

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهينة  
École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de  
l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE DE MAGISTERE EN SCIENCES DE LA MER

Spécialité : Géorisques et Aménagement du Littoral

Thème :

Contribution à la Compréhension de la Hausse Soudaine du  
Niveau de la Mer, Cas de la baie d'Alger.

Présenté par : KADDOUR Said

Soutenu le 21/12/2014 devant le jury suivant :

M. BOULAHIDID Mostefa	Professeur (ENSSMAL)	Président
M. ATROUNE Farid	Maitre de Conférences. A (USTHB)	Examineur
M. GUERFI Mokhtar	Maitre de Conférences. A (ENSSMAL)	Examineur
M. HEMDANE Yacine	Maitre de Conférences. A (ENSSMAL)	Promoteur
Mme. GUEMDANI Razika	Ingénieur (INCT)	Invité

## **REMERCIEMENTS**

*Au terme de ce travail, je remercie Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.*

*Je remercie **Mr HAMEDANE.Y**, Maître de conférences (ENSSMAL), d'avoir accepté, de diriger et de suivre constamment la progression de ce travail, par ses suggestions, conseils et ses critiques constructives.*

***M. BOULAHIDID Mostafa**, Professeur à l'ENSSMAL qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.*

***Mr GUERFI Mokhtar**, Maître de Conférences à l'ENSSMAL, **Mr ATROUNE Farid** Maître de conférences à l'USTHB, qui ont accepté très aimablement de participer à ce jury et d'examiner ce travail.*

***Mme GUEMDANI Razika**, Sous Directrice de la Recherche et Développement à l'INCT, à lui rendre un hommage tout particulier d'avoir accepté notre invitation ainsi pour son aide et soutien durant mon stage.*

*Mes profondes reconnaissances au personnel de la bibliothèque de l'ENSSMAL, du laboratoire de Géodésie de l'INCT, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont aidé du près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Je suis reconnaissant à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation et à toute personne qui m'a appris une lettre ou une phrase, qu'ils trouvent ici ma reconnaissance et un petit fruit de leurs sueurs.*

## **RESUME**

L'élévation soudaine du niveau de la mer est un phénomène qui se distingue de l'élévation contemporaine du niveau de la mer qui résulte d'une conjonction de facteurs naturels dans le contexte actuel de changement climatique. Si la première est visible à court terme (de quelques heures à quelques jours), la seconde nécessite des dizaines d'années pour sa mise en évidence.

Pour comprendre le phénomène de la hausse soudaine du niveau de la mer qui atteint des seuils d'environ 2m (cas du port d'El Djamila en 2010), nous avons privilégié une méthodologie basée sur le traitement du signal et ce, afin d'ausculter les signaux du niveau de la mer réparties sur trois ans (2011, 2012 et 2013) ; et mesurés par le marégraphe numérique installé au niveau du port d'Alger. Ainsi, nous avons appliquées deux méthodes ; la méthode de Welch et le filtrage numérique, qui ont permis, respectivement, d'estimer les différentes fréquences énergétiques contenus dans le signal brut et de séparer les différentes ondes marines confondues dans le signal marégraphique.

Les résultats de la densité spectrale de puissance signalent la présence des pics fréquentiels qui appartiennent aux ondes des tsunamis et des météotsunamis.

Par ailleurs, les filtres opérés sur le signal marégraphiques ont permis aussi bien de caractériser le type de la mer de notre région que l'isolation des ondes marines qui avaient induit la hausse soudaine du niveau de la mer.

**Mots clés :** Hausse soudaine, Données marégraphiques, Analyse spectrale, Météotsunamis, Baie d'Alger.

## **Abstract**

The sudden rise of the sea level is a phenomenon that differs from contemporary elevation of the sea level resulting from a combination of natural factors in the current context of climate change. If the first is visible in the short term (from a few hours to a few days), the second requires dozens of years for his evidence.

To understand the phenomenon of the sudden rise of the sea level reaching thresholds of approximately 2m (case of the port of El Djamila in 2010),we privileged a methodology based on the processing of the signal, in order to examine the signals from the sea level spread over three years (2011, 2012, 2013). And measured by the digital tide gauge installed at the harbor of Algiers. Thus, we applied two methods; the Welch method and digital filtering, which, respectively, to estimate the different energy frequencies contained in the raw signal,and separate the various marine waves Confused in the sea-level signal.

