3).

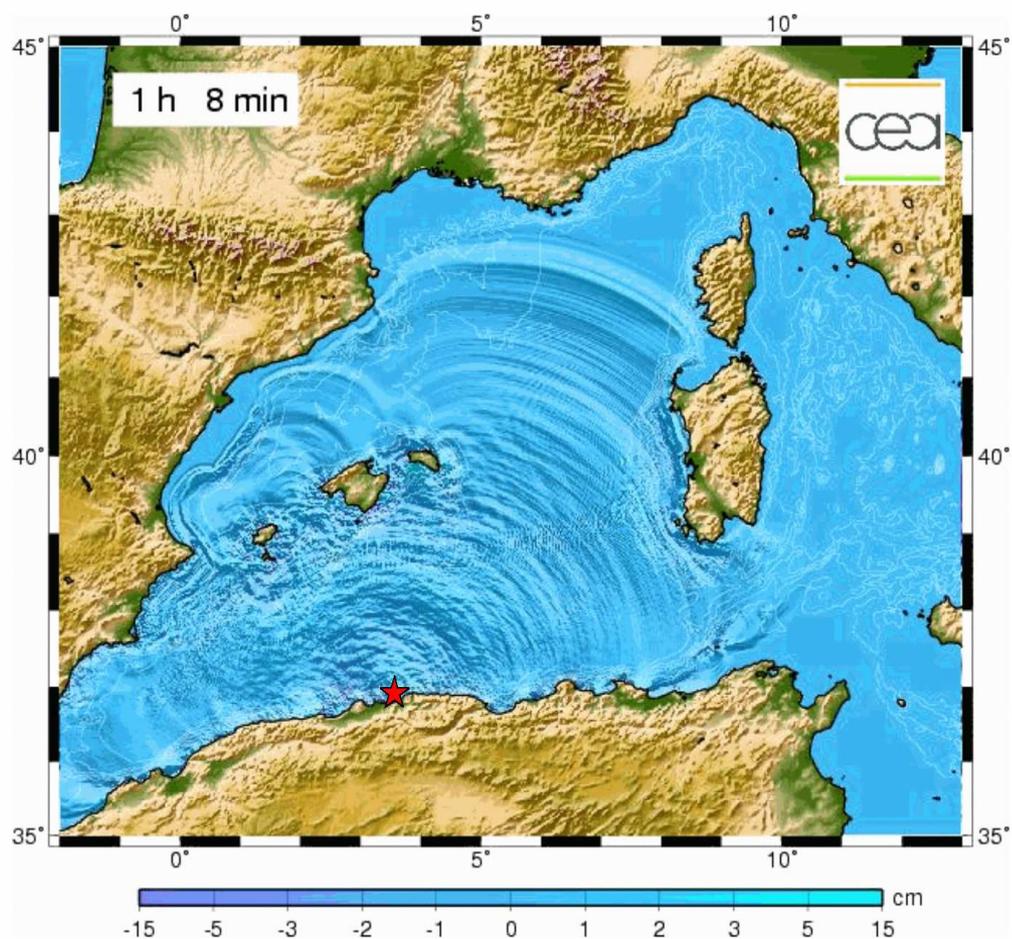


Figure B.2 – Simulation numérique de la propagation du tsunami de mai 2003 (séisme de Boumerdes) : état de la mer 68 minutes après le séisme, à son arrivée le long des côtes françaises.

source : CEA

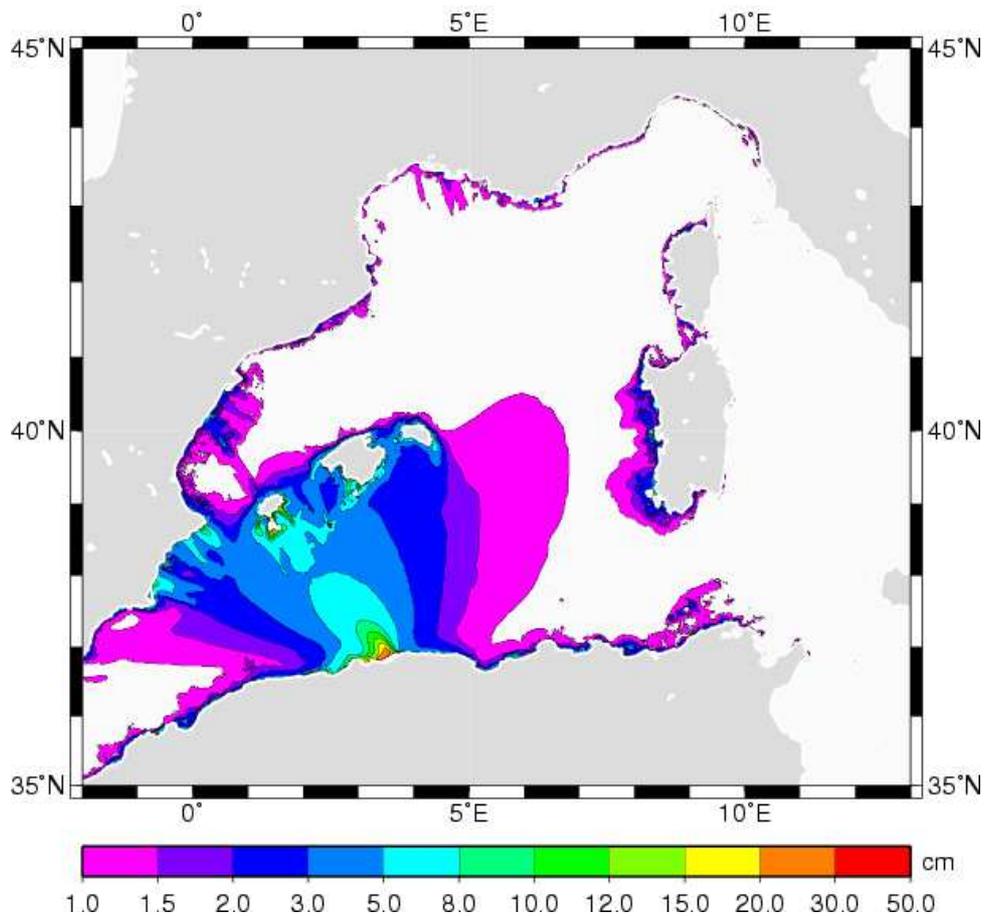


Figure B.3 – Hauteur maximale au large du tsunami du 21 mai 2003

source : CEA

Il est ensuite important d'associer à cet inventaire détaillé des données recueillies toutes les informations nécessaires sur l'événement déclencheur, la plupart du temps un séisme, le but étant de valider les modèles de propagation théorique des tsunamis. En effet la modélisation doit permettre à partir des paramètres physiques d'un séisme (magnitude, coordonnées de l'épicentre...) d'en déduire quelle hauteur de tsunami serait susceptible de frapper les côtes françaises.

B.2 NUMERISATION

B.2.1 INTERET DU LOGICIEL NUNIEAU

NUNIEAU (NUMérisation des Niveaux d'EAU) est un logiciel qui a été développé sous Matlab par le CETE Méditerranée pour la numérisation de limnigrammes et de marégrammes papiers. En effet, de nombreux marégraphes ou limnigraphes sont utilisés pour mesurer le niveau d'eau en continu en milieu marin, dans des étangs ou en rivière. Cet outil se base sur la reconnaissance des couleurs du signal de marée et sur le calage de la planche. Le SHOM utilise donc ce logiciel afin de numériser des marégrammes papiers.

Cet outil est indispensable dans le cadre de ce projet car les données marégraphiques recueillies ont été mesurées par des marégraphes de l'époque c'est-à-dire des marégraphes mécaniques et non numériques comme actuellement. A noter qu'en France, les premiers marégraphes permanents numériques ont été mis en place en 1992. Il est donc possible d'isoler aisément le signal correspondant au tsunami sur un marégramme comportant plusieurs jours de mesures.

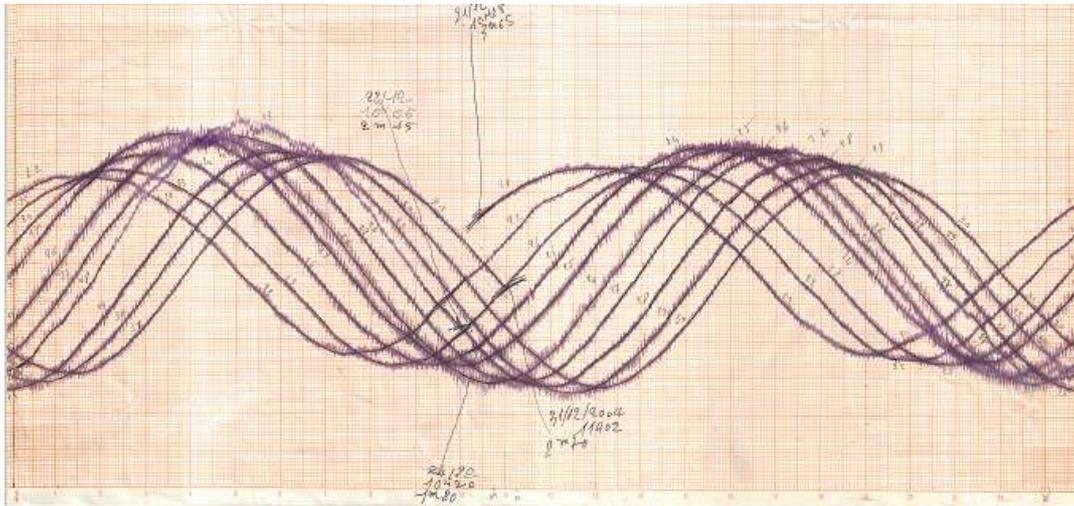


Figure B.4 – marégramme de Port-Tudy (2004)

source : SHOM, Port-Tudy (île de Groix) du 21/12/04 au 31/12/04

B.2.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL

Le logiciel NUNIEAU travaille à partir d'images scannées de marégrammes (Figure B.4.). Les scans réalisés dans le stage ont été effectués avec un scanner de plans 44" Context SD4430.

NUNIEAU est basé sur la reconnaissance de pixels suivant leur couleur. Les marégraphes mécaniques opérés par le SHOM et les autres organismes français (DDE, IGN...) utilisaient des feuilles de papier type papier millimétrique (adaptées aux données horaires) de formats compris entre A4 (souvent en rouleau) et A0 (par feuille). Des réglages particuliers du logiciel, qui concernent la dimension de la feuille ainsi que la couleur des pixels, permettent de traiter différents types de marégramme papier.

Les marégrammes sont généralement de type journalier (1 jour pour une rotation de la feuille, la feuille pouvant rester 7 jours en place en Manche et Atlantique et donc contenir 7 courbes) ou hebdomadaire (type utilisé en Méditerranée et présentant une résolution temporelle inférieure).

La première étape consiste donc à renseigner les « paramètres de calage » du type de marégramme utilisé, à savoir le nombre de carreaux, l'échelle employée, la date... Suite à cela, on peut « caler » l'image à proprement parlé c'est-à-dire que l'on détermine (graphiquement à l'aide d'un curseur) l'origine des temps ainsi que le zéro hydrographique.

Vient ensuite l'étape consistant à reconnaître les pixels représentant le signal de marée en déterminant la bande de couleur RGB de celui-ci.

Puis on sélectionne la zone du marégramme à traiter à l'intérieur de laquelle on peut également déterminer des « zones à supprimer » afin d'éliminer les artefacts. Voilà ainsi les données dont dispose NUNIEAU pour effectuer son calcul.

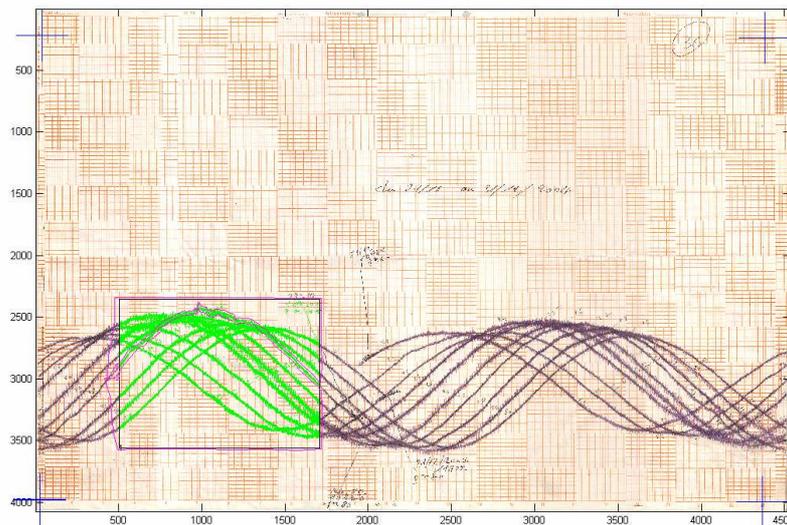


Figure B.5 – visualisation des différents paramètres d'entrée de NUNIEAU

en vert les pixels récupérés dans une bande de couleur appartenant au signal et avec quelques artefacts

Il faut ensuite préciser le pas de temps désiré pour la donnée numérique. Le logiciel va rechercher autour de chaque unité de temps les pixels situés dans une bande de largeur correspondant au pas de temps sélectionné. Par exemple, si le pas de temps est de 1 min, il va chercher les pixels situés entre 30 sec avant et 30 sec après chaque minute. Le résultat obtenu est une liste comprenant pour chaque repère temporel :

- la valeur minimum
- la valeur maximum
- le barycentre des pixels récupérés
- la moyenne entre le maximum et le minimum

Année	Mois	Jour	Heure	Minute	Seconde	Minimum	Barycentre	Maximum	Moyenne	Pixels
2004	12	28	2	28	0	-9999	-9999	-9999	-9999	0
2004	12	28	2	29	0	-9999	-9999	-9999	-9999	0
2004	12	28	2	30	0	-9999	-9999	-9999	-9999	0
2004	12	28	2	31	0	341.806	348.046	352.649	347.228	76
2004	12	28	2	32	0	342.767	348.443	353.292	348.029	85
2004	12	28	2	33	0	341.494	348.800	354.571	348.033	97
2004	12	28	2	34	0	345.963	351.145	355.531	350.747	68
2004	12	28	2	35	0	346.922	352.728	357.449	352.186	94
2004	12	28	2	36	0	348.202	354.202	361.280	354.741	79

Ce tableau a été obtenu avec un pas de temps de 1 min. En effet, pour l'étude de phénomènes tels que les tsunamis, il est indispensable d'avoir un pas de temps assez faible, la difficulté réside dans le fait qu'il ne peut pas toujours y avoir de pixels correspondant selon l'état de dégradation du marégramme (parfois avancé s'il s'agit de marégrammes très anciens). Malgré cela, toutes les acquisitions ayant été effectuées pendant le stage ont été obtenues avec un pas de temps de 1 min car c'est la limite supérieure pour l'étude de ce phénomène.

La dernière colonne donne le nombre de pixels identifiés dans la tranche horaire. Les lignes comportant l'indication -9999.000 sont celles pour lesquelles aucune valeur ne peut être donnée, en raison de l'absence de pixels.

Il est enfin possible de visualiser les pixels récupérés par le logiciel, après les calculs effectués, en les superposant à l'image de départ afin de vérifier la cohérence des résultats.

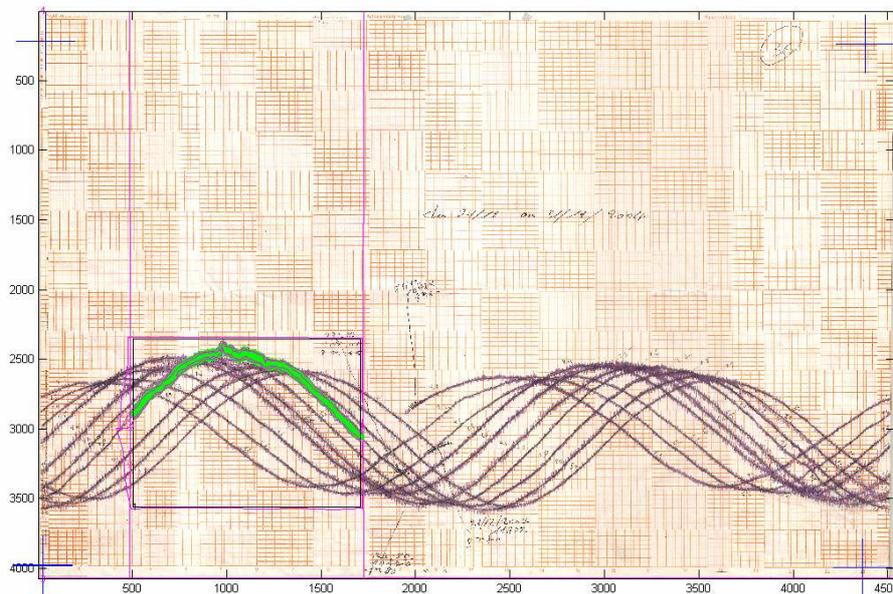


Figure B.6 – vérification du résultat obtenu par NUNIEAU

B.3 EXPLOITATION DU SIGNAL

Une fois le signal numérisé, le traitement du signal peut commencer. La méthode envisagée lors de ce stage pour l'exploitation du signal est issue de la bibliographie, il s'agit de celle présentée dans Rabinovich et al., 2006.

Sa description a été adaptée à nos outils et besoins propres. L'implémentation de la méthode pendant le stage s'est arrêtée au stade B.3.3.

B.3.1 ANALYSE PRELIMINAIRE

Elle comprend l'examen et la vérification des observations marégraphiques. Les observations traitées sont si possible les mesures brutes. Toutes les erreurs (pics, décalages temporels, ...) sont corrigées. L'échantillonnage recommandé est de 1 minute, en effet du bruit perturbant la détection peut apparaître à plus haute fréquence.

B.3.2 SUPPRESSION DU SIGNAL DE MAREE

Dans un premier temps, il est intéressant de comparer le signal mesuré recueilli au signal de marée prédite. Cela permet d'une part, de vérifier la corrélation des systèmes horaires des deux signaux et d'autre part, en faisant la différence des deux (la surcote), de visualiser de manière plus ou moins nette – en fonction de la présence dans le signal de surcote d'événement météorologique ou de seiche pouvant se superposer au signal tsunami - le signal propre au tsunami. Afin d'effectuer ces prédictions, il est possible d'utiliser plusieurs outils développés par le SHOM tels que MAS ou MARMONDE.

B.3.2.1 MAS

Le programme MAS est conçu pour traiter les hauteurs horaires d'observation de marée. Le logiciel est constitué d'une suite de sub-routines numérotée de 1 à 31. Une action consiste en l'exécution d'une suite de sub-routines. Chaque sub-routine exécute une tâche. Les prédictions de marée utilisées dans le stage ont été réalisées par l'enchaînement des routines 14 et 18 de MAS.

L'utilité de ce programme dans le cadre de cette étude est donc d'effectuer des prédictions de hauteurs d'eau. Cette action requiert les constantes harmoniques du lieu étudié. Pour cela, le SHOM dispose d'une base de données prévue à cet effet, composée d'environ 6000 ports et contenant les constantes harmoniques de chacun. Le programme sort donc un fichier contenant les hauteurs d'eau calculées à une cadence temporelle de 1 min puisque le fichier d'observation généré par NUNIEAU possède également cette cadence.

B.3.2.2 MARMONDE

Un problème se pose dès lors que le port étudié ne figure pas dans la base de données du SHOM. Pour cela, on utilise MARMONDE afin de calculer les constantes harmoniques du lieu considéré. Il faut ensuite calculer les prédictions de hauteurs d'eau à l'aide de MAS avec le fichier de constantes harmoniques préalablement sorti par MARMONDE.

Ce programme utilise un modèle de marée développé par le LEGOS (Laboratoire d'Etude en Géodésie et Océanographie Spatiale) utilisant les données fournies par le satellite TOPEX POSEIDON. MARMONDE utilise de plus les données existantes au SHOM telles que les constantes harmoniques utilisées par MAS ainsi que le trait de côte mondial. Le programme pourra donc effectuer une interpolation, quelque soit le point du globe, à l'aide des ports voisins (plus ou moins proche) et ainsi sortir un fichier de constantes harmoniques pour une latitude et une longitude données.

Les traitements réalisés pendant le stage s'arrêtent à ce stade, la suite des étapes est décrite à partir de la bibliographie afin de donner une méthodologie utile pour la suite de l'exploitation.

B.3.3 FILTRAGE PASSE-HAUT DU SIGNAL

Il a pour objectif d'isoler la bande de fréquence du tsunami et de faciliter la détection du tsunami. Un filtre passe-haut est appliqué à la surcote. Les données filtrées sont utilisées pour les tracés et pour estimer les données caractéristiques du tsunami. En effet, le but est de garder uniquement les fréquences caractéristiques du tsunami sans altérer l'amplitude de ce dernier.

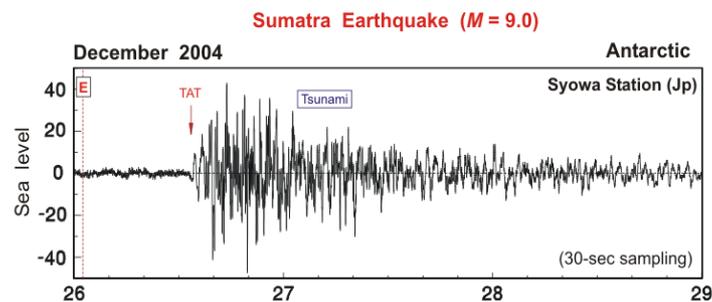


Figure B.7 – exemple de filtrage passe-haut réalisé par A. Rabinovich

source : *The Sumatra tsunami of 26 December 2004 as observed in the North Pacific and North Atlantic oceans*

B.3.4 ANALYSE TEMPS-FREQUENCE

L'analyse temps-fréquence consiste en la décomposition en ondelettes, elle permet d'offrir une description plus informative du signal révélant la variation temporelle de son contenu fréquentiel.

La démarche est d'utiliser le signal de surcote non filtré – différence entre le signal observé et la prédiction – afin d'étudier les variations temps-fréquence des oscillations grandes ondes à différents endroits. Ceci dans le but de spécifier l'arrivée du tsunami et d'examiner les propriétés non stationnaires de ses vagues.

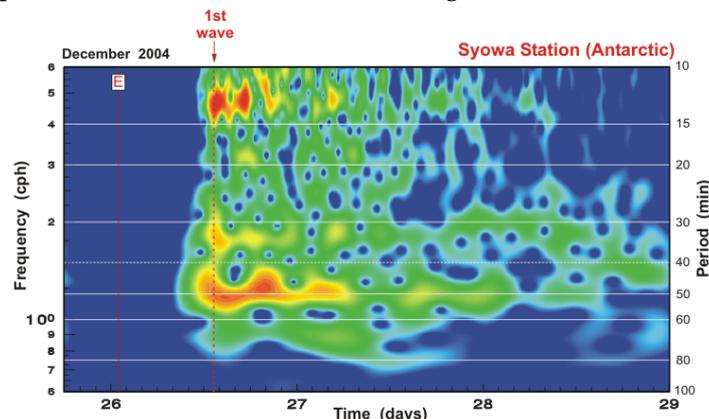


Figure B.8 – exemple de graphique temps-fréquence réalisé par A. Rabinovich

source : *The Sumatra tsunami of 26 December 2004 as observed in the North Pacific and North Atlantic oceans*

On peut ainsi, en récoltant les données à différents endroits, observer l'avancée du tsunami et son intensité. La figure ci-dessous illustre parfaitement ce phénomène.

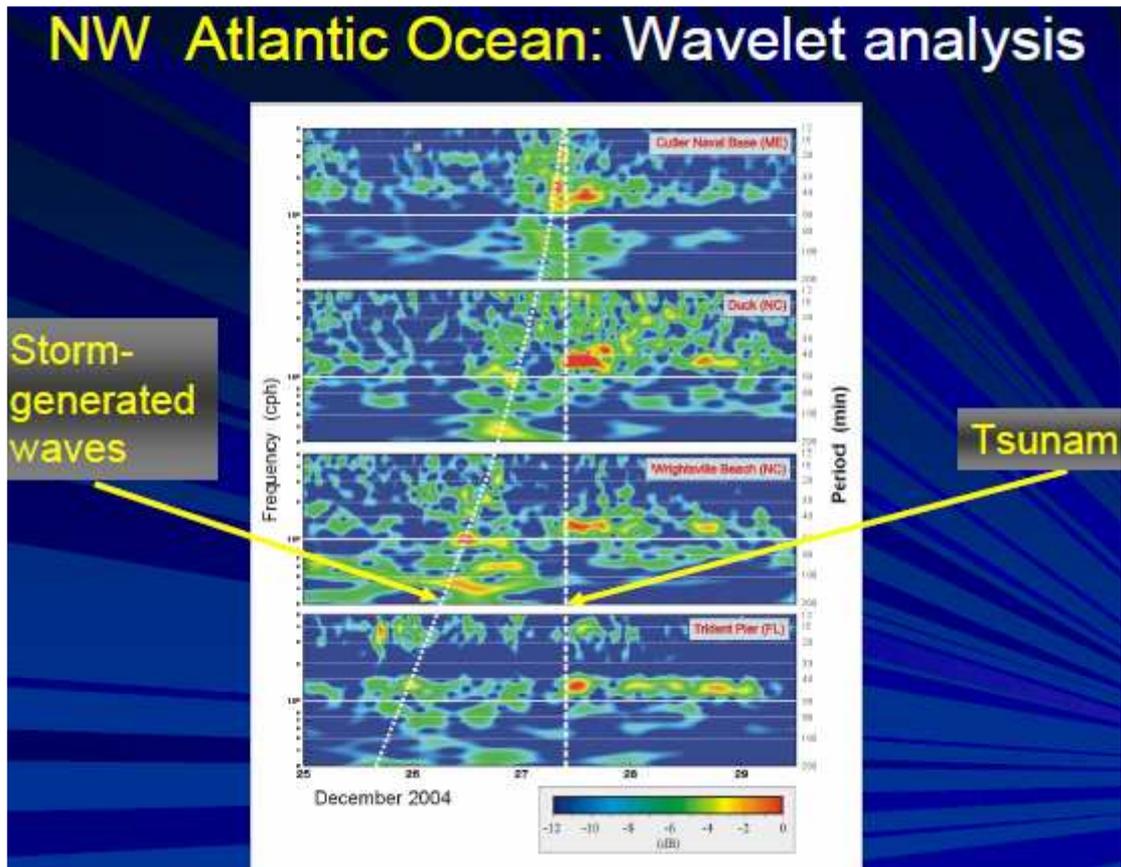


Figure B.9 - Exemple de reconnaissance des phénomènes physiques dans la représentation temps-fréquence des signaux (source : A. Rabinovich)

On peut noter par ailleurs que l'onde de tempête a une vitesse bien plus faible que celle du tsunami. En effet la vitesse de propagation d'un tsunami s'écrit : $c = \sqrt{g \cdot h}$ où g est la constante de gravitation 9.81 m/s^2 et h la profondeur. Ainsi, en eau profonde, le tsunami se propage très rapidement (entre 700 et 900 km/h lorsque les fonds marins sont compris entre 4000 et 7000 m), avec une longueur d'onde très importante (de 100 à plus de 200 km). Soulignons, à titre comparatif, qu'une vague générée par le vent a une période de 10 s environ et une longueur d'onde de 150 m.

B.3.5 DETECTION DU TSUNAMI

Pour cette étape, au combien importante, il convient d'utiliser les résultats des deux étapes précédentes. En effet, il est parfois difficile de visualiser la vague propre au tsunami sur le signal filtré passe-haut seul, c'est pourquoi l'analyse temps-fréquence vient pallier ce manque.

En général, la capacité à détecter un tsunami sur un marégramme dépend du ratio signal/bruit qui peut altérer fortement les données. Par exemple, pour le tsunami de 2004, le

séisme s'étant produit en Indonésie, il fût aisé de détecter le tsunami sur des marégrammes provenant de l'océan Indien puisque le ratio signal/bruit était d'environ 40/1 à 20/1, alors que sur des marégrammes provenant du Pacifique ou de l'Atlantique le ratio était de 4/1 à 1/1 donc la tâche fût plus délicate.

La seiche est également un phénomène qui gêne la détection des tsunamis. En effet les marégraphes sont situés, pour la plupart, dans des ports ou des bassins en partie clos afin de s'abriter de la houle et des vagues. Le problème étant que parfois, selon la configuration du bassin, la seiche peut avoir la même fréquence que celle du tsunami et donc rendre difficile la détection de ce dernier.

Enfin, il existe aussi des phénomènes semblables aux tsunamis que nous connaissons, il s'agit des raz de marée dus aux ondes de tempête, ceux-ci sont générés par les conditions atmosphériques et présentent souvent les mêmes caractéristiques fréquentielles que les tsunamis d'origine sismique ce qui peut causer les mêmes dommages sur les côtes. Ainsi, en 2004, un important raz de marée généré par un violent cyclone a frappé la côte Est des Etats-Unis et du Canada peu de temps avant l'arrivée du tsunami provenant de Sumatra, on imagine donc les difficultés que cela causa pour la détection.

B.3.6 ANALYSE STATISTIQUE

Les caractéristiques statistiques basiques des vagues de tsunami telles que l'heure d'arrivée, le temps de propagation, la hauteur des vagues... sont mesurées dans tous les cas où l'on peut distinguer un signal de tsunami sur le marégramme.

B.4 ARCHIVAGE ET PRESENTATION DES RESULTATS

L'ensemble des données trouvées lors de ce stage est présenté dans ce rapport. Elles sont également disponibles en version numérique sur le réseau du SHOM (lecteur *maremoti* du réseau *galway* dans le répertoire *data*) ; elles sont classées comme dans la suite du rapport c'est-à-dire par date.

Les marégrammes scannés sont, pour la plupart, en format tif. Les scripts MATLAB ainsi que les résultats graphiques y sont également placés. Figurent aussi les fichiers texte et calage utilisés pour la numérisation avec le logiciel NUNIEAU. Enfin, les prédictions faites par MAS – format hfs – sont également disposées à cet endroit puisqu'elles sont nécessaires dans les programmes MATLAB pour supprimer la marée afin d'établir la surcote.

A noter également que figure dans le répertoire *data* un modèle de script MATLAB (*modele.m*) commenté, employé pour tous les événements, où figure également les premiers outils pour effectuer le filtrage passe-haut.

C LISTE CHRONOLOGIQUE DES TSUNAMIS DANS L'ATLANTIQUE NORD-EST

Cette partie a pour but de lister les différents évènements tsunamiques ayant eu lieu sur les côtes de l'Atlantique Nord et de répertorier toutes les informations actuellement disponibles sur ces évènements.

C.1 TABLEAU SYNTHETIQUE DES SEISMES AYANT GENERES DES TSUNAMIS

Date	Lieu	Epicentre	Magnitude	Heure
01/11/1755	Lisbonne		8.5	9h30
18/11/1929	Terre Neuve	44,69°N 56°W	Mw=7.2	17h02 (locale) 20h32 (UT)
25/11/1941	Açores	37.4°N 19°W	8.3	18h04
22/05/1960	Chili		9.5	19h11
28/02/1969	Maroc		Ms=7.9	
7/09/1972	Oléron	45°55'N 1°13'W	5.7	22h27
26/05/1975	Açores	35.9°N 17.5°W	7.9	
26/12/2004	Sumatra	3°30'N 96°E	9.1	00h59

C.2 DESCRIPTIF DES EVENEMENTS AVEC LES DONNEES EXISTANTES

C.2.1 01/11/1755

séisme de Lisbonne

Bibliographie :

« The tsunami in Cadiz on 1 November 1755 : a critical analysis of reports by Antonio du Ulloa and by Louis Godin » - Blanc

C.2.2 18/11/1929

séisme du talus laurentien (250 km au sud de Terre Neuve)

Source internet : <http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/histor/20th-eme/1929/1929-fra.php>

Bibliographie :

« The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929 : preliminary analysis and numerical modeling » - Fine / Rabinovich / Bornhold / Thomson / Kulikov

C.2.3 25/11/1941

séisme aux Açores

Bibliographie : « envahissements du littoral et raz de marée au Maroc »

Station	Position géographique	Première vague			Vague Maximale	
		Heure d'arrivée	Temps de propagation	Signe	Heure d'arrivée	Hauteur observée
Casablanca (jetée transversale)	33°36.8'N 7°36.3'W	20h06	1h02	-		
Casablanca (petite darse)	33°36'30"N 7°37'W	20h06	1h02	+		
Mogador	31°30'34"N 9°46'31"W	20h06	1h02			
Dieppe	49°55.8'N 1°05.1'E	/	/	/	/	/
Newlyn	50°06'N 5°33'W	/	/	/	/	/
Saint-Malo	48°38'27"N 2°01'41"W	/	/	/	/	/
Lézardrieux	48°47'26"N 3°06'05"W	/	/	/	/	/
Saint-Nazaire	47°16'01"N 2°12'06"W	/	/	/	/	/

Casablanca (jetée transversale) :

Situation géographique :

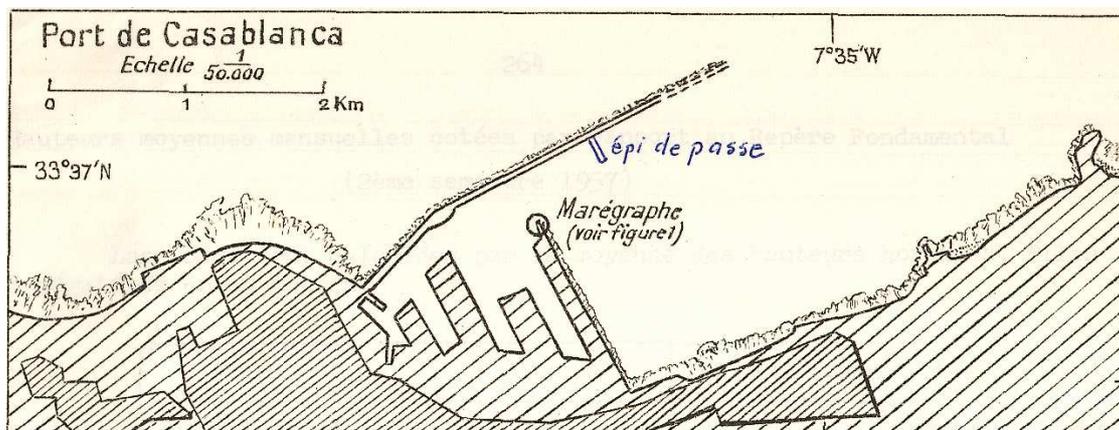


Figure C.1 – marégraphe de Casablanca (jetée transversale)

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1957

Il s'agit d'un marégraphe OTT.

Marégramme :

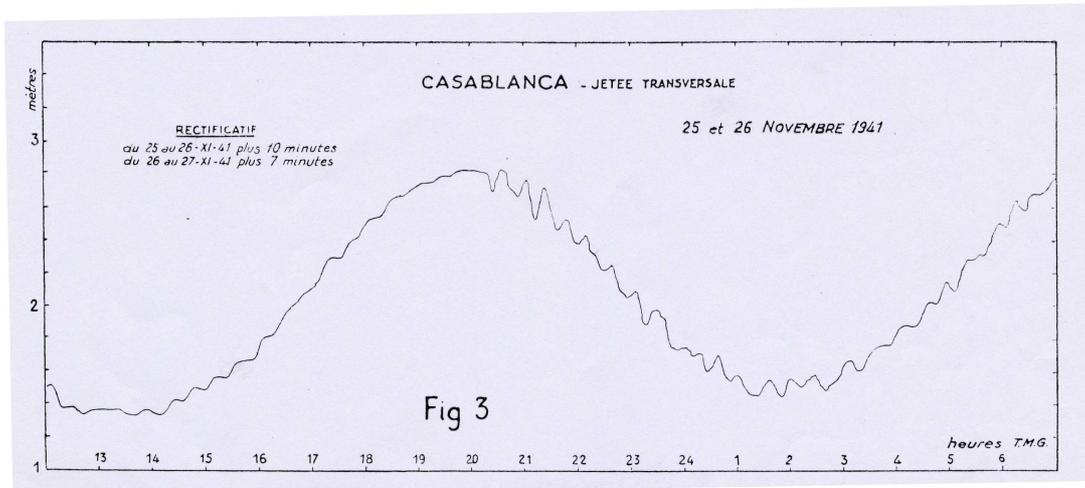


Figure C.2 – marégramme de Casablanca (jetée transversale), 1941

source : ministère des travaux publics du Maroc

Numérisation :

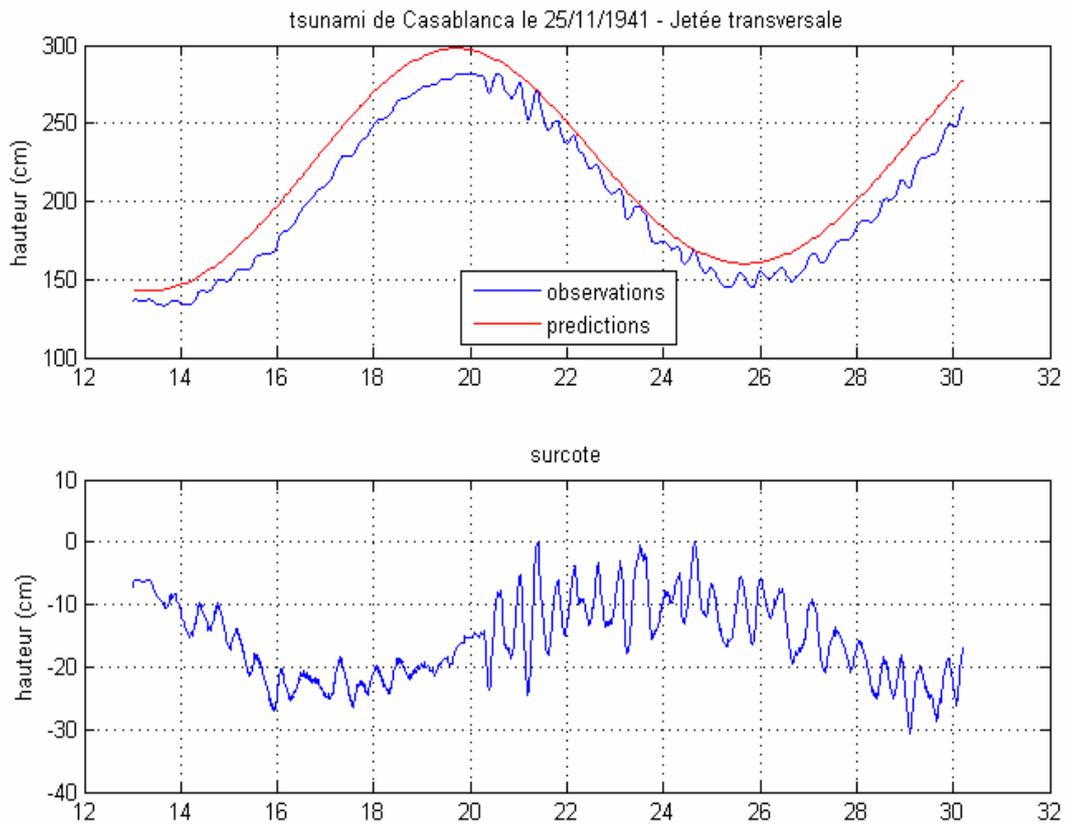


Figure C.3 – numérisation du marégramme de Casablanca (jetée transversale) 1941 (UT)

On note ici un déphasage entre la prédiction et l'observation. Un déphasage peut généralement avoir pour cause :

- des systèmes horaires différents ;
- une dérive du marégraphe en temps ;
- des phénomènes météorologiques ou physiques ;
- une prédiction de marée peu précise.

A ce stade le tracé est conservé dans l'état sachant que la vérification des systèmes horaires a été effectuée.

Casablanca (petite darse) :

Situation géographique :

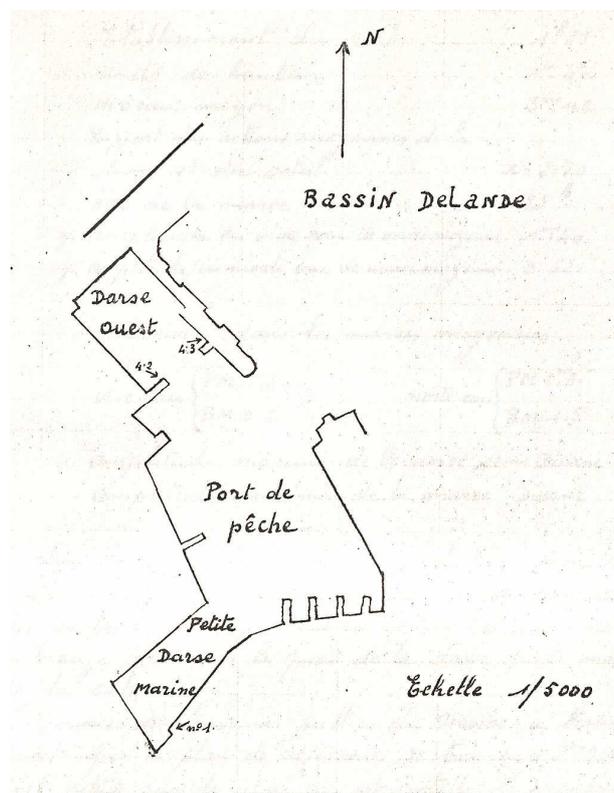


Figure C.4 – marégraphe de Casablanca (petite darse)

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1957

Marégramme :

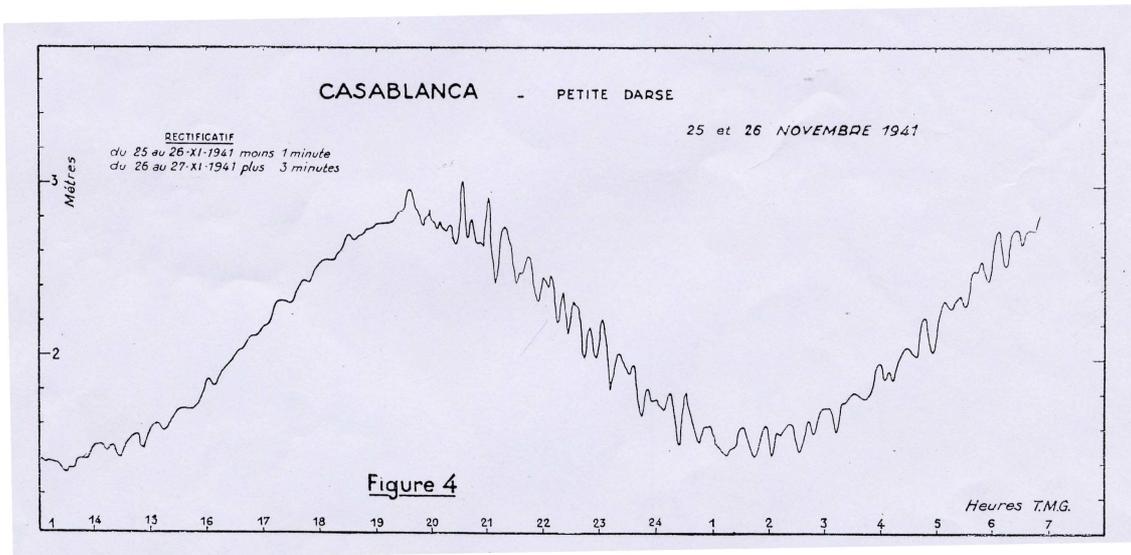


Figure C.5 – marégramme de Casablanca (petite darse), 1941

source : ministère des travaux publics du Maroc

Numérisation :

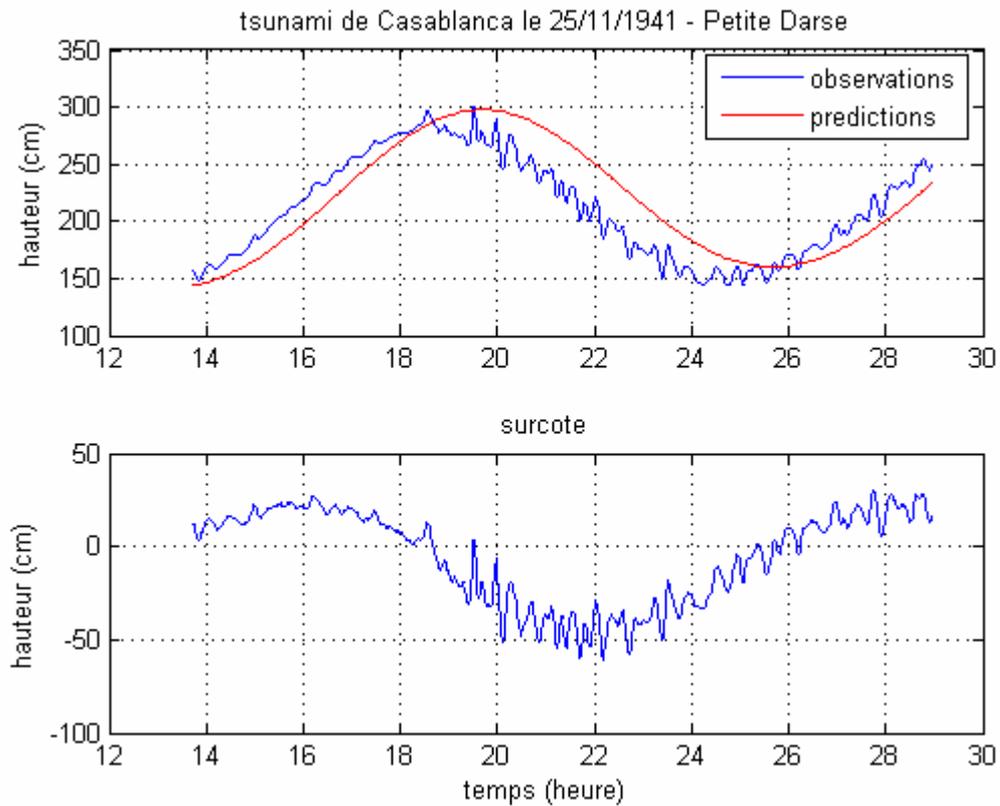


Figure C.6 – numérisation du marégramme de Casablanca (petite darse) 1941 (UT)

Une nouvelle fois on note le même type de déphasage comme précédemment.

Mogador :

Situation géographique :

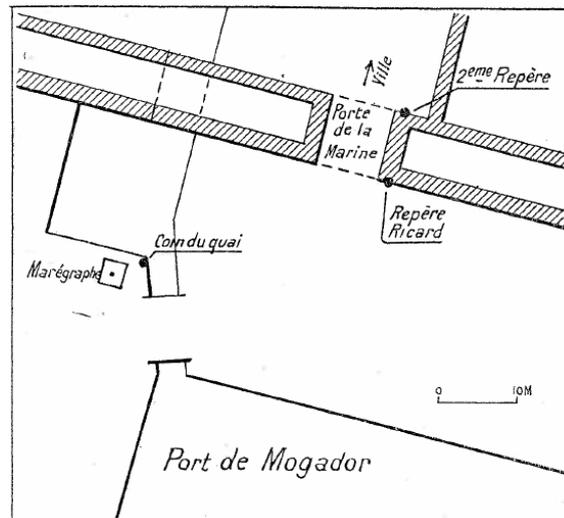


Figure C.7 – marégraphe de Mogador

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1956

Marégramme : PAS ENCORE TROUVE

Dieppe :

Situation géographique :

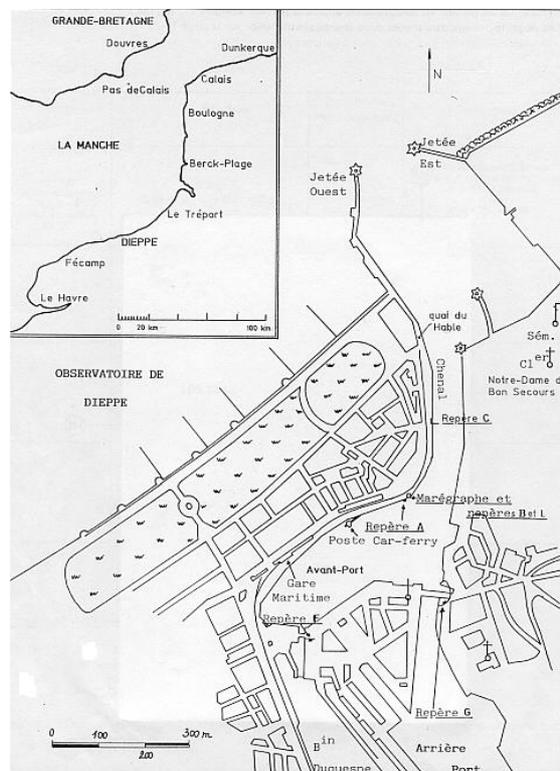


Figure C.8 – marégraphe de Dieppe

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1989

Marégramme : aucune trace de tsunami visible

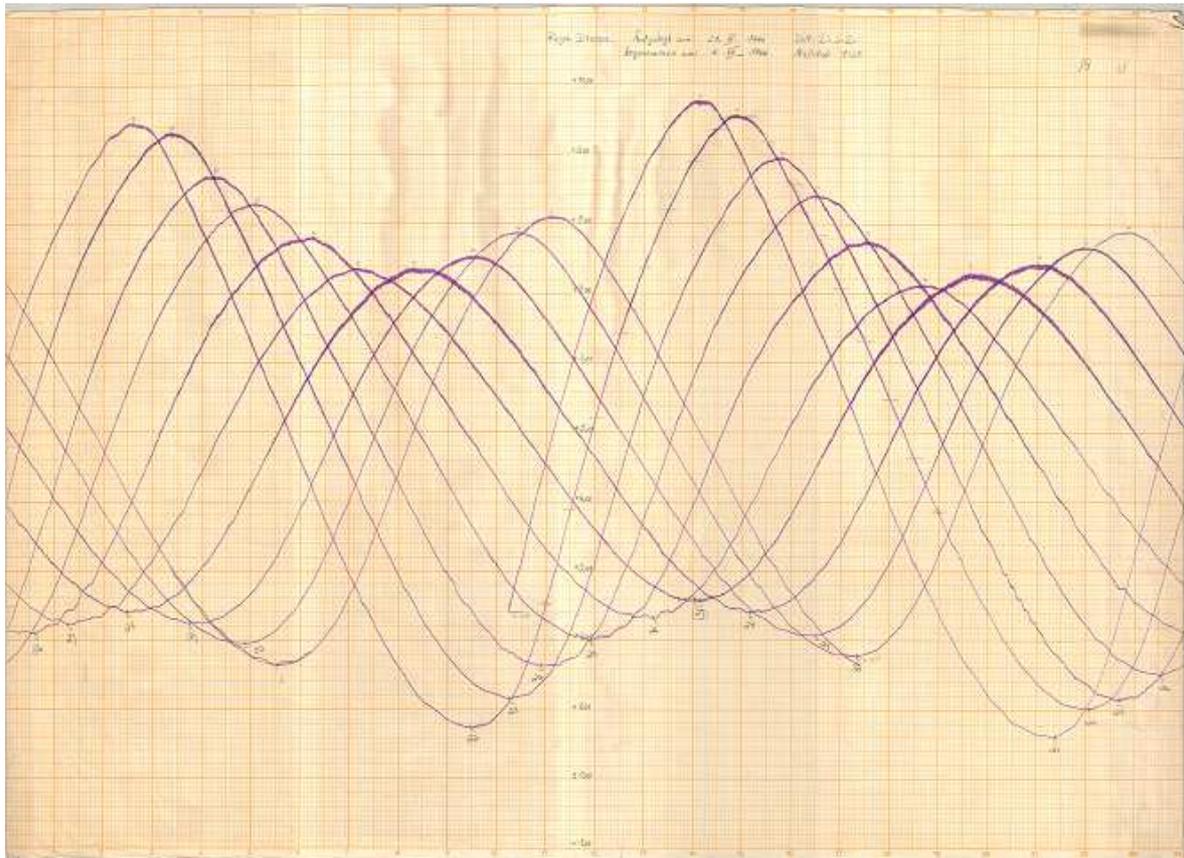


Figure C.9 – marégramme de Dieppe, 1941

source : SHOM

Newlyn (Grande Bretagne) :

Situation géographique :



Figure C.10 – localisation de Newlyn

source : GoogleMap

Marégramme : inexploitable à cause de la très mauvaise résolution malgré la présence d'une trace du tsunami.

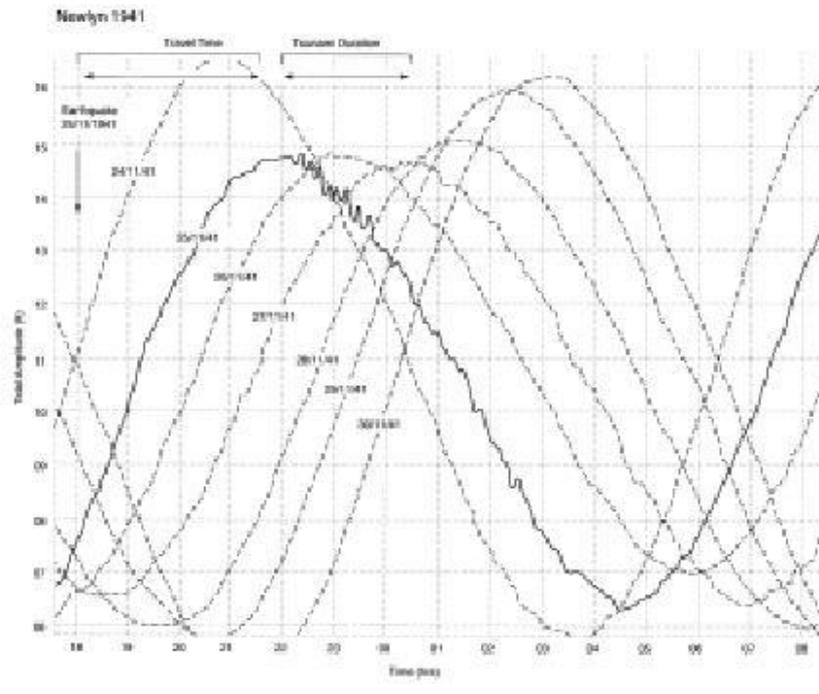


Figure C.11 – marégramme de Newlyn, 1941

Saint-Malo :

Situation géographique :





Figure C.12 – marégraphe de Saint Malo
 source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2007

Marégramme : aucune trace de tsunami visible

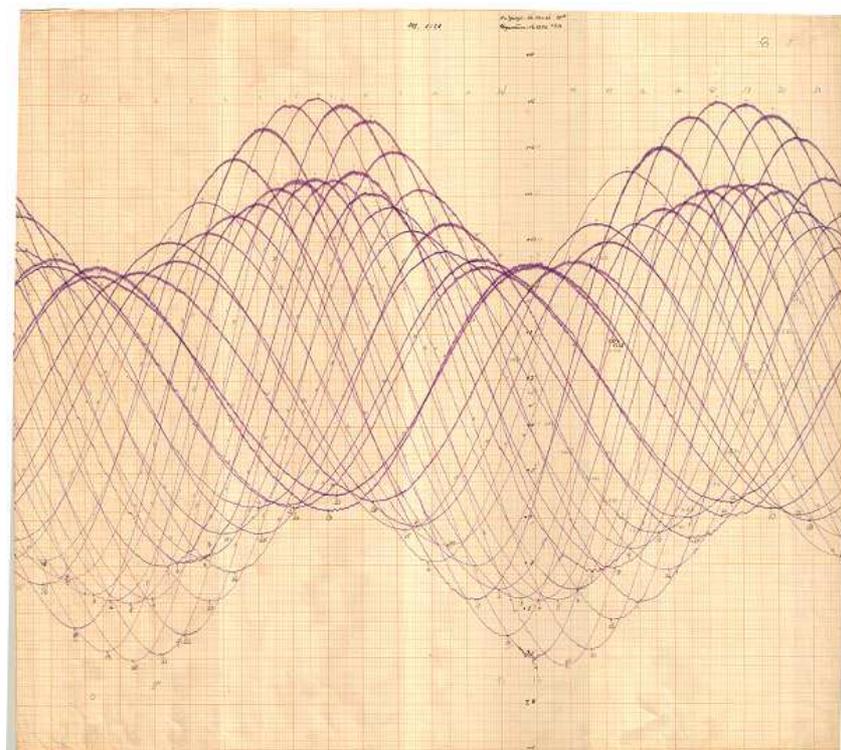


Figure C.13 – marégramme de Saint Malo, 1941
 source : SHOM

Lézardrieux :

Situation géographique :

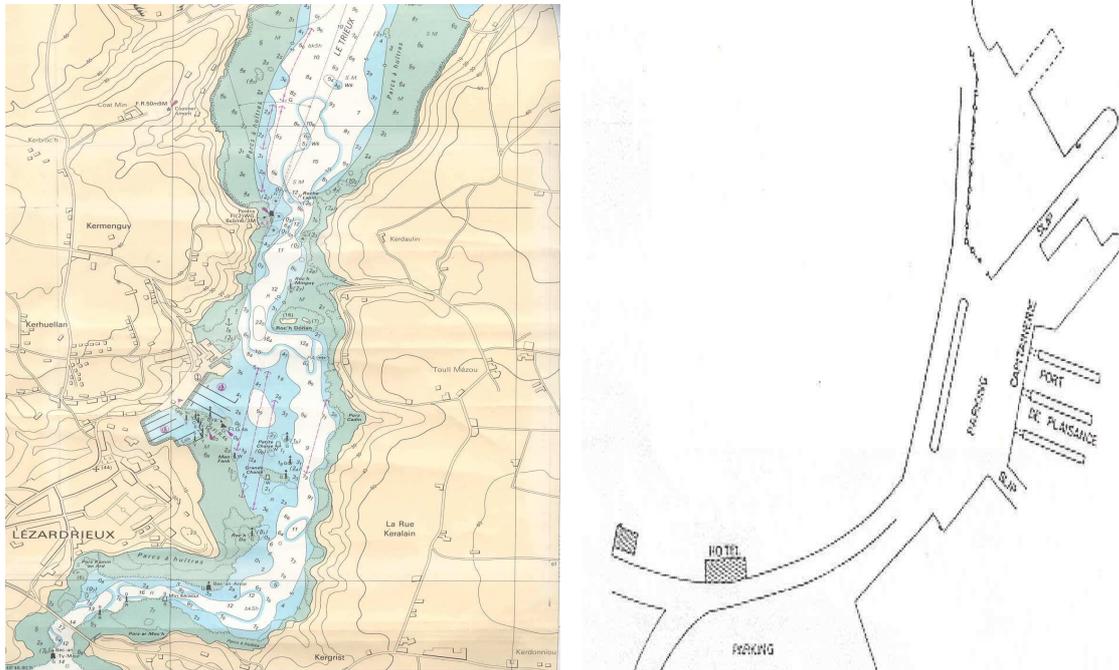


Figure C.14 – marégraphe de Lézardrieux

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2008, extrait de la carte marine n° 7127

Marégramme : aucune trace significative de tsunami

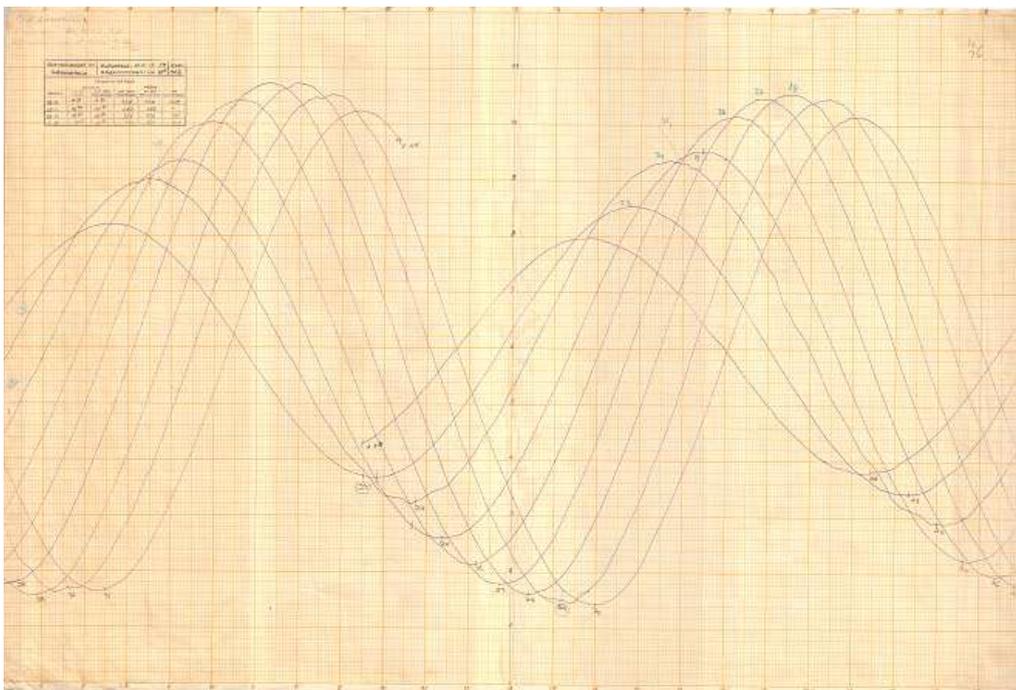


Figure C.15 – marégramme de Lézardrieux, 1941

source : SHOM

Saint-Nazaire :

Situation géographique :

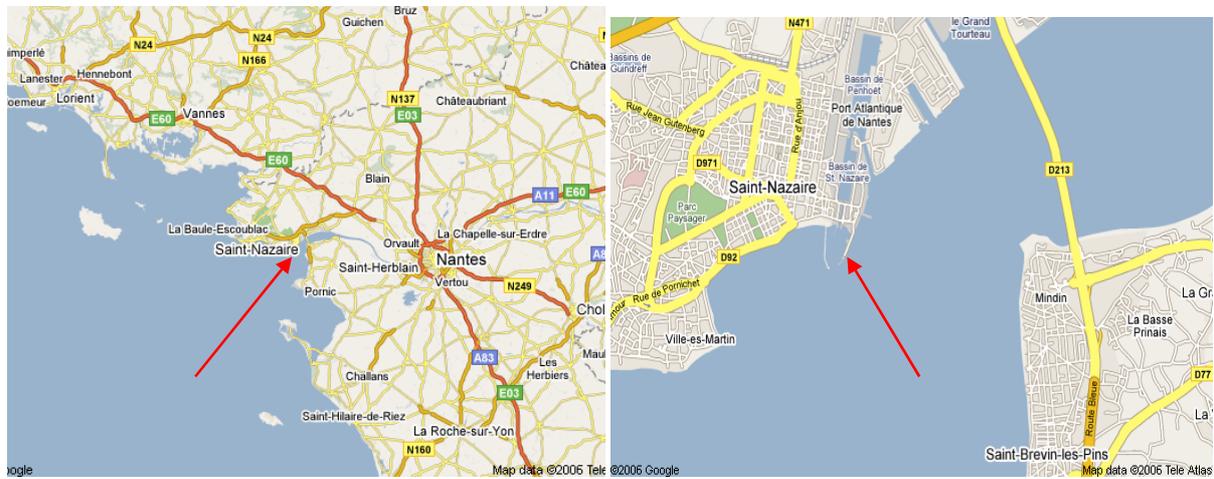


Figure C.16 – localisation du marégraphe de Saint-Nazaire

source : GoogleMap

Marégramme : aucune trace significative de tsunami

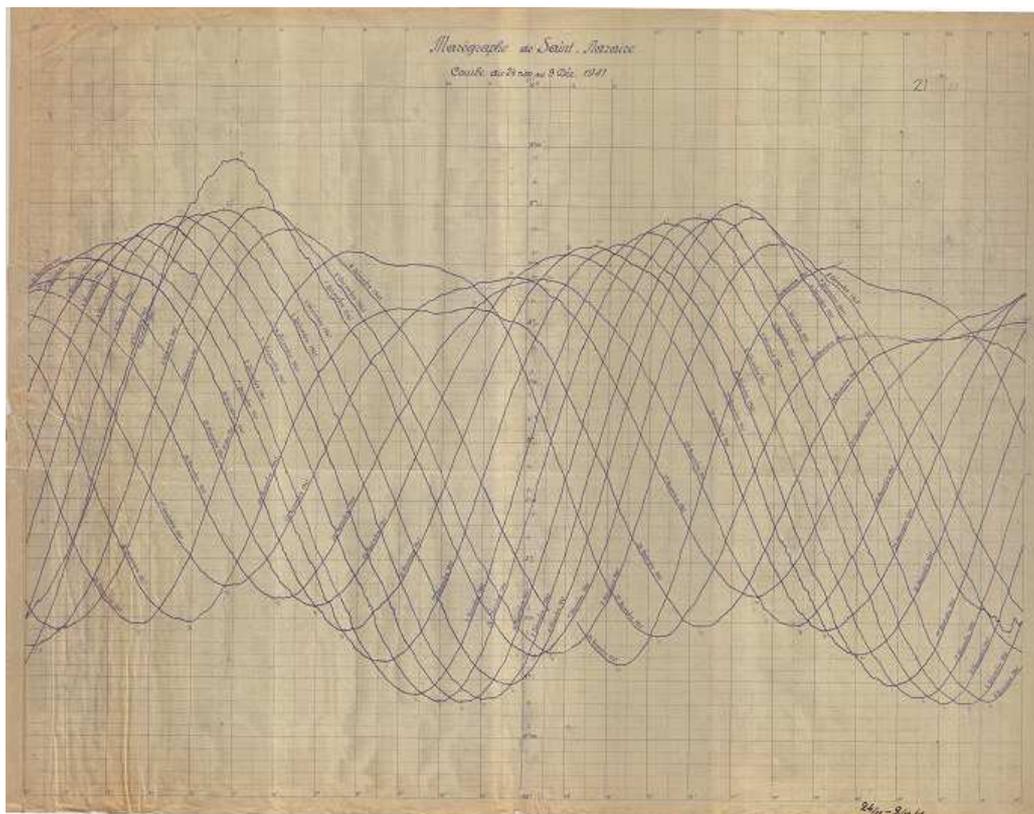


Figure C.17 – marégramme de Saint-Nazaire, 1941

source : SHOM

C.2.4 22/05/1960

séisme au Chili : glissement de la plaque Nazca sous la plaque sud-américaine

Bibliographie :

« Tide Gage Response to Tsunamis. Part II : Others Oceans ans Smaller Seas » - Van Dorn

Station	Position géographique	Première vague			Vague Maximale	
		Heure d'arrivée	Temps de propagation	Signe	Heure d'arrivée	Hauteur observée
Dakar	33°36.8'N 7°36.3'W	/	/	/	/	/

Dakar :

Situation géographique :

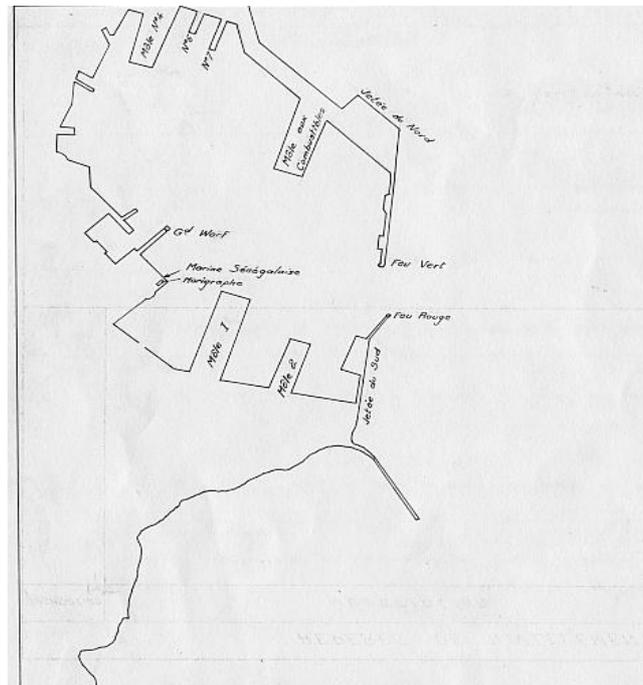


Figure C.18 – marégraphe de Dakar

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1965

Marégramme : à partir du 23/05 aucune trace significative de tsunami

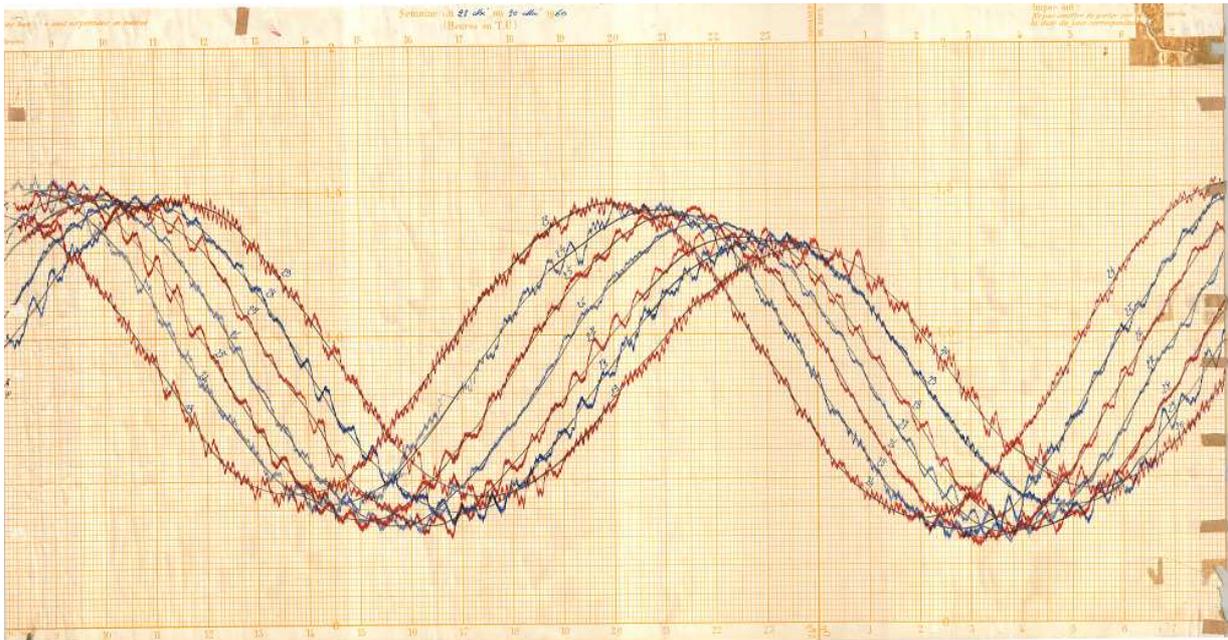


Figure C.19 – marégramme de Dakar, 1960

source : SHOM

C.2.5 28/02/1969

séisme au Maroc, south of the Goring Bank

Station	Position géographique	Première vague			Vague Maximale	
		Heure d'arrivée	Temps de propagation	Signe	Heure d'arrivée	Hauteur observée
La Rochelle - La Pallice	49°09'30.53''N 1°13'14.72''W	1h30 (UT+1)		+		

La Rochelle – La Pallice :

Situation géographique :

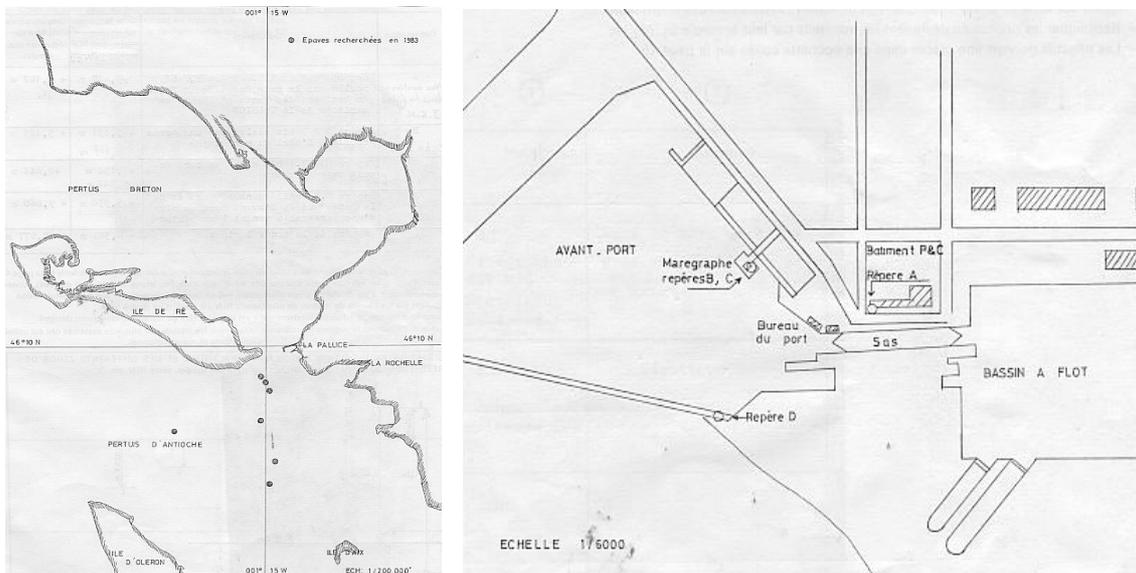


Figure C.20 – marégraphe de La Rochelle - La Pallice
source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1983

Il s'agissait à cette époque (1969) d'un marégraphe CHAMOND-GRANAT situé dans un abri en béton.

Marégramme :

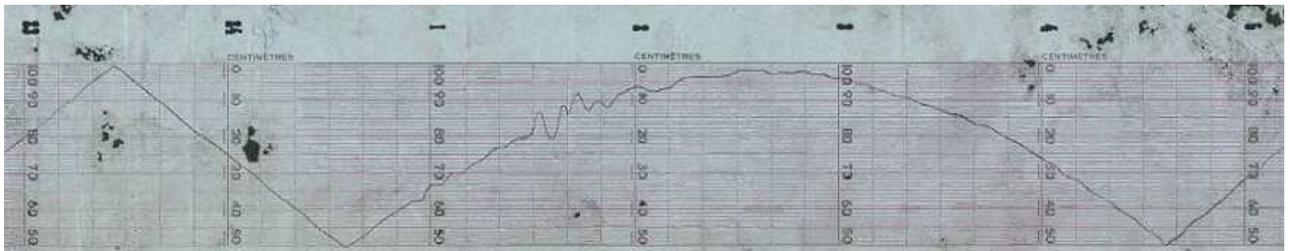


Figure C.21 – marégramme de La Rochelle, 1969 (UT+1)
source : SHOM, producteur : Ponts & Chaussées

Numérisation :

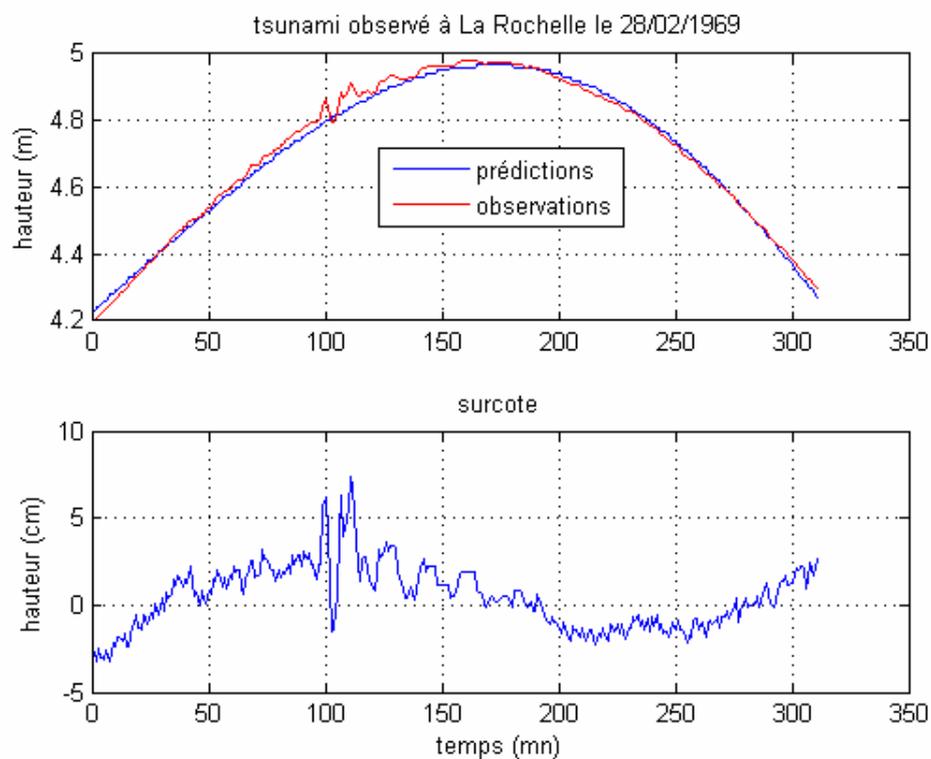


Figure C.22 – numérisation du marégramme de La Rochelle, 1969 (UT+1)

C.2.6 07/09/1972

séisme à Oléron

La Rochelle – La Pallice :

N.B. il s'agit de la même station qu'en 1969.

Marégramme : aucune trace significative de tsunami

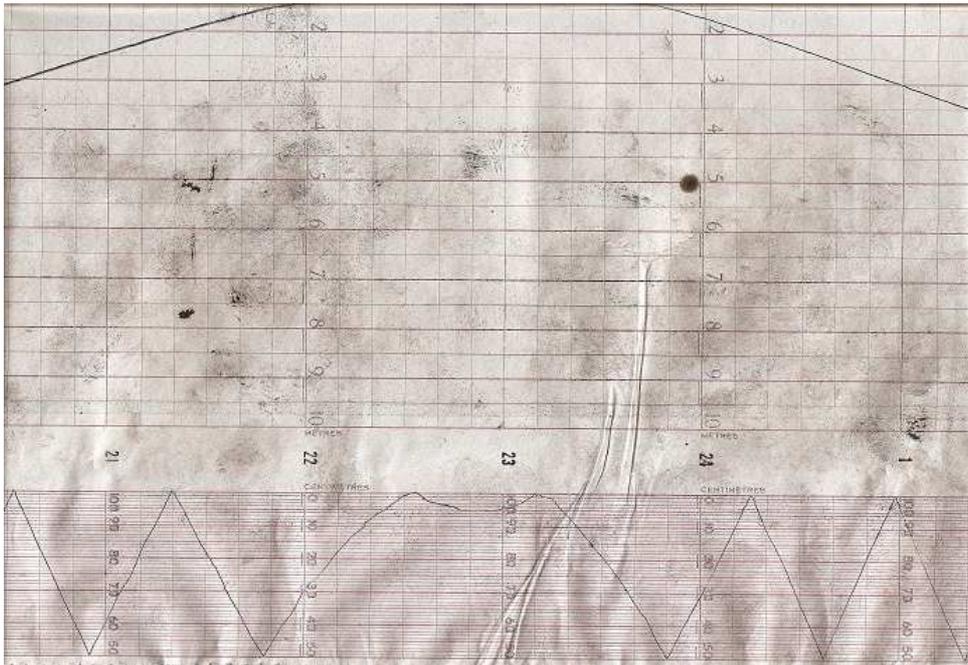


Figure C.23 – marégramme de La Rochelle, 1972
source : SHOM, producteur : Ponts & Chaussées

C.2.7 26/05/1975

séisme aux Açores, 200km south Gloria Fault

Station	Position géographique	Première vague			Vague Maximale	
		Heure d'arrivée	Temps de propagation	Signe	Heure d'arrivée	Hauteur observée
La Rochelle – La Pallice	49°09'30.53''N 1°13'14.72''W	1h30 (UT+1)		-		
Le Conquet	48°21.6'N 4°47'W	/	/	/	/	/

La Rochelle – La Pallice :

N.B. il s'agit de la même station qu'en 1969 et 1972.

Marégramme :

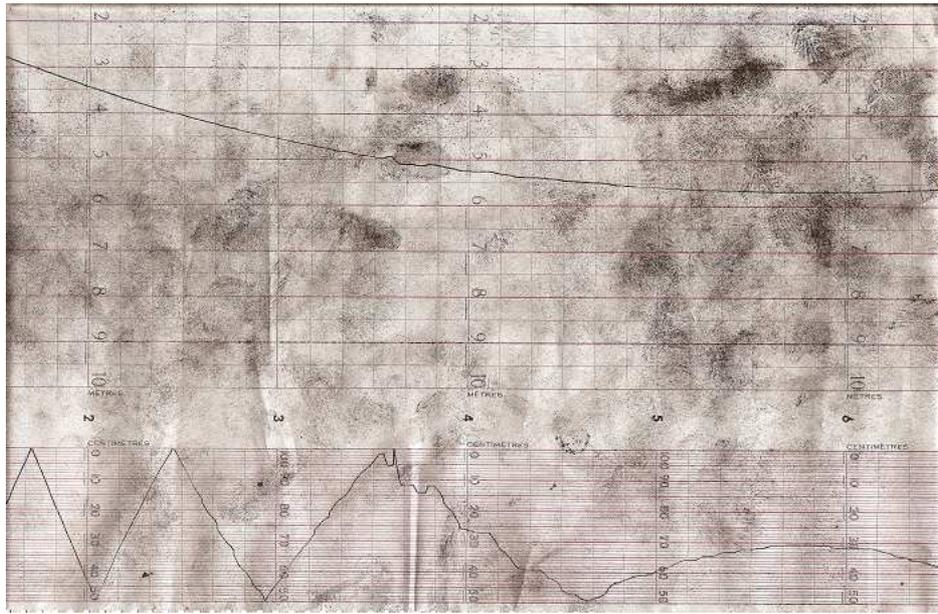


Figure C.24 – marégramme de La Rochelle, 1975
source : SHOM, producteur : Ponts & Chaussées

On peut noter la présence d'un faible signal correspondant au tsunami.

Numérisation :

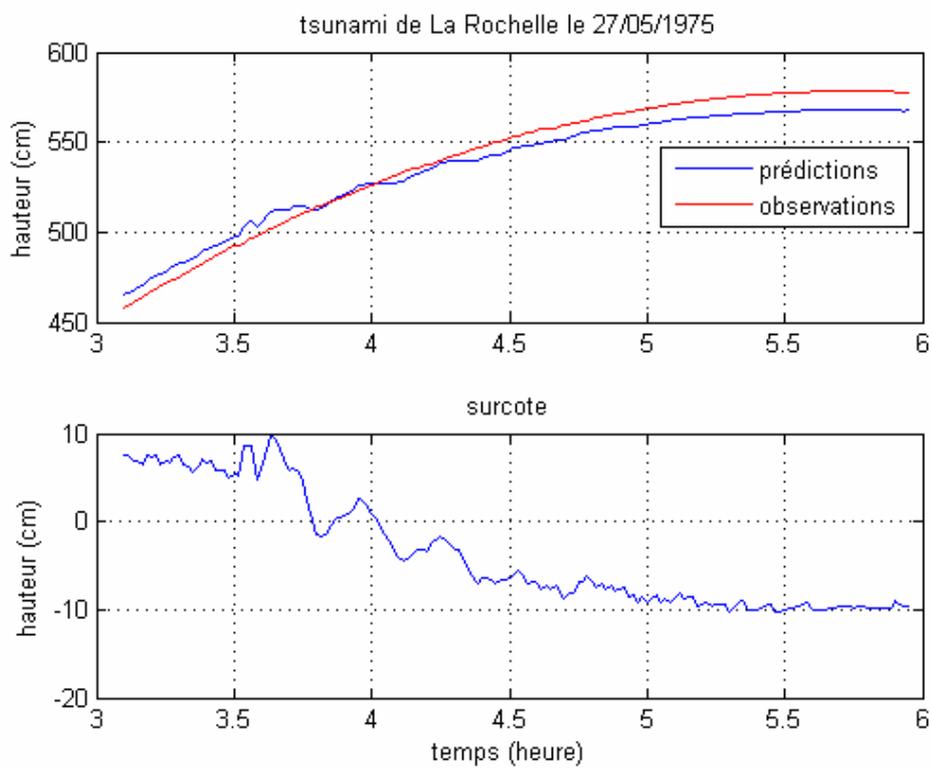


Figure C.25 – numérisation du marégramme de La Rochelle, 1975 (UT+1)

Le Conquet :

Situation géographique :

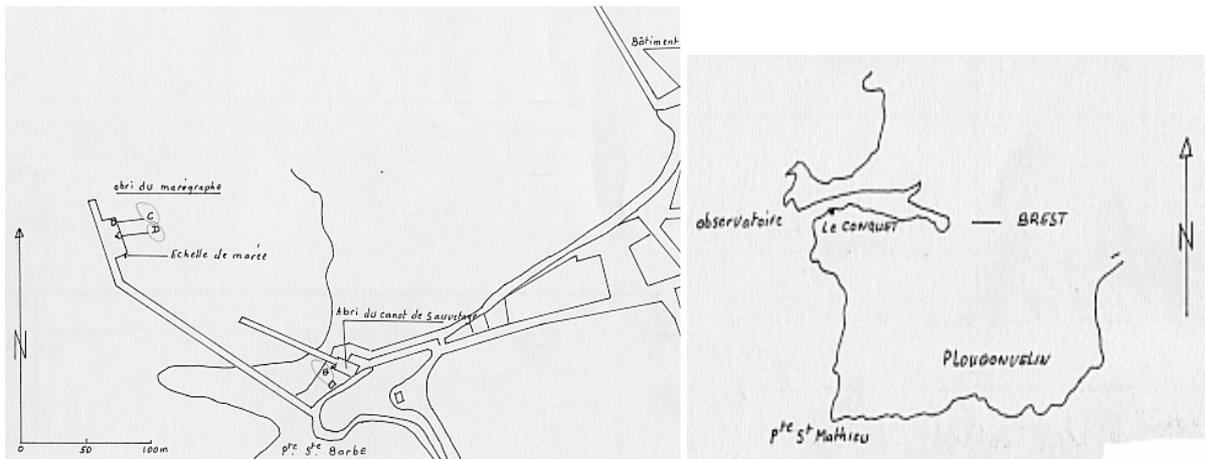


Figure C.26 – marégraphe du Conquet

Source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1981

Le marégraphe utilisé à l'époque était un OTT de type R16

Marégramme : aucune trace significative de tsunami, ceci n'est pas surprenant car la trace visible à La Rochelle est très faible et que la station se situe bien plus près de l'épicentre que Le Conquet.

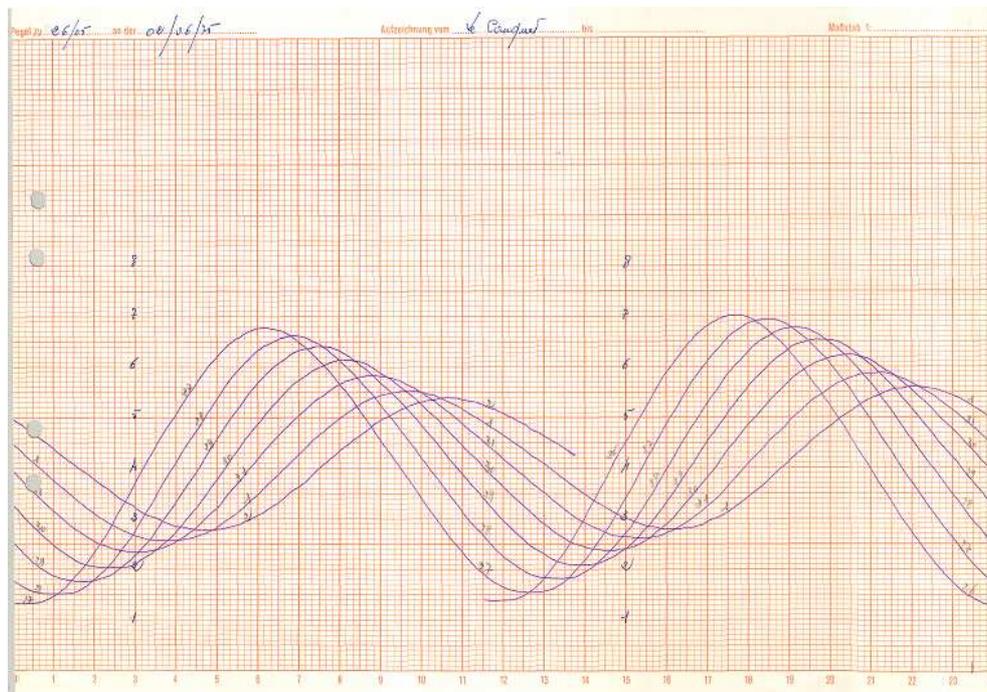


Figure C.27 – marégramme du Conquet, 1975

source : SHOM

C.2.8 26/12/2004

séisme à Sumatra

Comme le montre la figure ci-dessous, le tsunami du 26 décembre 2004 dans l'Océan Indien a aussi été observé dans l'Océan Atlantique. Ainsi un tsunami de l'ordre de la dizaine de centimètres a été observé sur les côtes de France.

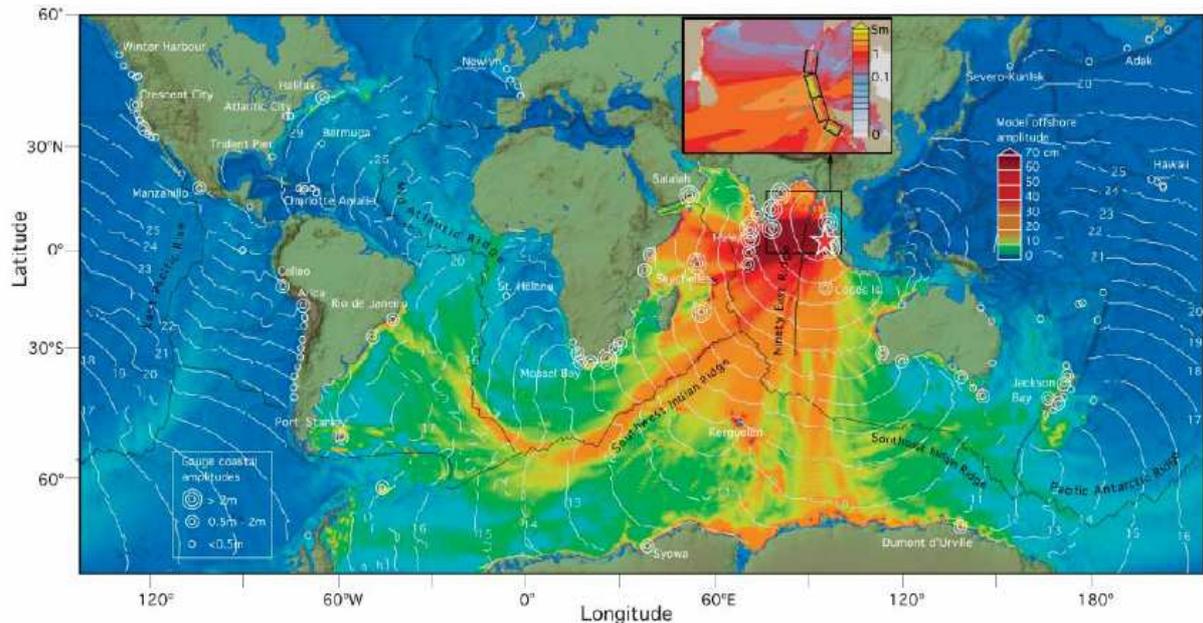


Fig. 1. Global chart showing energy propagation of the 2004 Sumatra tsunami calculated from MOST. Filled colors show maximum computed tsunami heights during 44 hours of wave propagation simulation. Contours show computed arrival time of tsunami waves. Circles denote the locations and amplitudes of tsunami waves in three range categories for selected tide-gauge stations. Inset shows fault geometry of the model source and close-up of the computed wave heights in the Bay of Bengal. Distribution of the slip among four subfaults (from south to north: 21 m, 13 m, 17 m, 2 m) provides best fit for satellite altimetry data and correlates well with seismic and geodetic data inversions.

Figure C.28 – représentation de la propagation du tsunami du 26/12/2004

source : Titov et al., *The global Reach of the 26 December 2004 Sumatra Tsunami*, Science, 23 sept. 2005

Bibliographie :

- « The Sumatra tsunami of 26 December 2004 as observed in the North Pacific and North Atlantic oceans » - Rabinovich / Thomson / Stephenson
- « The Global Reach of the 26 December 2004 Sumatra Tsunami » - Titov / Rabinovich / Mofjeld / Thomson / Gonzales
- « The 26 December 2004 Sumatra tsunami recorded on the coast of West Africa » - Joseph / Odametey / Nkebi / Pereira / Prabhudesai / Mehra / Rabinovich / Kumar
- « The dual source region for the 2004 sumatra tsunami » - Fine / Rabinovich / Thomson
- « Residual tide gauge records for Gibraltar and Newlyn » - Rabinovich

Station	Position géographique	Première vague			Vague Maximale	
		Heure d'arrivée	Temps de propagation	Signe	Heure d'arrivée	Hauteur observée
Port-Tudy	47°38.7'N 3°26.8'W	4h30 (UT+1)	50h30	-		
Brest	48°23.03'N 4°29.60'W		≈ 50h			
Concarneau	47°52'25''N 3°54'26''W		≈ 50h			
Sables d'Olonne	46°29.85'N 1°47.609'W		≈ 50h			

Port – Tudy (île de Groix):

Situation géographique :

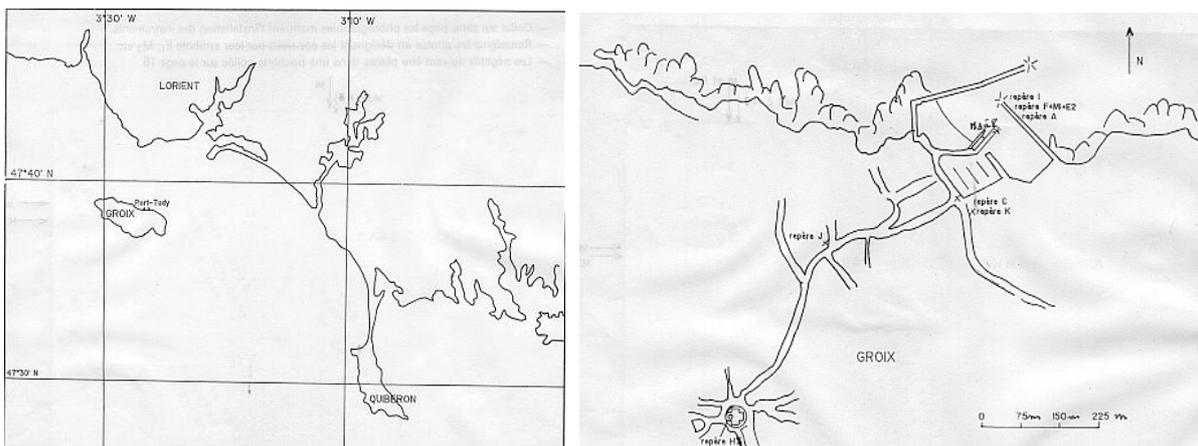


Figure C.29 – marégraphe de Port-Tudy

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2007

Port-Tudy dispose d'un marégraphe OTT type R20.

L'enregistrement de Port-Tudy présente la donnée à la plus haute résolution temporelle disponible sur les côtes de France. En effet, à cette époque, l'ensemble du réseau permanent numérique RONIM est échantillonné à la cadence de 10 minutes.

Marégramme : une trace du tsunami est visible le 28 à partir de 4h environ.

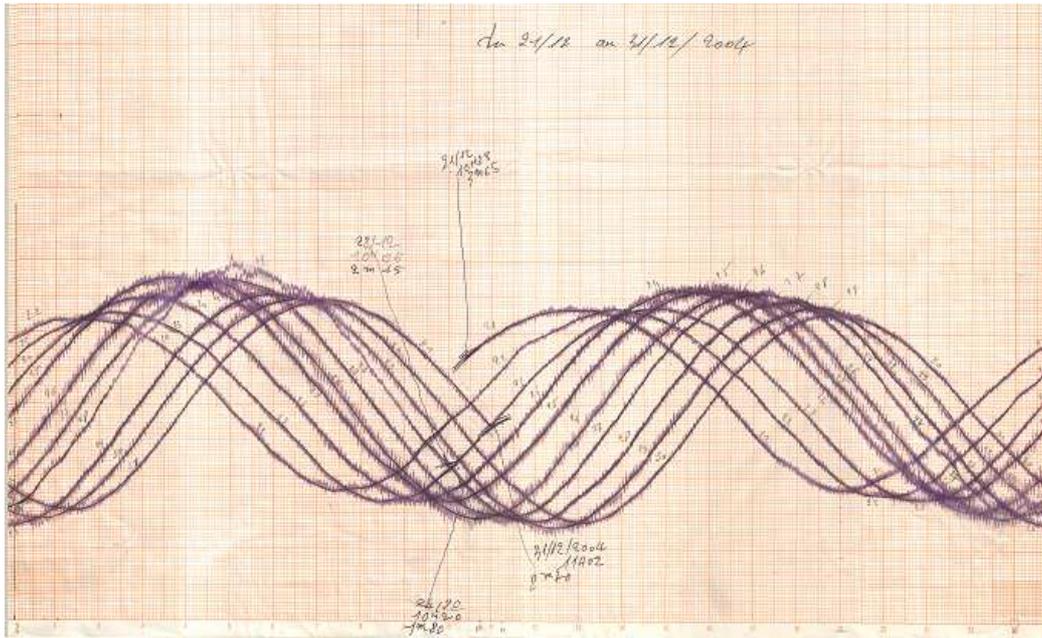


Figure C.30 – marégramme de Port-Tudy, 2004

source : SHOM

Numérisation :

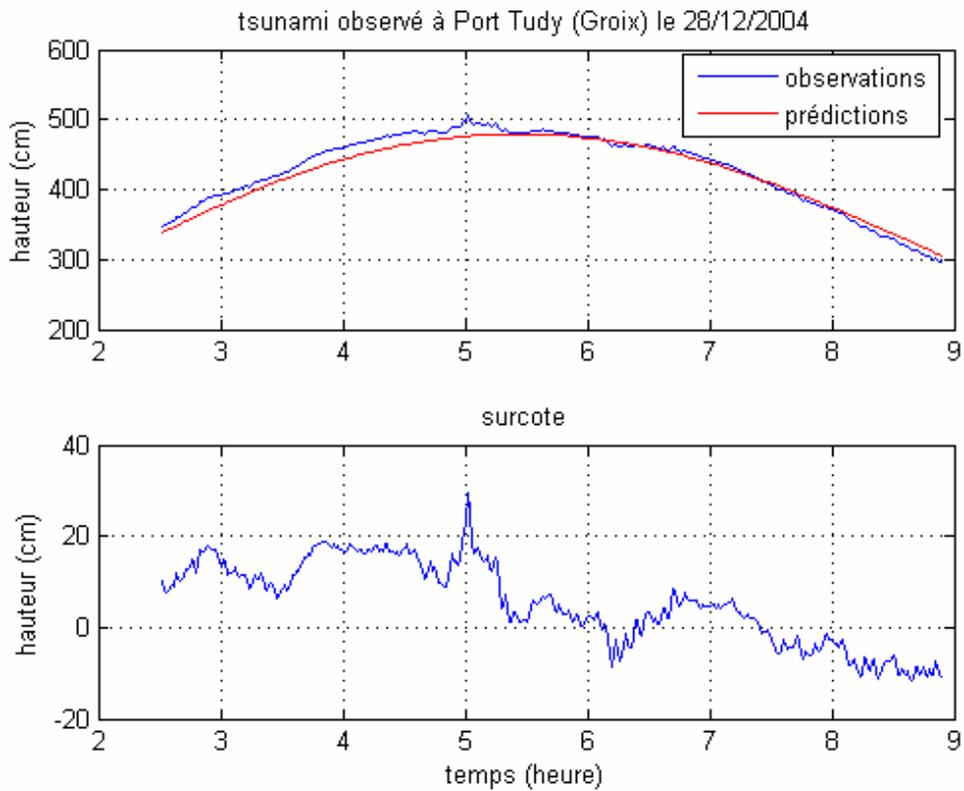
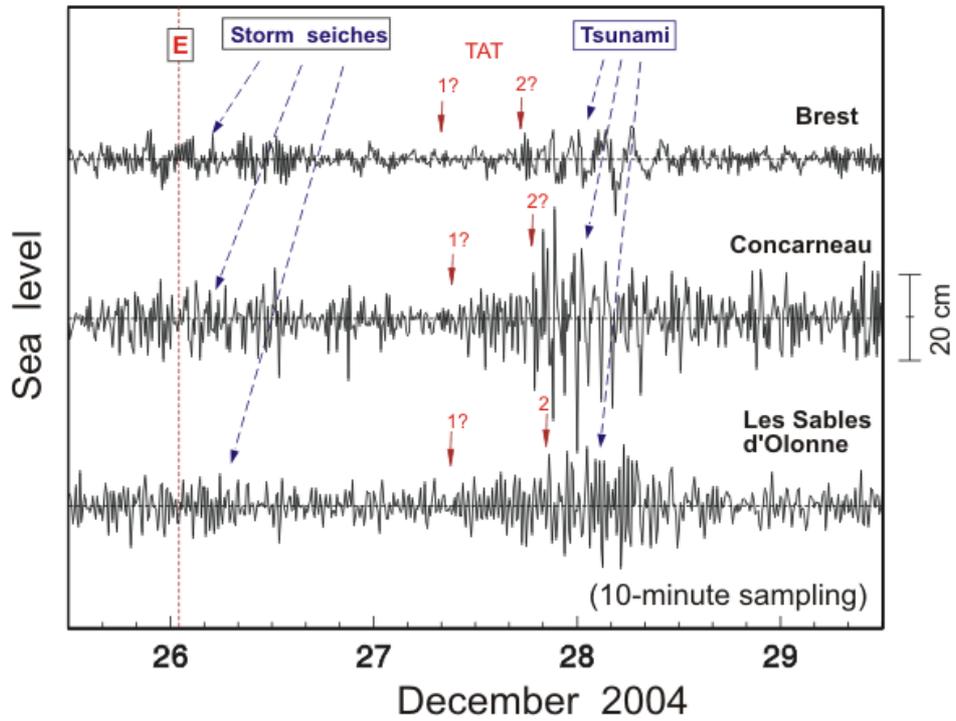


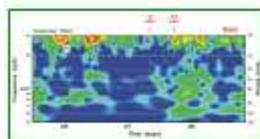
Figure C.31 – numérisation du marégramme de Port-Tudy, 2004 (UT+1)

Brest/Concarneau/Les Sables d'Olonne :

Analyse de A. Rabinovich :

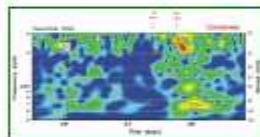


French records: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)
 Courtesy of Hélène HÉBERT, Laboratoire de Détection et de Géophysique, Risques Sismiques et Géologiques, CEA/DASE
 /LDG/RSG - BP 12 - 91680 Bruyères-le-ch  tel - FRANCE



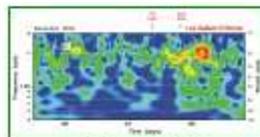
Brest

1 st	8	25-50	08:00?	~31hrs 00min
2 nd	20	25	17:20	40hrs 21min



Concarneau

1 st	19	35	09:20	32hrs 21min
2 nd	49.5	35-60	18:40	41hrs 41min



Les Sables d'Olonne

1 st	15	35	09:00	32hrs 01min
2 nd	28.5	40	20:10	43hrs 21min

Figure C.32 – Données à cadence 10 minutes des marégraphes numériques de Brest, Concarneau et des Sables d'Olonne d'après A. Rabinovich

source : http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/sci/osap/projects/tsunami/tsunamiasia_e.htm

Situations géographiques :

Brest :

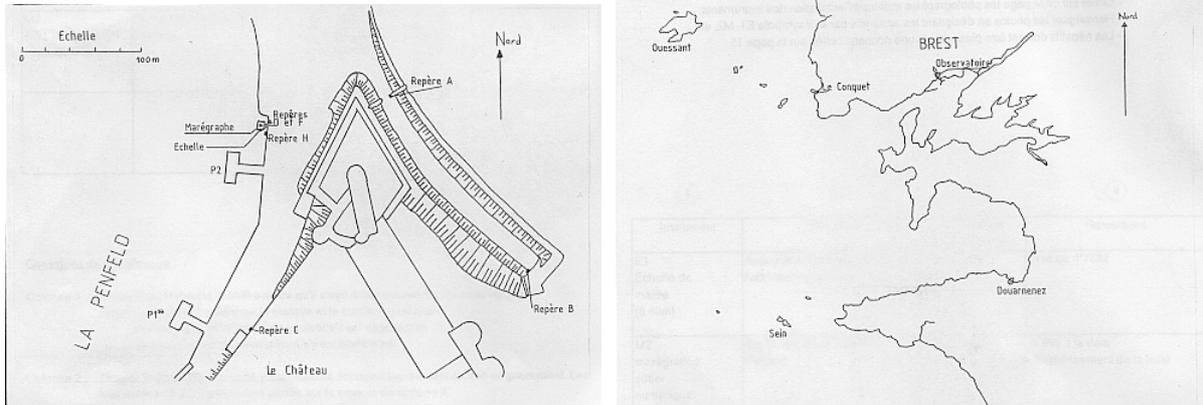


Figure C.33 – marégraphe de Brest
source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1994

Concarneau :

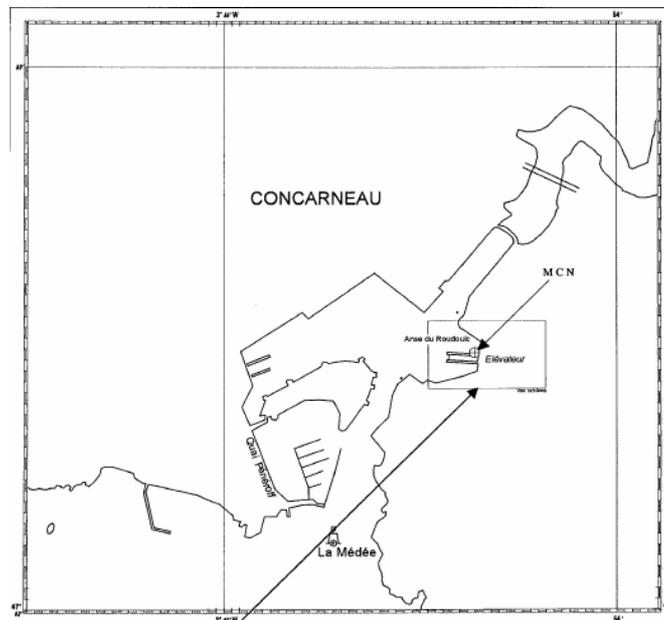


Figure C.34 – marégraphe de Concarneau
source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2008

Sables d'Olonne :

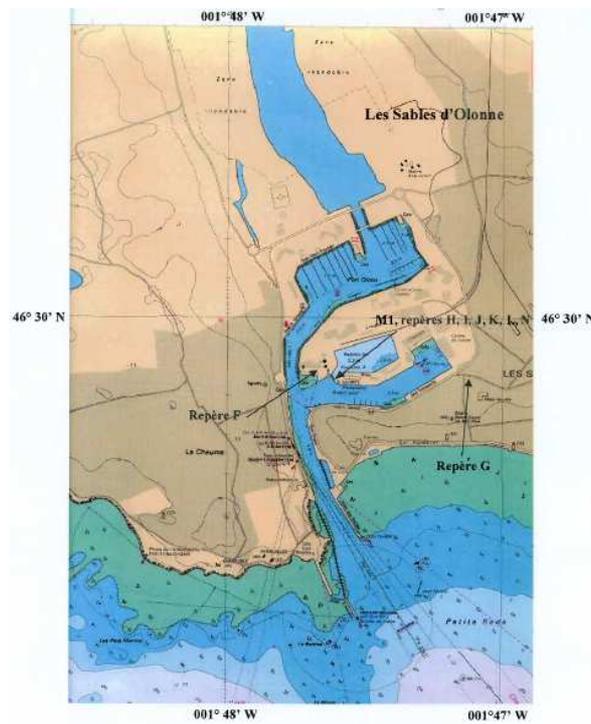


Figure C.35 – marégraphe des Sables d'Olonne
source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2008

D LISTE CHRONOLOGIQUE DES TSUNAMIS DANS LA MEDITERRANEE

Cette partie a pour but de lister les différents évènements tsunamiques ayant eu lieu sur les côtes de la Méditerranée et de répertorier toutes les informations actuellement disponibles sur ces évènements.

D.1 TABLEAU SYNTHETIQUE DES SEISMES AYANT GENERES DES TSUNAMIS

Date	Lieu	Epicentre	Magnitude	Heure
21/08/1856	Djijelli (Algérie)		7.2	
23/02/1887	Riviera italienne (Ligurie)	43°42'N 8°03'E	6.5	5h43
28/12/1908	Messine (Sicile)		7.2	
9/09/1954	Orléansville (Algérie)		6.7	
16/10/1979	Nice	glissement de terrain (aéroport)		13h57 (UT+1)
10/10/1980	El Asnam (Algérie)		7.3	12h25
27/10/1985	Constantine (Algérie)		5.9	19h35
21/05/2003	Boumerdès (Algérie)	36°43'N 3°47'E	6.7	18h44

D.2 DESCRIPTIF DES EVENEMENTS AVEC LES DONNEES EXISTANTES

D.2.1 21/08/1856

séisme de Djijelli

Bibliographie :

« The 1856 Djijelli (Algeria) earthquake and tsunami : source parameters and implications for tsunami hazard in the Balearic Islands » - Roger / Hébert

D.2.2 23/02/1887

séisme de Ligurie

Bibliographie :

« Numerical simulation of tsunami propagation near the French coast of the Mediterranean »
- Pelinovsky / Kharif / Rabiov / Francius

D.2.3 28/12/1908

séisme de Messine

Aucun marégramme trouvé à ce stade mais des marégraphes ayant potentiellement pu enregistrer la trace de ce tsunami étaient en place à l'époque.

D.2.4 09/09/1954

séisme de Orléansville

Pour les mêmes raisons que précédemment il est important de chercher des données marégraphiques à cette date dans les archives.

D.2.5 16/10/1979

glissement de terrain à l'aéroport de Nice

Les données proviennent pour la plupart des recherches et demandes de marégrammes aux opérateurs effectuées par Monsieur Démerliac (SHOM) en 1979 suite à l'événement.

Station	Position géographique	Première vague			Vague Maximale	
		Heure d'arrivée	Temps de propagation	Signe	Heure d'arrivée	Hauteur observée
Mandelieu – La Napoule	43°31.58'N 6°56.84'E	13h59 (UT+1)	2 min	+		
Nice	43°41.7'N 7°17.1'E	13h58 (UT+1)	1 min	-		
Toulon	43°07.4'N 5°54.9'E	/	/	/	/	/
Port de Bouc	43°23'54''N 4°59'01''E	14h16 (UT+1)	19 min	+		
Gènes		/	/	/	/	/
Monaco	43°43.96'N 7°25.41'E	/	/	/	/	/
Sète	43°24'N 3°42.14E	/	/	/	/	/
Villefranche -sur-mer	43°41'51.2''N 7°18'27.8''E	14h07 (UT+1)	10 min	-		
Malaga		/	/	/	/	/

Mandelieu – La Napoule :

Situation géographique :

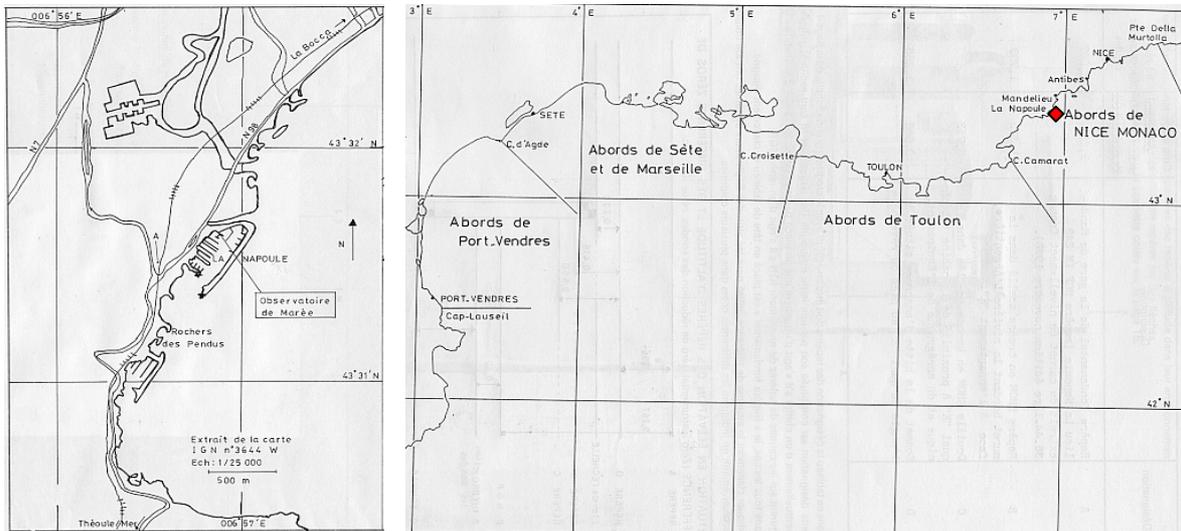


Figure D.1 – marégraphe de Mandelieu La Napoule

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1987

Un marégraphe OTT R16 était en service à cette époque.

Marégramme :

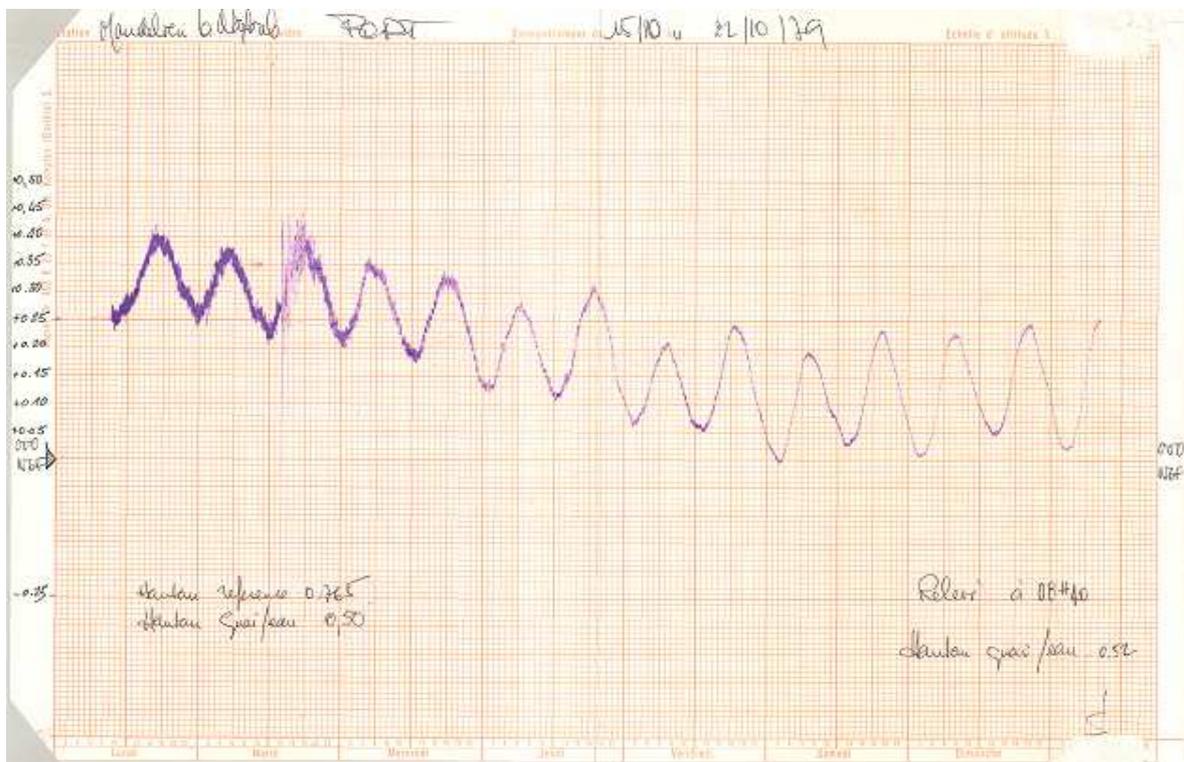


Figure D.2 – marégramme de Mandelieu-La Napoule, 1979

source : SHOM, producteur : DDE

Numérisation :

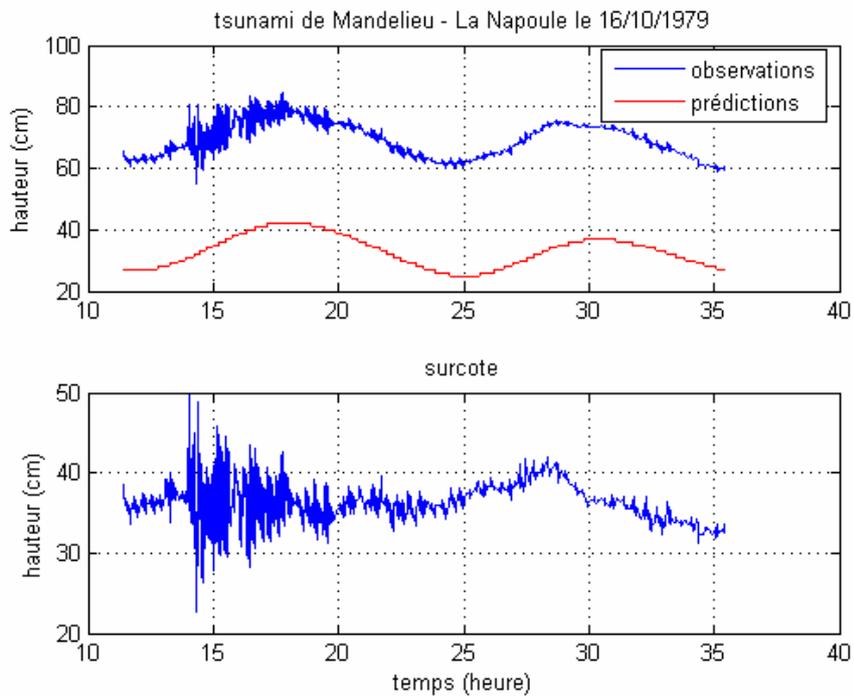


Figure D.3 – numérisation du marégramme de Mandelieu, 1979 (UT+1)

Nice :

Situation géographique :

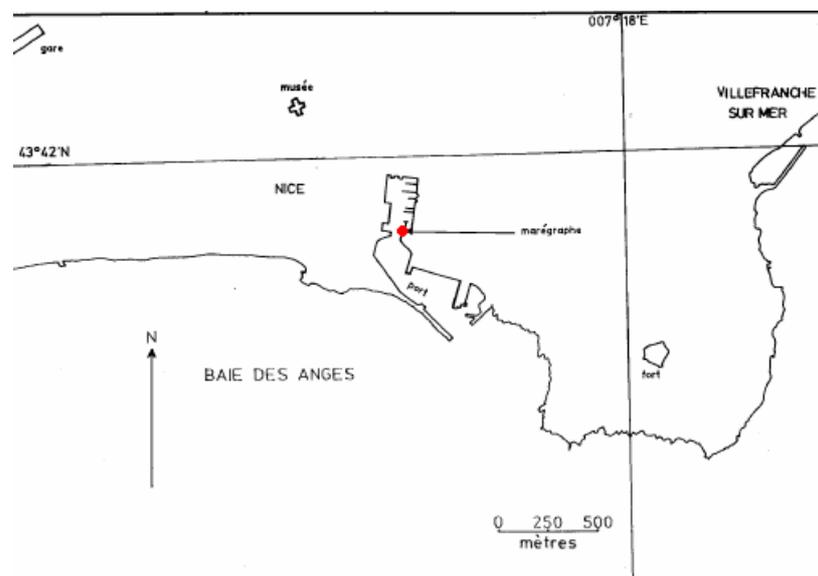


Figure D.4 – marégraphe de Nice

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1999

Un marégraphe de marque BRILLIE type 2C était en place en 1979 à Nice.

Marégramme :

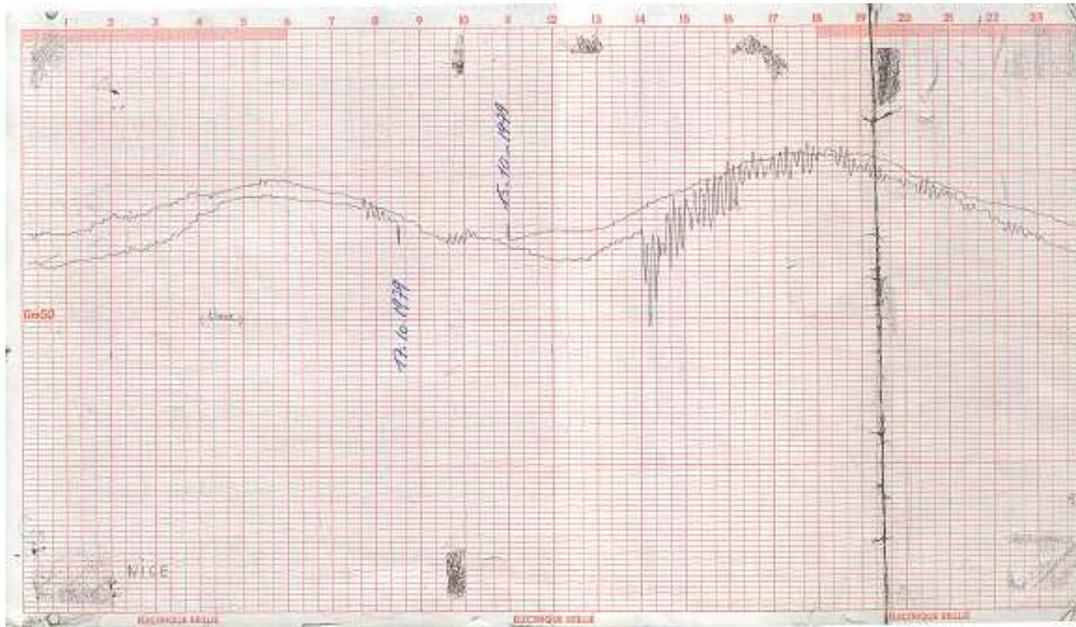


Figure D.5 – marégramme de Nice, 1979
source : SHOM, producteur : DDE

Numérisation :

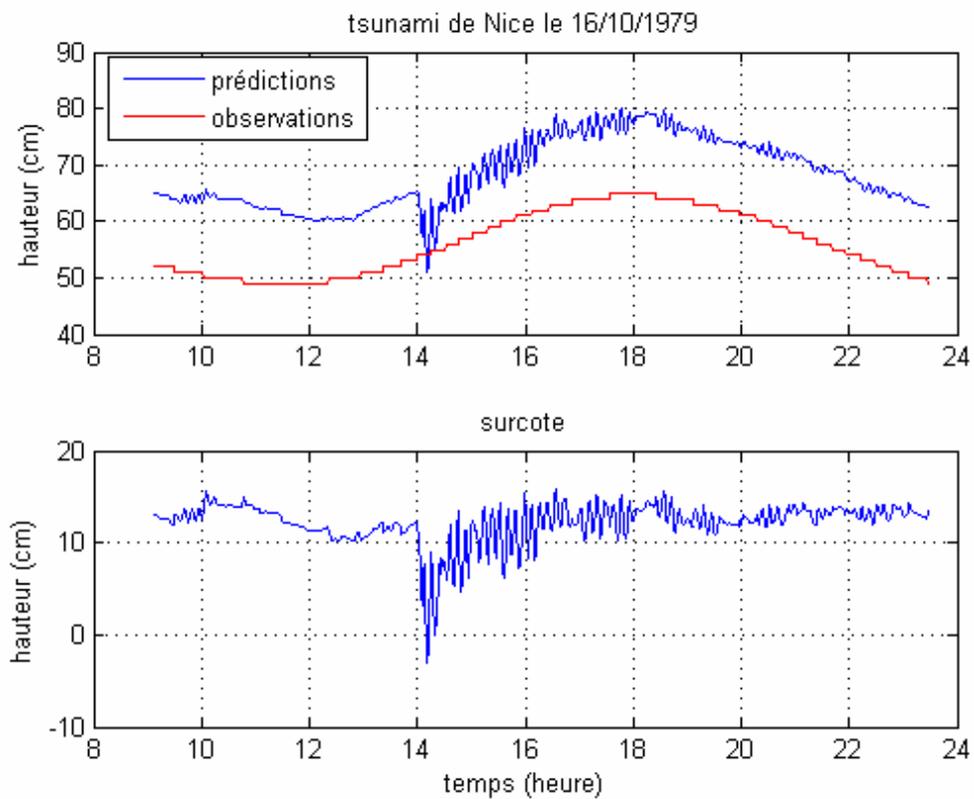


Figure D.6 – numérisation du marégramme de Nice, 1979 (UT+1)

Toulon :

Situation géographique :

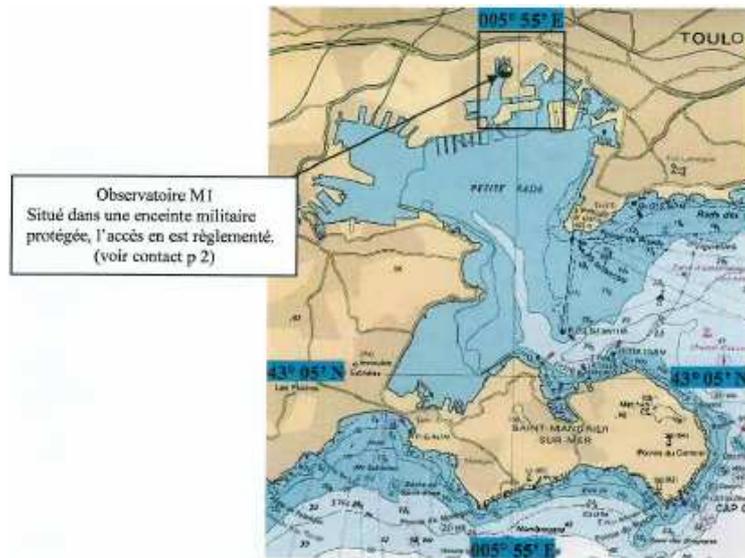


Figure D.7 – marégraphe de Toulon

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2007

Il s'agissait d'un marégraphe OTT.

Marégramme : inexploitable

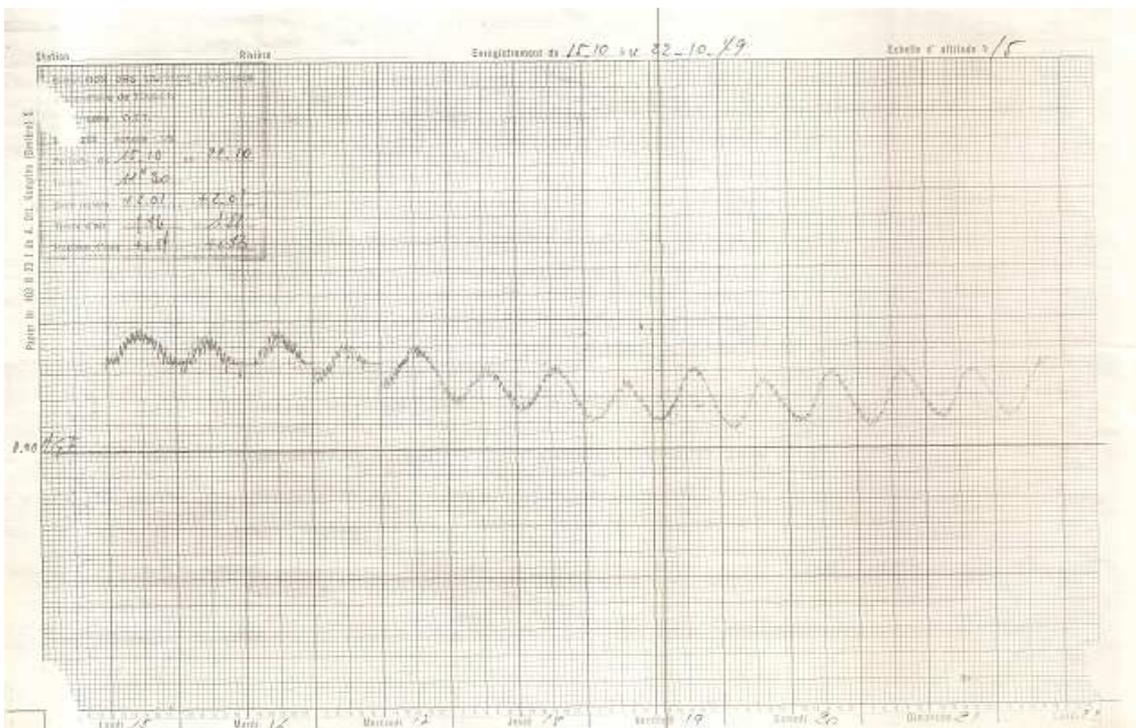


Figure D.8 – marégramme de Toulon, 1979

source : SHOM, producteur : Travaux Maritimes

Port de Bouc :

Situation géographique :

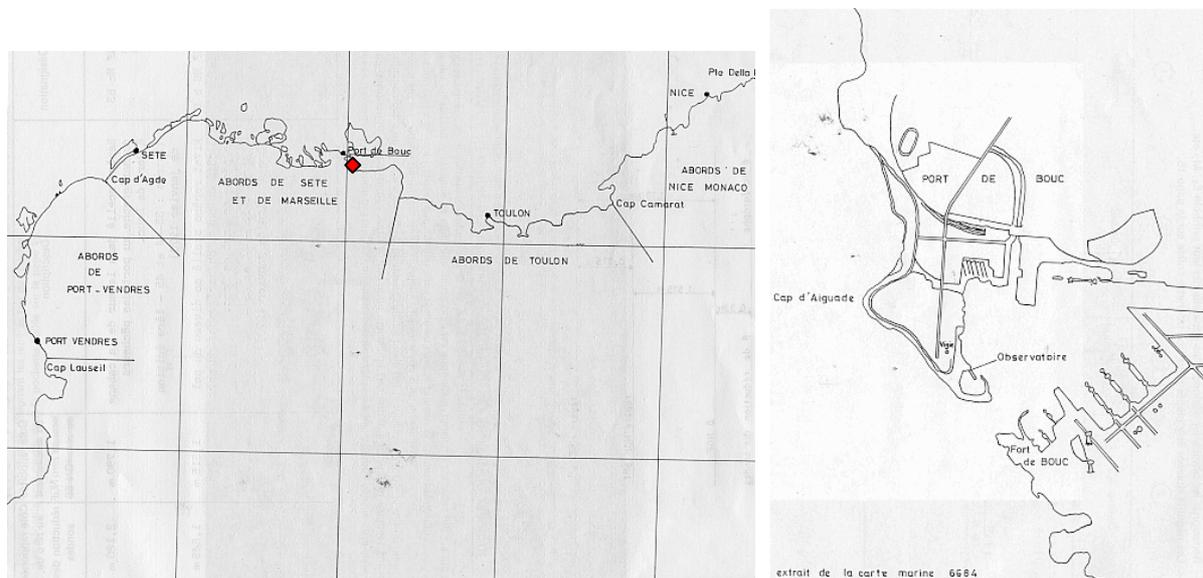


Figure D.9 – marégraphe de Port de Bouc

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1988

Port de bouc était équipé d'un marégraphe OTT A.

Marégramme :

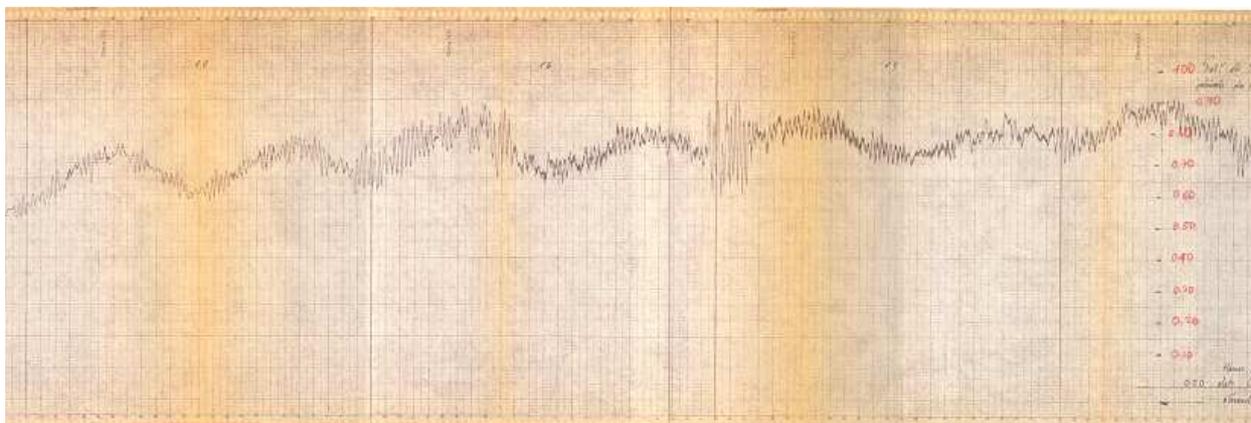


Figure D.10 – marégramme de Port de Bouc, 1979

source : SHOM, producteur : port autonome de Marseille

Numérisation :

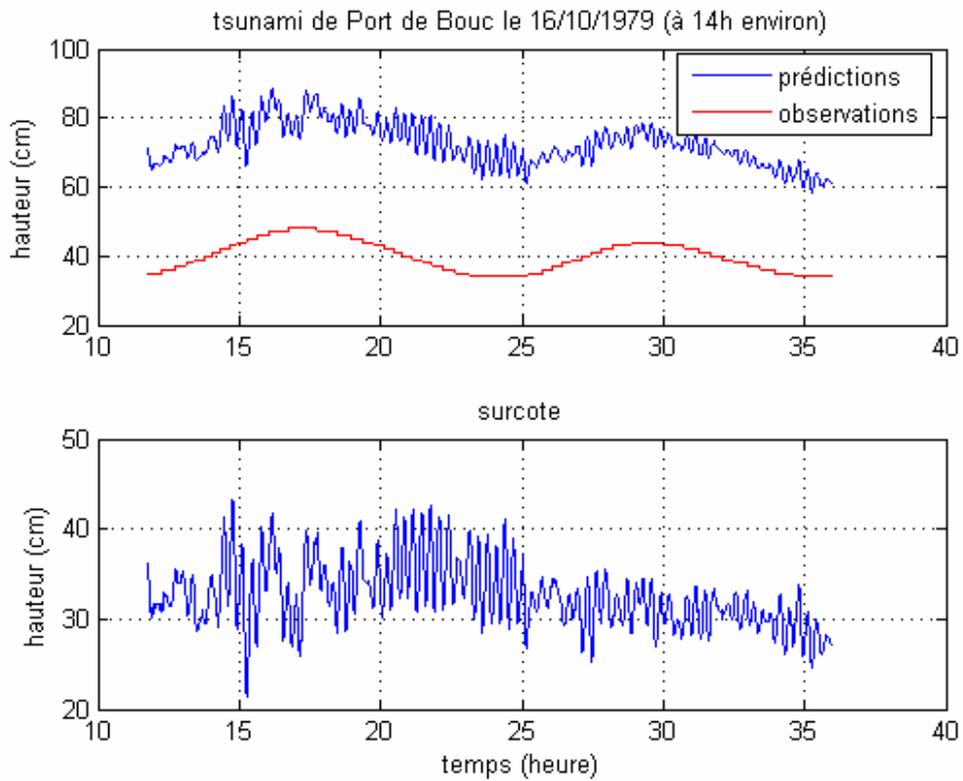


Figure D.11 – numérisation du marégramme de Port de Bouc (UT+1)

Gènes :

Marégramme :

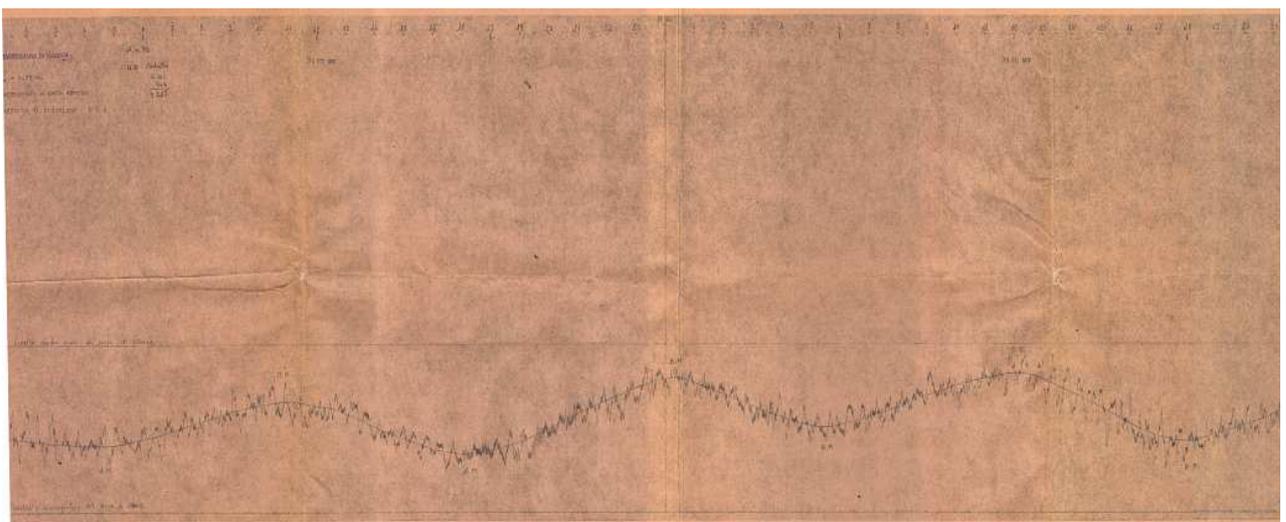


Figure D.12 – marégramme de Gènes, 1979

source : SHOM, producteur : Istituto Idrografico della Marina

Monaco :

Situation géographique :

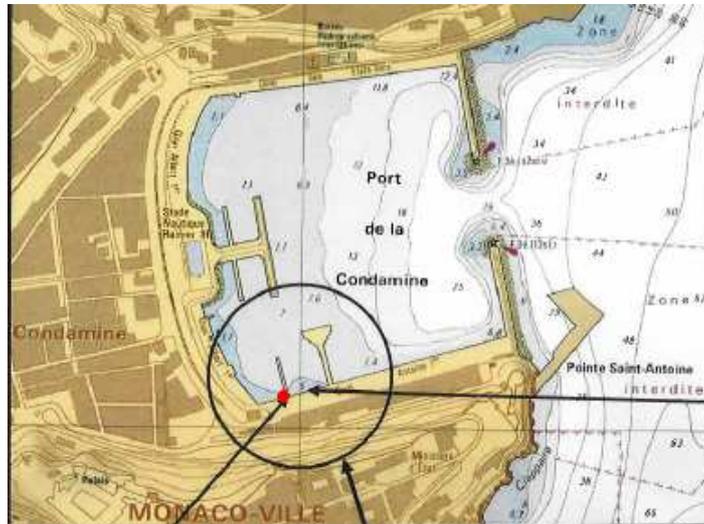


Figure D.13 – marégraphe de Monaco

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2006

Il s'agissait d'un marégraphe OTT de type R16.

Marégramme : aucune trace significative de tsunami

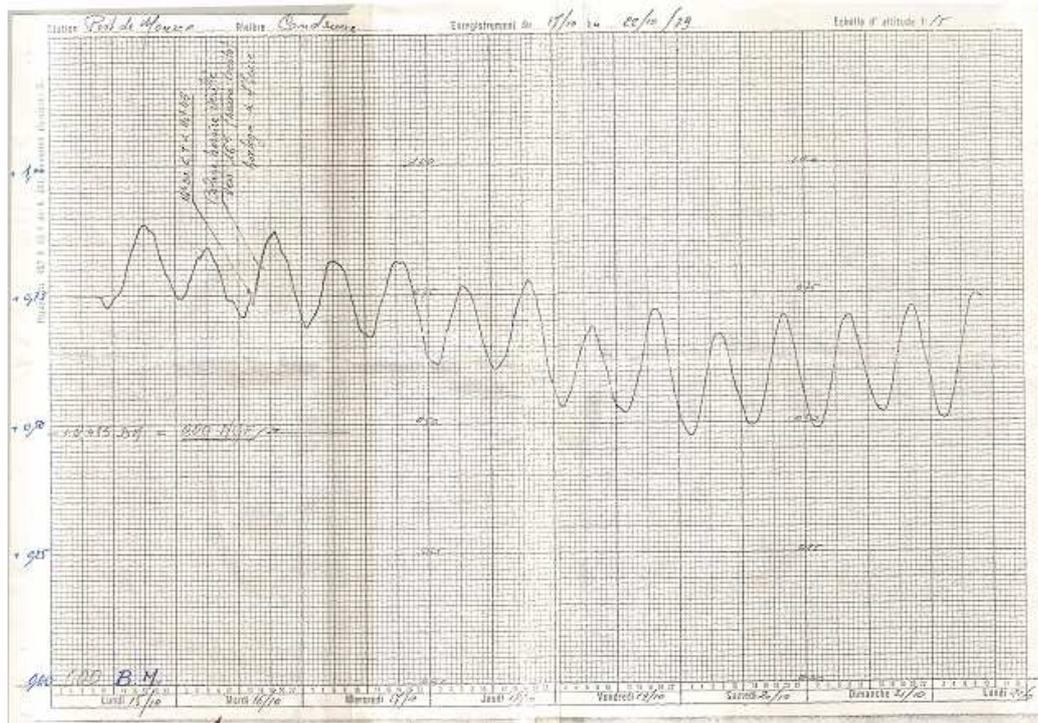


Figure D.14 – marégramme de Monaco, 1979

Source : SHOM, producteur : Travaux Publics

Sète :

Situation géographique :

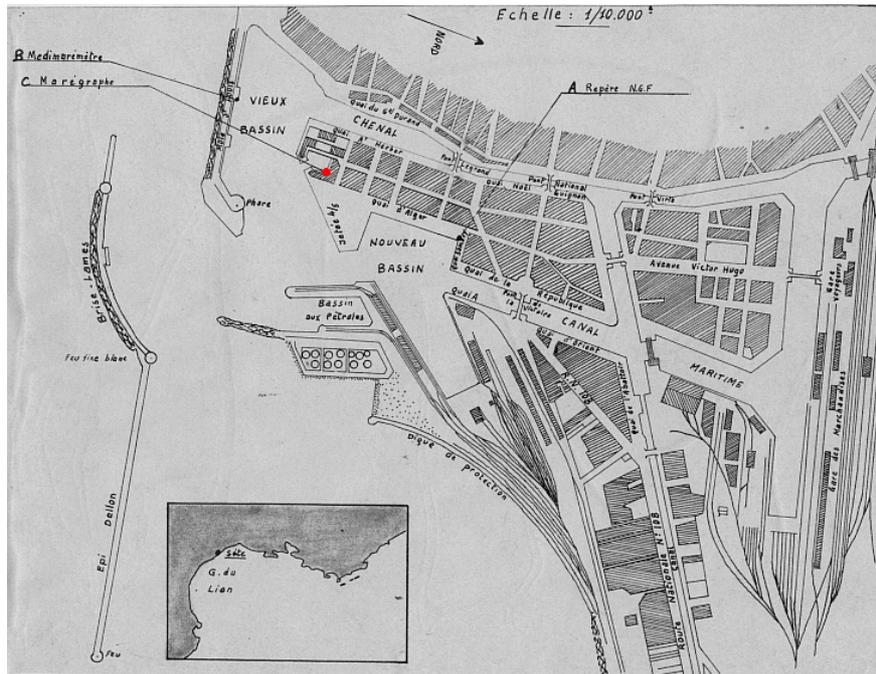


Figure D.15 – marégraphe de Sète

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1972

On disposait à l'époque d'un marégraphe BRILLIE type 2C mis en service en 1956.

Marégramme : aucune trace significative de tsunami

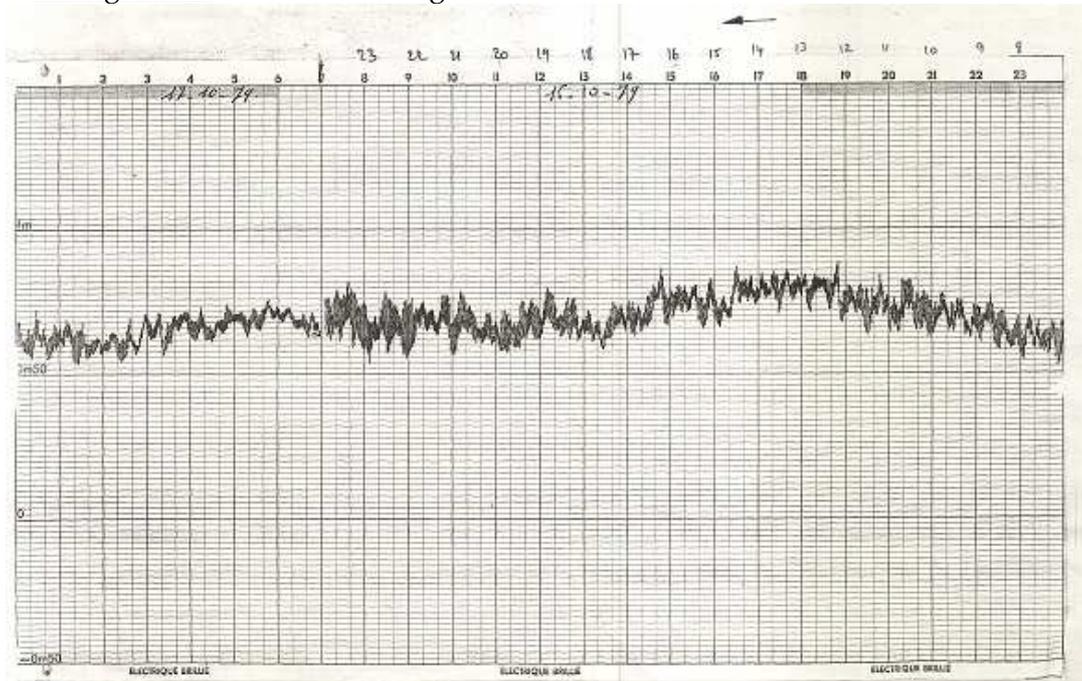


Figure D.16 – marégramme de Sète, 1979

source : SHOM

Villefranche-sur-mer :

Situation géographique :

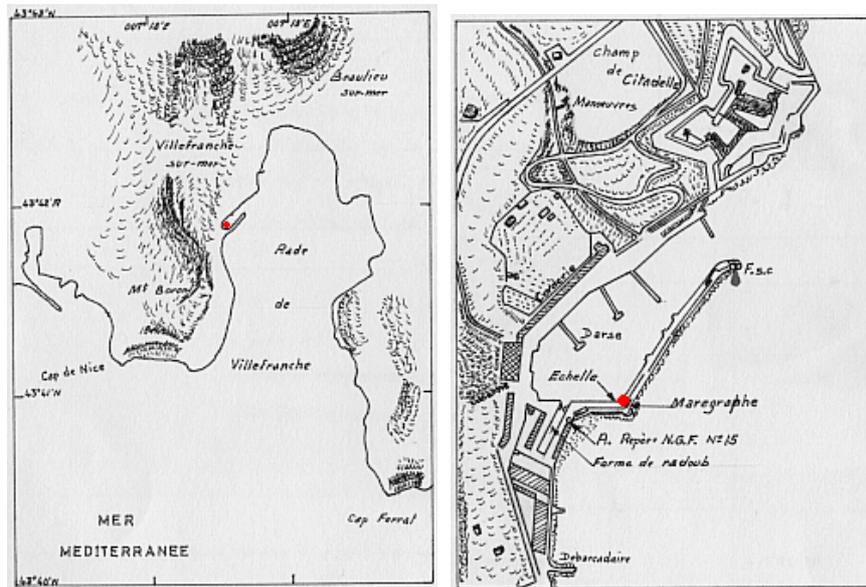


Figure D.17 – marégraphie de Villefranche-sur-mer

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1980

Un marégraphie OTT R16 était en service à cette date.

Marégramme :

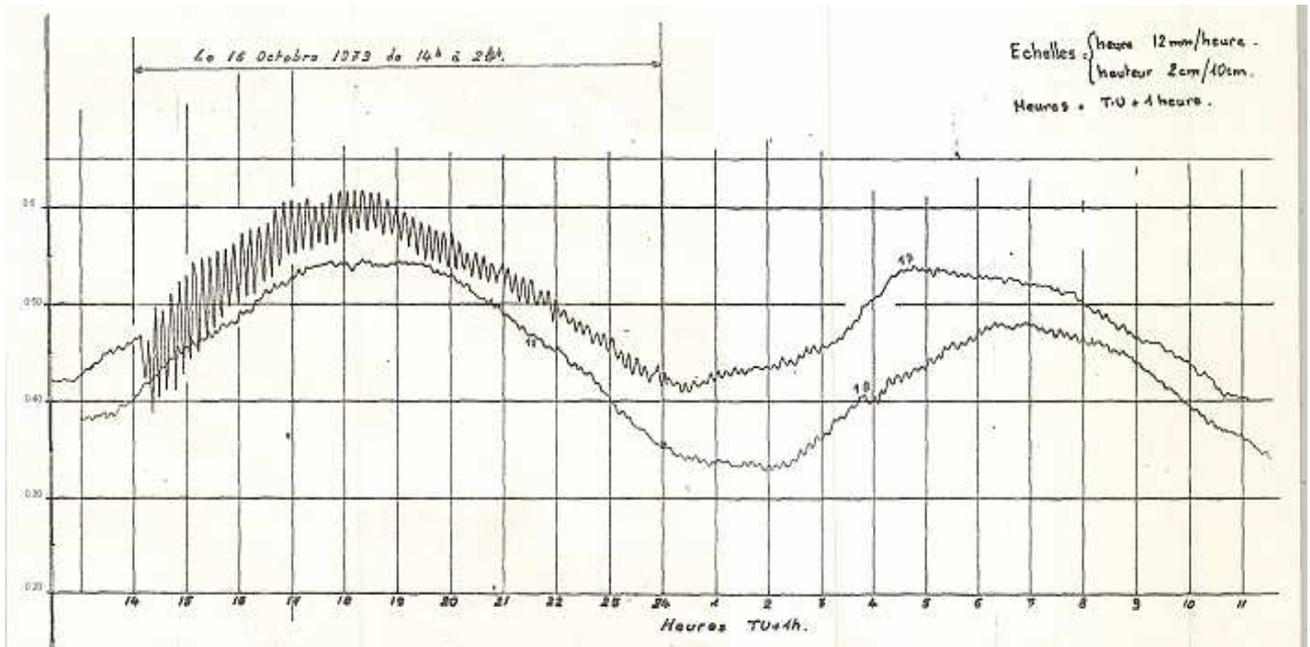


Figure D.18 – marégramme de Villefranche-sur-mer, 1979

source : SHOM

Numérisation :

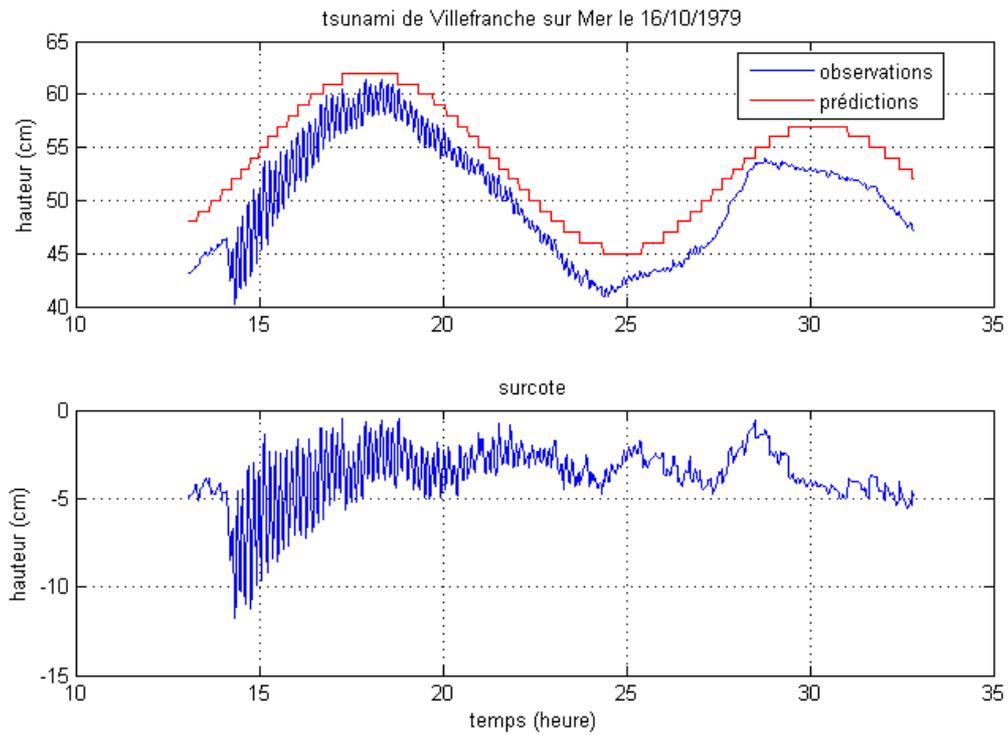


Figure D.19 – numérisation du marégramme de villefranche 1979 (UT+1)

Malaga :

Marégramme : inexploitable

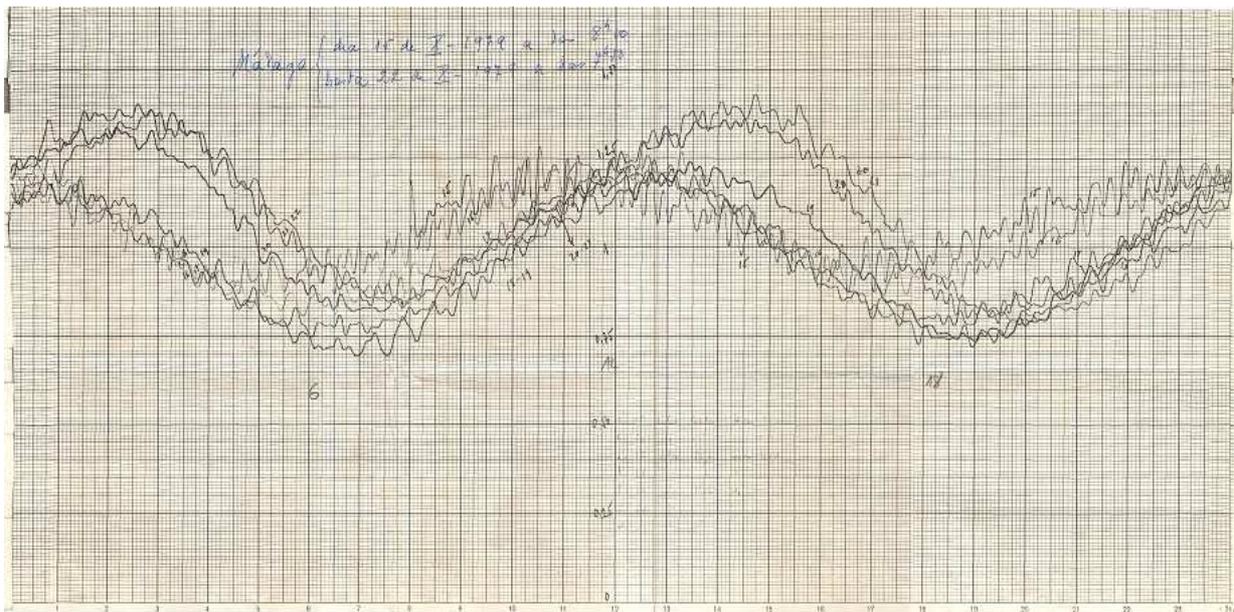


Figure D.20 – marégramme de Malaga, 1979

source : SHOM, producteur : Instituto Español de Oceanografía

Ajaccio :

Il est important de préciser qu'un marégraphe existait bel et bien à cette date mais malheureusement, il est tombé en panne la veille du tsunami et ne fût réparé que 3 mois après.

D.2.6 10/10/1980

séisme de El Asnam (Algérie)

Station	Position géographique	Première vague			Vague Maximale	
		Heure d'arrivée	Temps de propagation	Signe	Heure d'arrivée	Hauteur observée
Grau de la Dent	43°20'48''N 4°39'41''E	/	/	/	/	/
Mandelieu – La Napoule	43°31.58'N 6°56.84'E	/	/	/	/	/
Mèze	43°25'18''N 3°36'20''E	/	/	/	/	/
Nice	43°41.7'N 7°17.1'E	/	/	/	/	/
Pisse-Saumes		/	/	/	/	/
Sète	43°24'N 3°42.14E	/	/	/	/	/
Villefranche-sur-mer	43°41'51.2''N 7°18'27.8''E	/	/	/	/	/

Grau de la Dent :

Situation géographique :

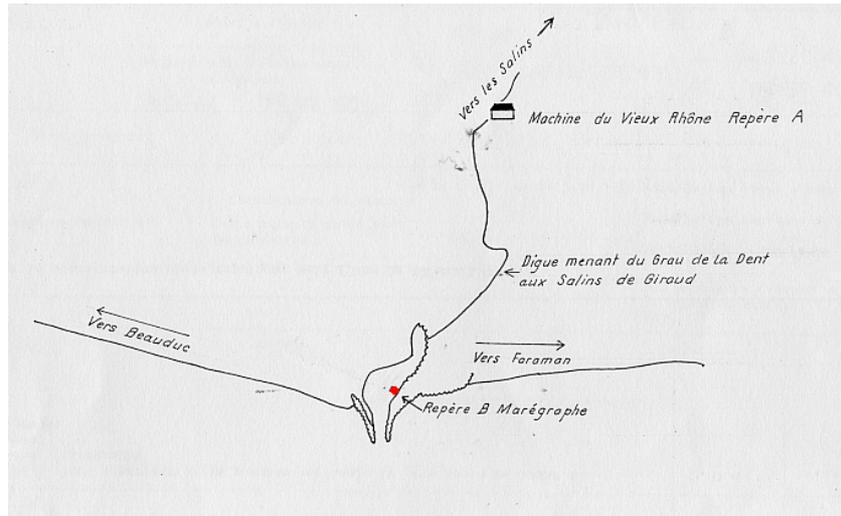


Figure D.21 – marégraphe du Grau de la Dent

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1977

Il s'agissait d'un marégraphe de marque BRILLIE type 2C selon toute vraisemblance, au vu des marégrammes.

Marégrammes : inexploitable à la numérisation malgré la présence d'un signal correspondant au tsunami.

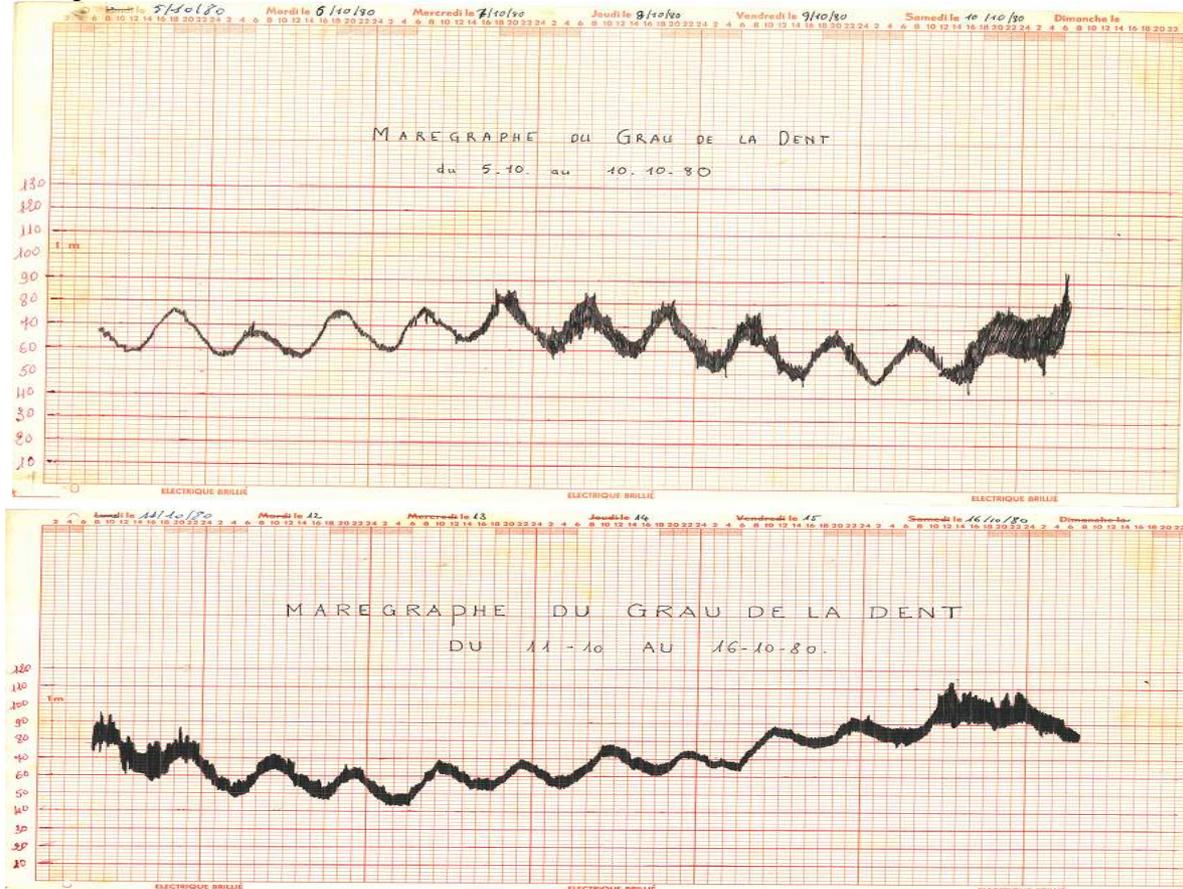


Figure D.22 – marégrammes de Grau de la Dent, 1980

source : CETE Méditerranée

Mandelieu – La Napoule : même marégraphe qu'en 1979

Marégramme : aucune trace significative de tsunami

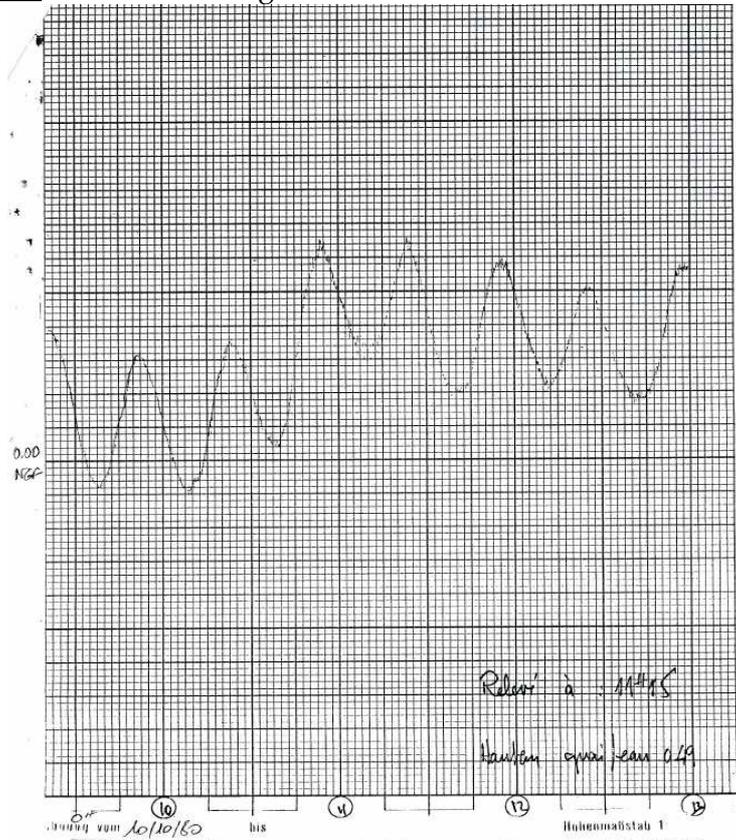


Figure D.23 – marégramme de Mandelieu-La Napoule, 1980

source : SHOM, producteur : DDE

Mèze :

Situation géographique :



Figure D.24 – marégraphe de Mèze

source : GoogleMap et SHOM, fiche d'observatoire de marée de 1983

On disposait à cette époque d'un marégraphe OTT R16.

Marégramme :

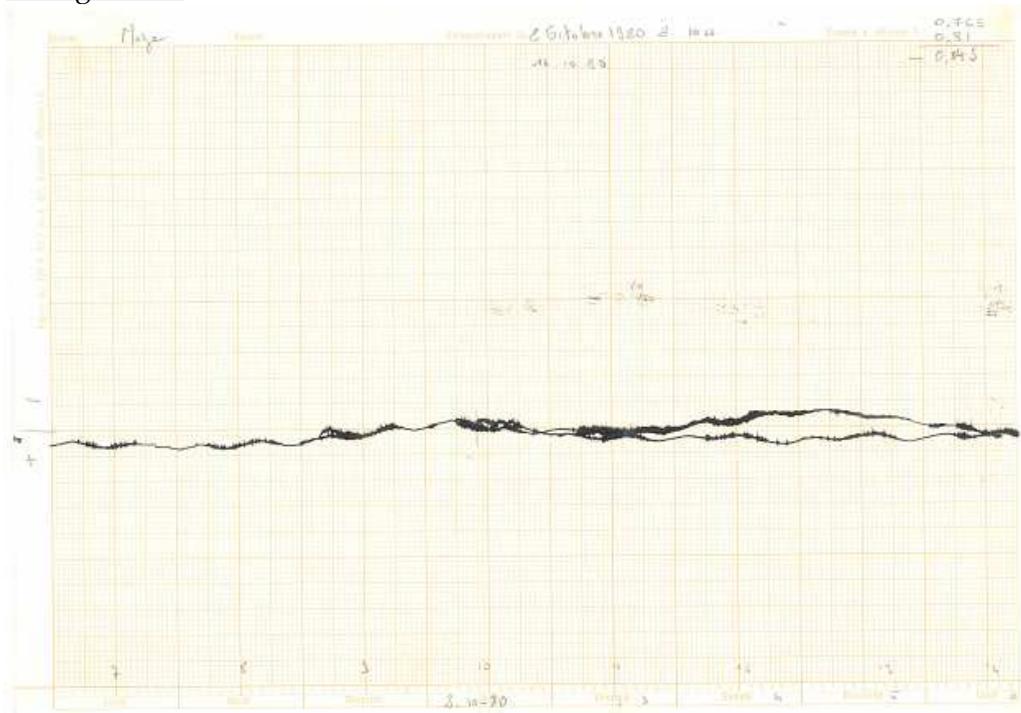


Figure D.25 – marégramme de Mèze, 1980

source : CETE Méd

Nice :

Aucune modification du marégraphe par rapport à l'année précédente 1979, marque BRILLIE et la même configuration géographique.

Marégrammes : aucune trace significative de tsunami le 10 octobre

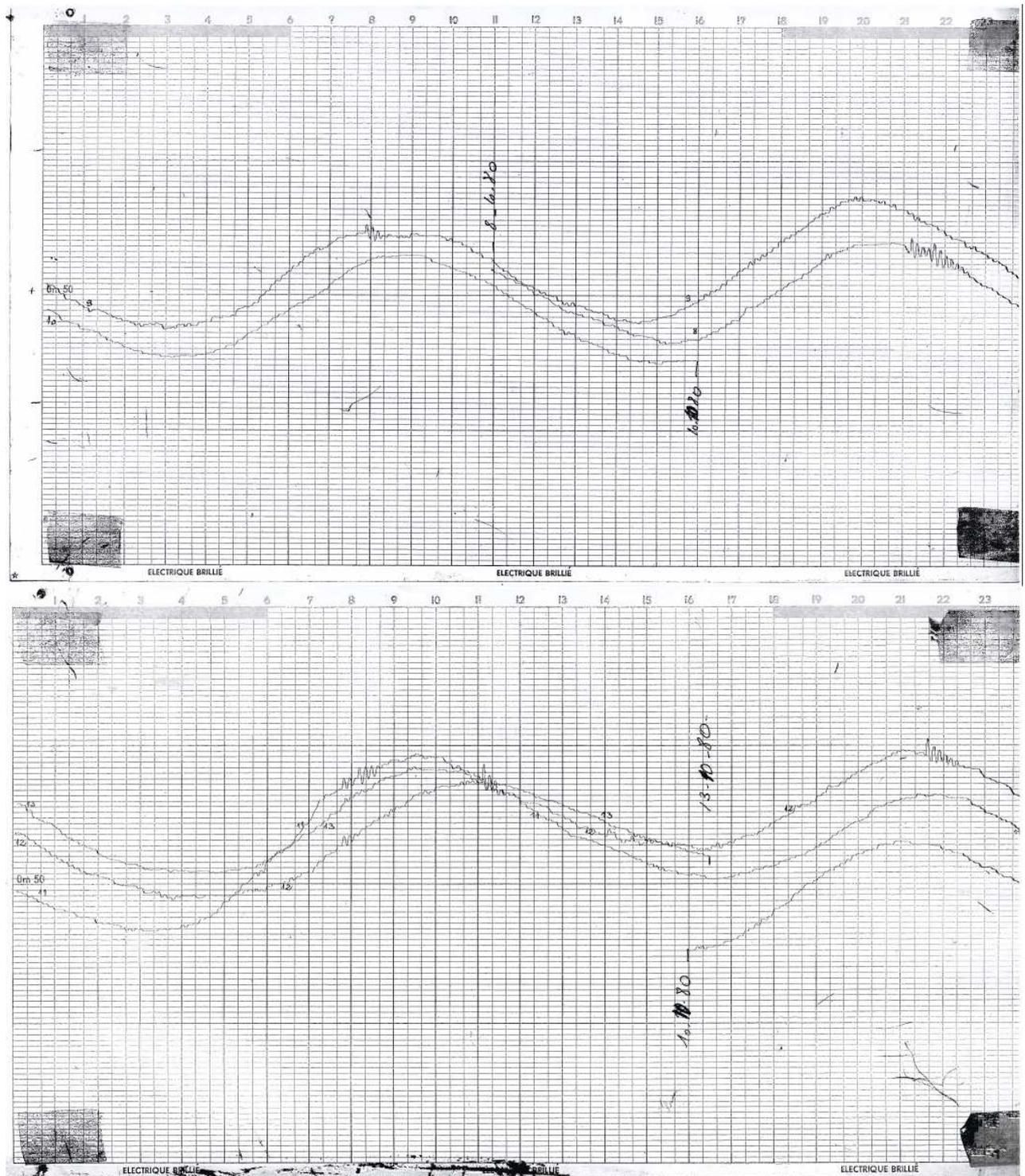


Figure D.26 – marégrammes de Nice, 1980

source : SHOM, producteur : DDE

Sète :

même station qu'en 1979 mais avec un marégraphe OTT R16.

Marégramme :

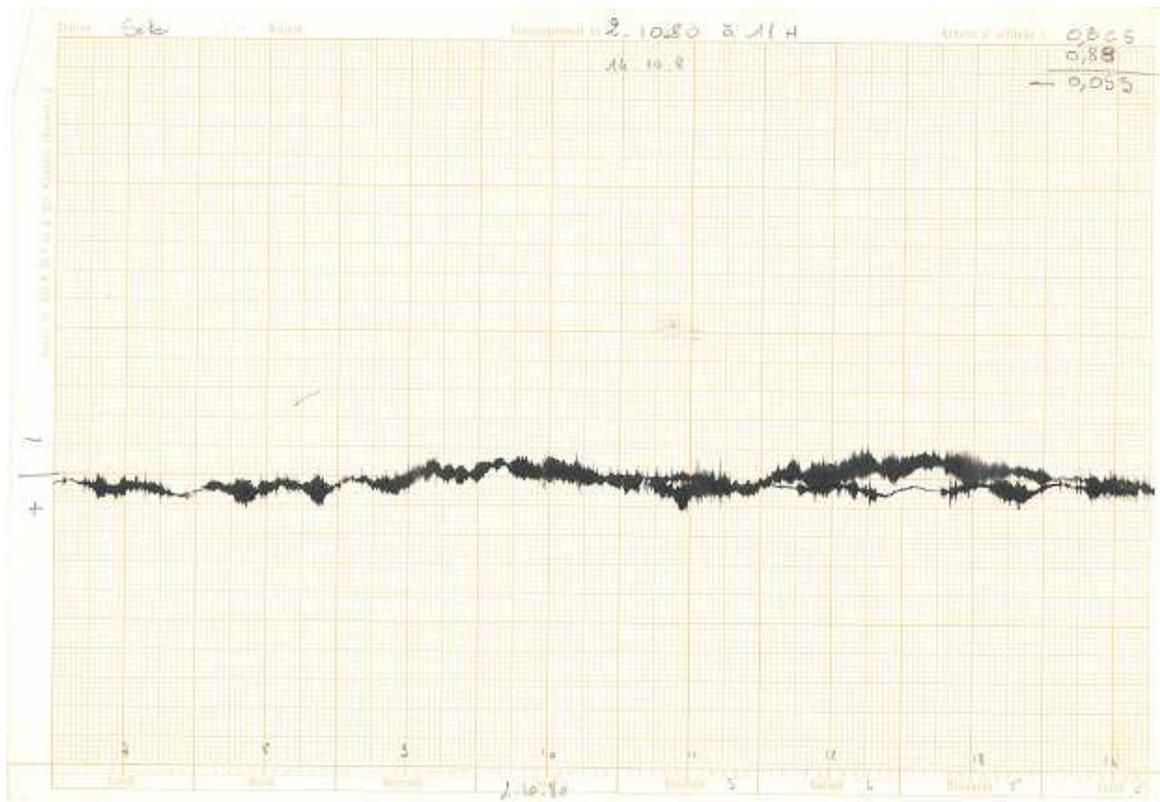


Figure D.27 – marégramme de Sète, 1980

source : CETE Méd

Villefranche-sur-mer :

même station que dans les cas précédent en 1979 avec le même marégraphe, un OTT de type R16.

Marégramme : inexploitable certainement en raison d'un problème technique du marégraphe.

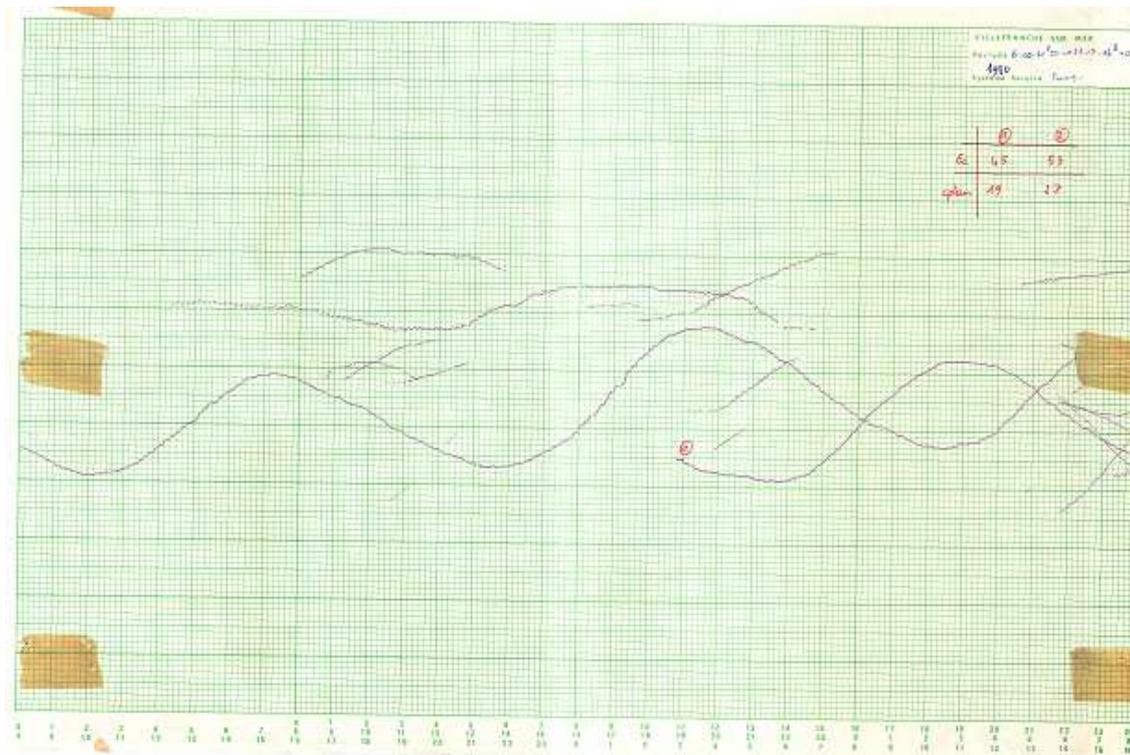


Figure D.28 – marégramme de Villefranche-sur-mer, 1980

source : SHOM

D.2.7 27/10/1985

séisme de Constantine (Algérie)

Station	Position géographique	Première vague			Vague Maximale	
		Heure d'arrivée	Temps de propagation	Signe	Heure d'arrivée	Hauteur observée
Mandelieu – La Napoule	43°31.58'N 6°56.84'E	/	/	/	/	/
Nice	43°41.7'N 7°17.1'E	/	/	/	/	/
Port-Vendres	42°31.25'N 3°06.5'E	/	/	/	/	/

Mandelieu – La Napoule : (cf avant pour la localisation du marégraphe)
Marégraphe OTT R16.

Marégramme : aucune trace significative de tsunami

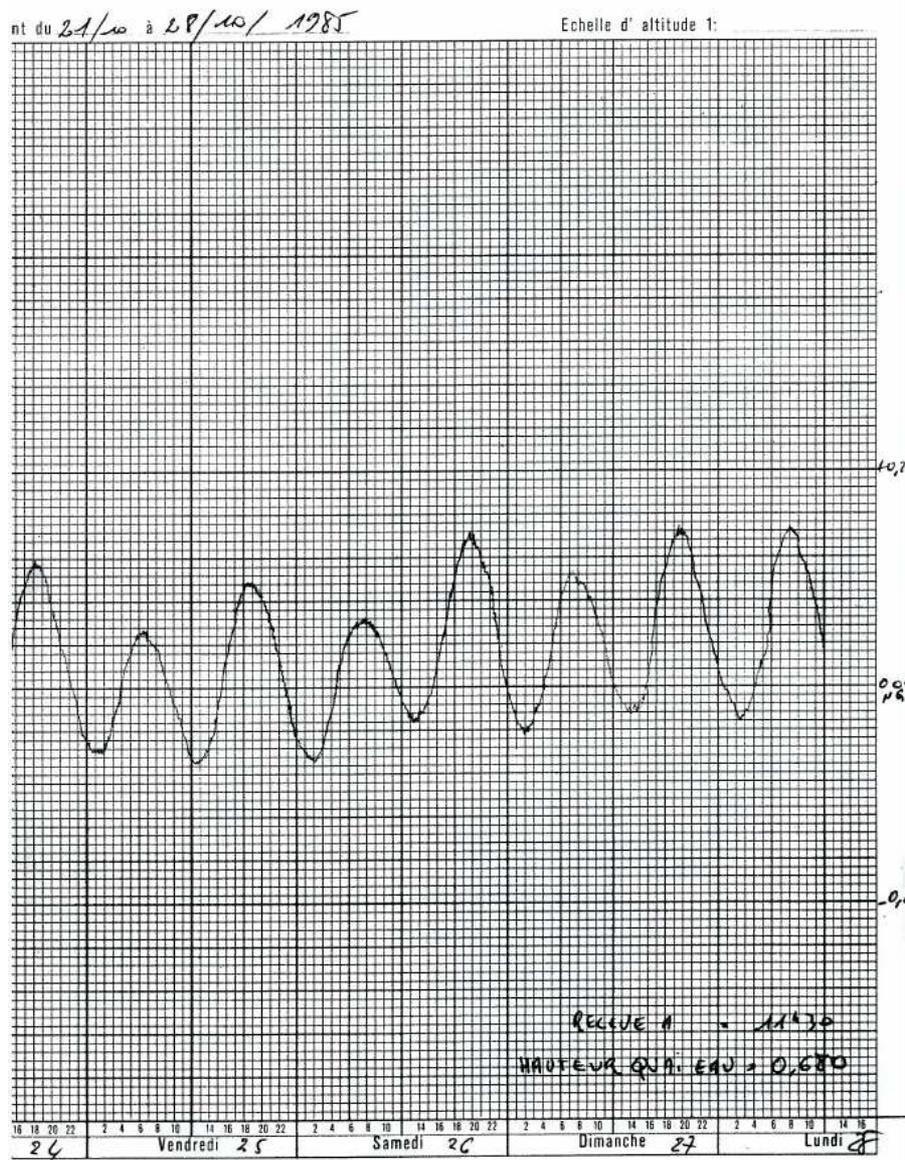


Figure D.29 – marégramme de Mandelieu - La Napoule, 1985

source : SHOM, producteur : DDE

Nice : (cf précédemment pour la localisation du marégraphe)

Marégramme : inexploitable cependant il ne semble pas y avoir de trace de tsunami.

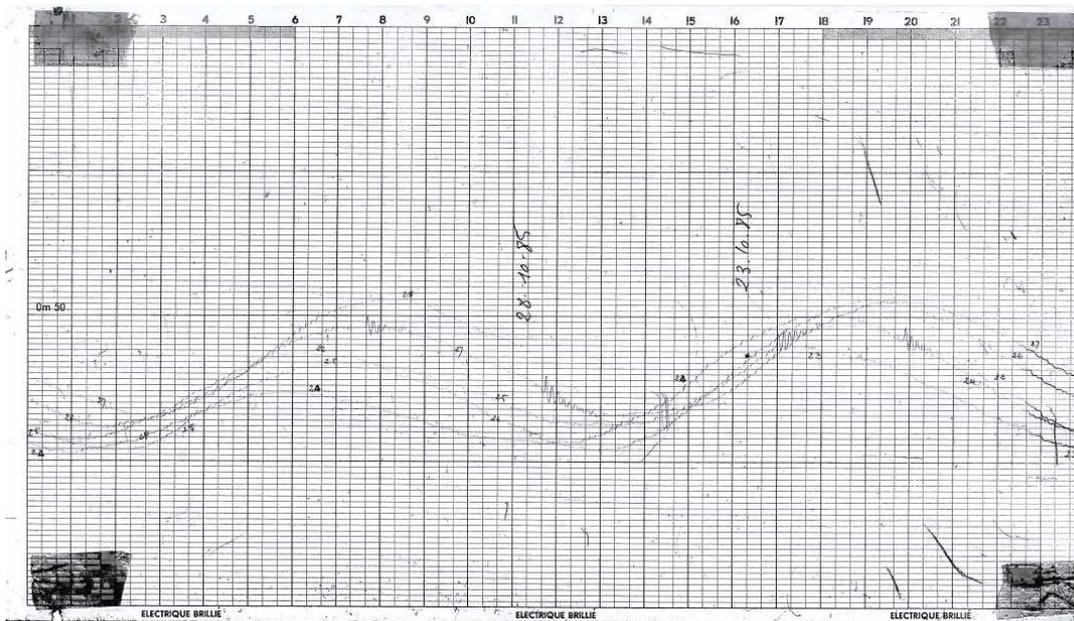


Figure D.30 – marégramme de Nice, 1985

source : SHOM, producteur : DDE

Port-Vendres :

Situation géographique :

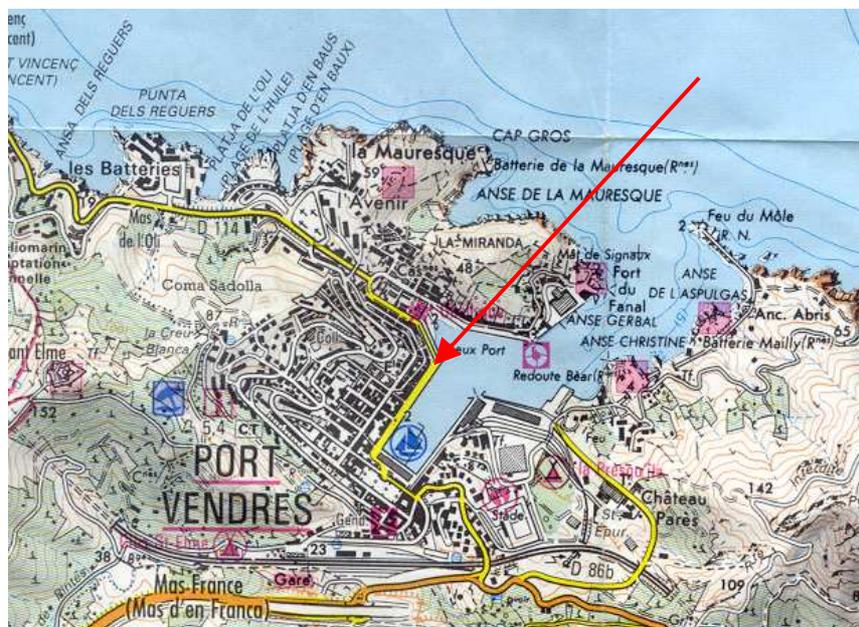


Figure D.31 – marégraphe de Port Vendres

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2008, extrait scanné de la carte IGN n° 2549

Marégraphe OTT R16.

Marégramme : aucune trace significative de tsunami

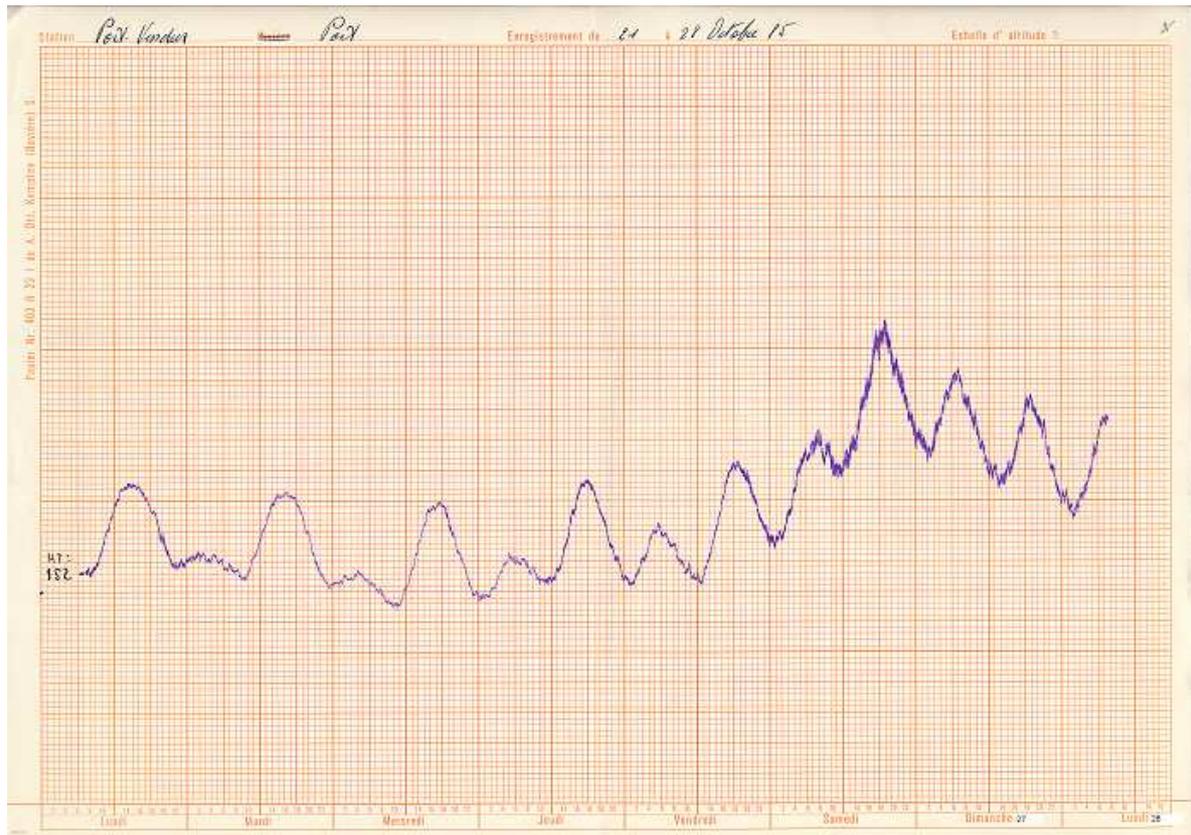


Figure D.32 – marégramme de Port-Vendres, 1985

source : CETE Méd

D.2.8 21/05/2003

séisme de Boumerdès (Algérie)

Source internet : http://www-dase.cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2003-05-21/sim_tsu.html

Résumé de l'événement :

A la suite du séisme d'Alger du 21 mai 2003, des perturbations du niveau de la mer ont été observées sur les côtes des îles Baléares, à Majorque, Minorque et également Ibiza. Les témoins ont rapporté des vagues atteignant 1 à 2 m, et une période moyenne de 10-12 minutes (Majorque). A Minorque une dizaine de bateaux ont coulé et plusieurs autres ont été endommagés. Le marégramme disponible de Palma montre une hauteur maximum d'eau de 60 cm environ. (Source : CEA)

Le tsunami de 2003 s'est propagé en moins d'une heure 20 minutes en Méditerranée occidentale, touchant d'abord les Baléares, où plus d'une centaine de bateaux ont été endommagés, voire coulés, où plusieurs retraits et inondations locales ont été notés. Il a été enregistré sur une vingtaine de marégraphes installés dans les ports espagnols, français et

italiens. Des recherches ultérieures ont mis en évidence un impact jusque dans de petits ports de la Côte d'Azur, où une chute rapide du niveau de la mer, des purges de bassins, des courants et tourbillons ont été observés et ont localement gêné des plaisanciers, et ce pendant plusieurs heures. Côte algérien, peu d'informations sont disponibles : le tsunami n'a pu être observé, et/ou il a été très faible. Ce que cet événement a rappelé, c'est qu'un impact modéré (en matière d'inondations) s'accompagne d'un coût économique important, tendance qui ne peut que s'accroître avec la vulnérabilité croissante des côtes touristiques. Dans cette région, il faut noter que jusqu'à présent, peu de données sont transmises en temps réel. (Source : CEA)

La période typique des ondes de tsunami est de 20 minutes dans le cas d'un séisme, et de quelques minutes en cas d'effondrement sous-marin. Par conséquent, l'échantillonnage requis des données marégraphiques se situe entre quelques dizaines de secondes et 1 minute.

Les enregistrements à 10 minutes des ondes du tsunami de 2003 montrent des amplitudes d'à peine 10 à 20 cm selon les ports français. Il est évident que ces enregistrements ne représentent pas le tsunami réel dont l'amplitude était plus forte. Les témoignages recueillis dans la plupart des ports de la Méditerranée soulignent que dans au moins 8 d'entre eux, des retraits de la mer de 50 cm à parfois plus de 150 cm ont été observés, suivis d'une remontée rapide et de courants importants durant parfois plusieurs heures. Ces retraits n'ont pu être observés par les enregistrements de l'époque du fait de l'échantillonnage inadéquat car trop espacé. (Source CEA)

Station	Position géographique	Première vague			Vague Maximale	
		Heure d'arrivée	Temps de propagation	Signe	Heure d'arrivée	Hauteur observée
Marseille	43°16.7'N 5°21.2'E					
Nice	43°41.7'N 7°17.1'E					
Monaco	43°43.96'N 7°25.41'E					
Toulon	43°07.4'N 5°54.9'E					
Ajaccio	41°55.3'N 8°45.9'E					
Palma de Mallorca		19h29	45 min	+		
Senetosa	41°32.99'N 8°48.9'E	19h55	1h11	+		

Marseille :

Situation géographique :



Figure D.33 – marégraphe de Marseille

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2006, extrait de la carte IGN n° 3145 ET

Il s'agit d'un marégraphe côtier numérique muni d'une centrale d'acquisition MORS type HT200 et d'un télémètre à ultrason RADARSON. Il fonctionne avec un échantillonnage de 10 min et une durée d'intégration de 2min

Ajaccio :

Situation géographique :



Figure D.34 – marégraphe d'Ajaccio

source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2005, extrait de la carte IGN n° 4153 OT

Il s'agit également d'un marégraphe côtier numérique MORS de type HT200 fonctionnant avec un échantillonnage de 10 min et une durée d'intégration de 2 min.

Marégrammes et numérisations :

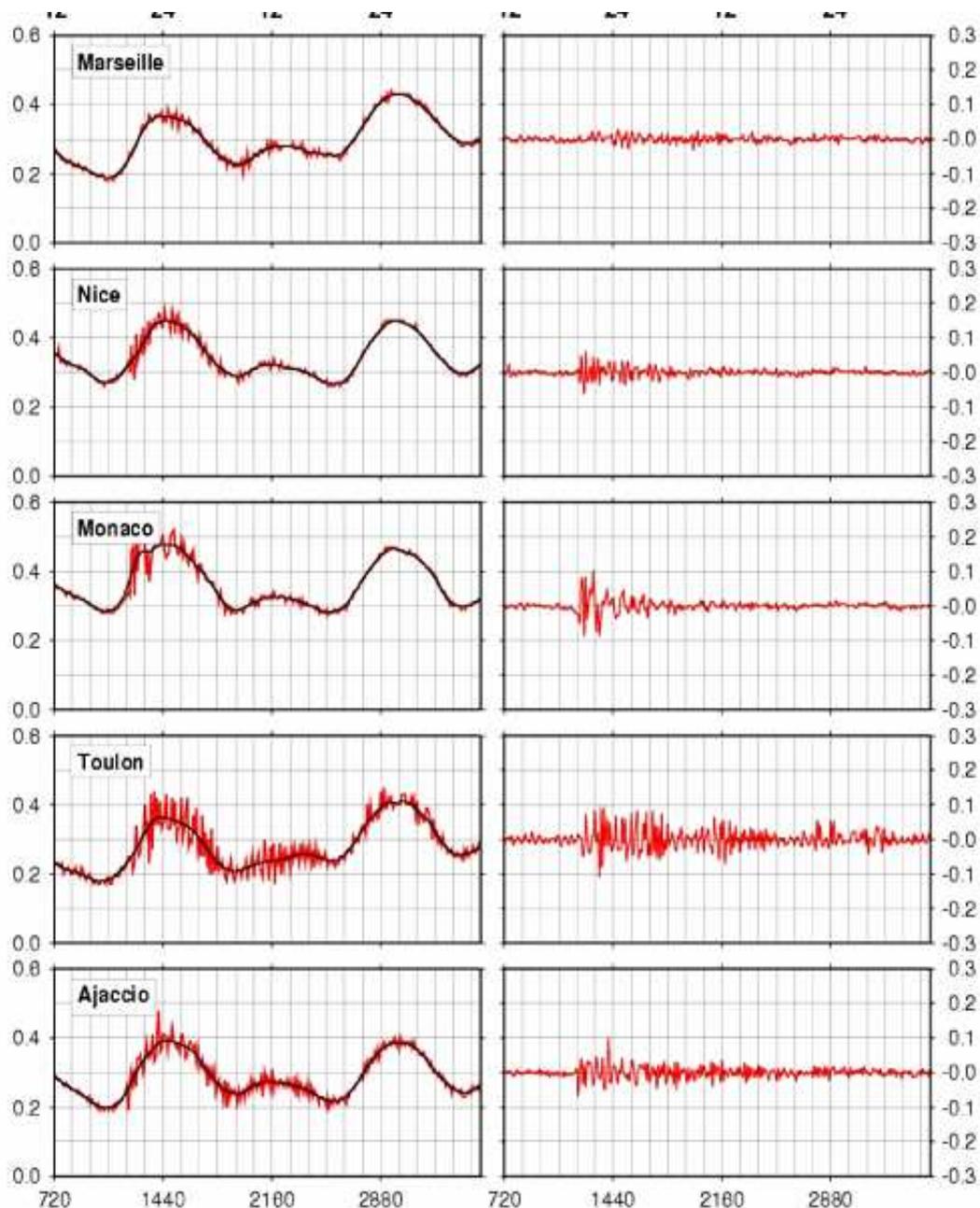


Figure D.35 – marégrammes et leurs numérisations de Marseille, Nice, Monaco, Toulon et Ajaccio en 2003

source : données SHOM via RONIM et graphiques réalisés par le CEA

Senetosa :

Situation géographique :

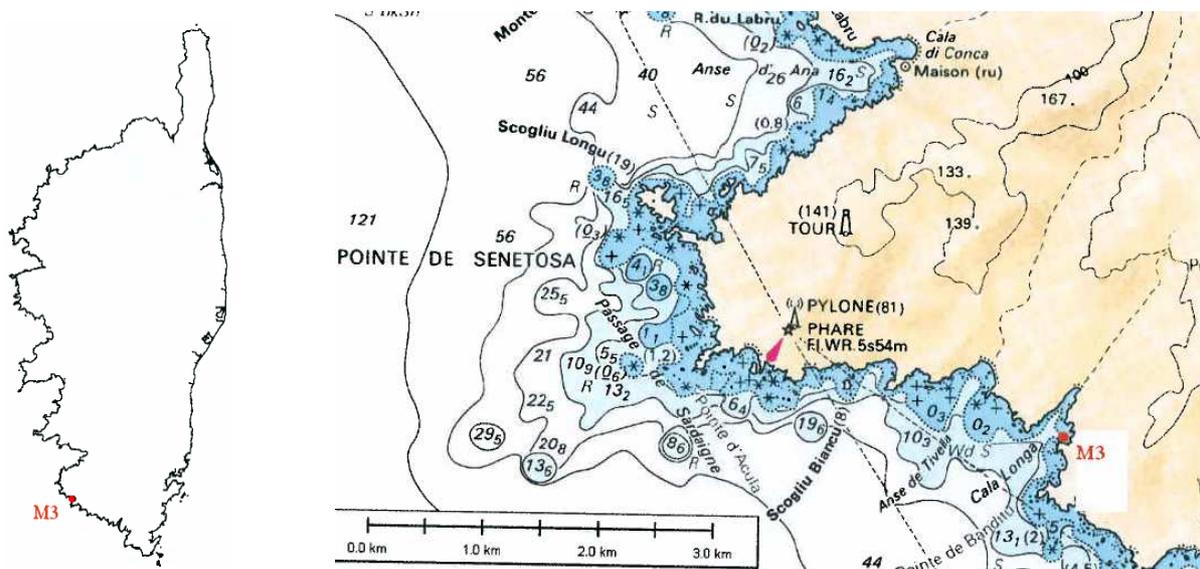


Figure D.36 – marégraphe de Senetosa

Source : SHOM, fiche d'observatoire de marée de 2009, extrait de carte marine n° 7162

Il s'agit ici d'un marégraphe à capteur de pression de l'observatoire de la Côte d'Azur (marque Aanderaa). Il fonctionne avec une cadence de 5 min et avec une intégration de 40 sec en 2003.

Marégramme et numérisation:

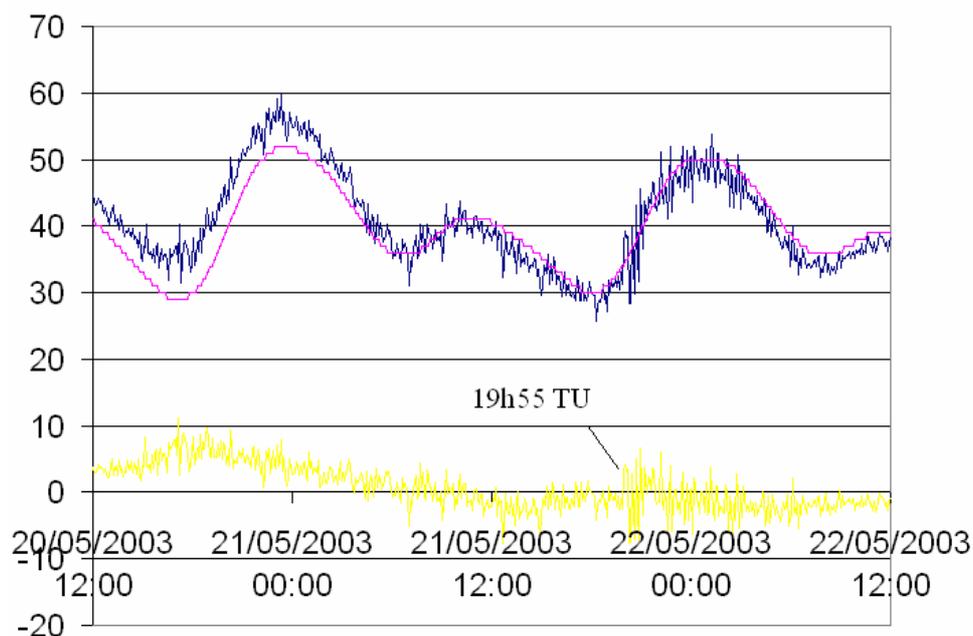


Figure D.37 – marégramme et numérisation de Senetosa, 2003 (UT)

source : observatoire de la Côte d'Azur

Palma de Mallorca :

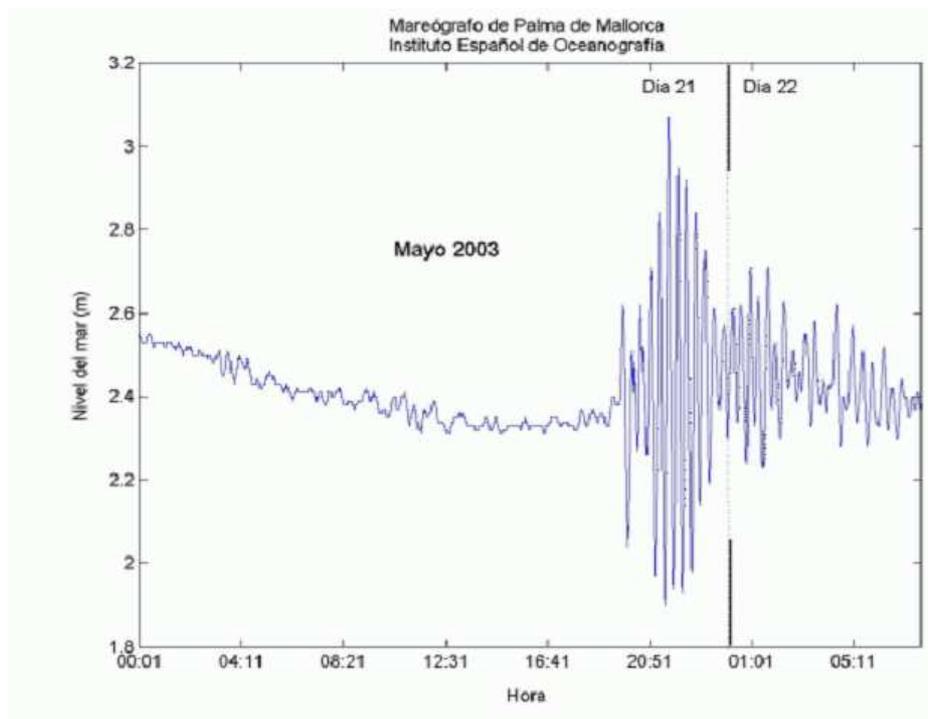


Figure D.38 – marégramme de Palma de Mallorca, 2003

source : Instituto Español de Oceanografía

CONCLUSION

Cette étude a permis de débiter la recherche et l'inventaire de marégrammes historiques et de réaliser la numérisation des signaux retrouvés au moyen du logiciel NUNIEAU. La durée du stage n'a permis de conduire les recherches d'archives qu'en interne au SHOM ou en rassemblant les données extérieures déjà récupérées depuis le lancement du projet. Ces recherches concernent principalement les événements les plus récents, ceux-ci étant les plus facilement accessibles. Parmi les enregistrements découverts et exploités, on notera :

- en Atlantique :
 - l'enregistrement de Port-Tudy du tristement célèbre tsunami de 2004
 - les enregistrements à La Pallice des événements de 1969 et 1975
 - les enregistrements de l'événement 1941 au Maroc
- en Méditerranée :
 - les marégrammes recueillis dans les ports de Méditerranée en 1979, 1980, 1985 et 2003.

A ce stade, on peut déjà noter la difficulté à obtenir des observations satisfaisantes de tsunami malgré le nombre important de marégrammes recueillis. En effet, le type d'acquisition ou la dégradation du support papier sont autant de raisons qui rendent la tâche difficile. Les cadences d'échantillonnage insuffisantes sont également un problème rencontré au début de l'ère numérique.

Néanmoins, le SHOM ne possédant qu'une partie des archives nationales, il paraît prometteur d'envisager la poursuite des recherches dans les autres organismes français (IGN, Services historiques de la Défense, centre départementaux et régionaux d'archivage, organismes scientifiques, DDE, ports autonomes, IRD-ex ORSTOM, ...) afin d'enrichir la base de données.

Cette étude constitue donc les prémisses du projet MAREMOTI. L'étude de la bibliographie a en particulier permis de définir et d'initier les méthodes de traitement qui seront à mettre en place. On peut ainsi imaginer à terme un traitement bien défini de tâches à effectuer qui serait systématique quelque soit le tsunami et pouvant trouver des applications dans l'analyse des seiches et des ondes de tempête.

BIBLIOGRAPHIE

- Base de données du BRGM : www.tsunamis.fr
- R. Courteau. 2007. **Tsunamis sur les côtes françaises : un risque certain, une impréparation manifeste.** *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*. N° 488 – Assemblée Nationale. N° 117 – Sénat. ISBN 978-2-11-126026-9.
- N. Pouvreau. 2008. **Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest.** *Thèse soutenue le 26/09/2008.*
- I.V. Fine, A.B. Rabinovich, B.D. Bornhold, R.E. Thomson and E.A. Kulikov. 2004. **The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929 : preliminary analysis and numerical modeling.** *Marine Geology* 215 (2005) 45-57.
- A.B. Rabinovich, R.E. Thomson and F.E. Stephenson. 2006. **The Sumatra tsunami of 26 December 2004 as observed in the North Pacific and North Atlantic oceans.** *Surv. Geophys.* 27:647–677. doi:10.1007/s10712-006-9000-9.
- V. Titov, A.B. Rabinovich, H.O. Mofjeld, R.E. Thomson, F.I. Gonzales. 2005. **The Global Reach of the 26 December 2004 Sumatra Tsunami.** *SCIENCE* vol 309 (23 september 2005) 2045-2048.
- I.V. Fine, A.B. Rabinovich and R.E. Thomson. 2005. **The dual source region for the 2004 Sumatra tsunami.** *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 32, L16602, doi:10.1029/2005GL023521.
- J. Roger and H. Hébert. 2008. **The 1856 Djijelli (Algeria) earthquake and tsunami: source parameters and implications for tsunami hazard in the Balearic Islands.** *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 721-31.
- E. Pelinovsky, C. Kharif, I. Riabov and M. Francius. 2001. **Numerical simulation of tsunami propagation near the French coast of the Mediterranean.** *ITS 2001 Proceedings*, Session 7, Number 7-15.