The results of the power spectral density report the presence of the frequency peaks that belong to the waves of the tsunamis and the meteotsunamis.

In addition, operated on the tide signal filters have allowed both to characterize the type of the tide of our area, than the isolation of marine waves that had induced the sudden rise of the sea level.

**Clays Words:** Sudden rise of the sea level, Tide gauge data, Spectral analysis, Meteotsunamis, Bay of Algiers

:

الطبيعية السياق لتغير . هو ظاهرة تختلف  
الثانية لسنين لإثباتها. ت الظاهرة

لفهم ظاهرة الارتفاع  
ي منهجية ه  
(2011 2012 2013). والمقاسة بجهاز قياس  
طريقة تصفية الرقمية وهذا لتقدير  
البحرية .

الطيفية بينت

البحرية يسببها  
الكلمات الافتتاحية: معطيات مستوى سطح البحر التحليل الطيفي

عن مزيج  
قليلة أيام)  
القصير )  
مستويات 2 ( ميناء جميلة 2010  
ميناء  
أيضا قمنا بتطبيق طريقتين؛  
بين

يد

خليج الجزائر.

# SOMMAIRE

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur le niveau de la mer</b>	
I.1. Définition du niveau de la mer.....	4
I.2. Mesures du niveau de la mer.....	4
I.2.1. Pourquoi mesurer le niveau de la mer.....	4
I.3. Les variations du niveau de la mer.....	5
I.3.1. Les différentes échelles spatio-temporelles.....	5
I.3.1.1. Les variations du niveau de la mer au cours des temps géologiques.....	6
I.3.1.2. Cycles glaciaires-interglaciaires du Quaternaire.....	7
I.3.1.3. Les variations récentes du niveau de la mer : Le XX <sup>ème</sup> siècle.....	7
I.4. Les principales causes des variations du niveau de la mer sur des échelles de temps de la décennie au siècle.....	8
I.5. Les conséquences de l'élévation actuelle du niveau de la mer.....	9
I.6. Les moyens d'observation actuels du niveau de la mer.....	9
I.6.1. Principe de la mesure marégraphique.....	10
I.6.2. L'altimétrie spatiale : observations synoptiques à haute précision du niveau de la mer.....	11
I.6.2.1. Principe de la mesure altimétrique: mesure du niveau de la mer absolu.....	11
I.7. Variations à court terme et périodique du niveau de la mer.....	11
I.7.1. Types d'ondes.....	12
➤ La houle.....	12
➤ Seiches.....	13
➤ Marées.....	13
➤ Tsunamis.....	13
I.8. Les submersions marines.....	14
I.8.1. Les tempêtes.....	14
I.8.2. Les surcôtes.....	14
I.8.3. Processus de formation d'une onde de tempête.....	15
I.8.4. Elévation du niveau d'eau due au déferlement des vagues.....	15
I.8.5. Le Wave Setup.....	16
I.8.6. Le Runup.....	16
I.9. Origine de la marée : théorie statique.....	17
I.9.1. Les forces à l'origine du phénomène.....	17
I.9.1.1. La force d'attraction gravitationnelle.....	17
I.9.1.2. La force centrifuge.....	18
I.9.1.3. La force génératrice de la marée.....	18
I.10. Les surcotes et les décotes.....	19
I.10.1. Rôle de la pression atmosphérique.....	20
I.10.2. Rôle du vent.....	21
➤ La direction du vent.....	21
➤ Vitesse du vent.....	21
➤ Durée d'action du vent.....	21

## Chapitre II : Définition de la zone d'étude

II.1. Présentation du site d'étude.....	23
II.2. Bathymétrie de la baie d'Alger.....	23
II.3. Géomorphologie.....	24
II.3.1. Aspect géomorphologie local.....	24
II.3.2 La formation Quaternaire.....	25
II.3.3. Données météorologique et hydrographique.....	26
II.3.3.1. Données météorologiques.....	26
II. 3.3.1.1. Précipitations (Données O.N.M 1975-1984).....	26
II. 3.3.1.2. Les vents.....	27
a) Données de l'US. Naval Weather Service (1914-1970).....	27
b) Données de l'Office National de Météorologie (1975-1984).....	28
I.3.4. Données hydrodynamiques.....	30
I.3.4.1. La houle.....	30
I.3.4.2. Les courants.....	30
II.5. Les Marées.....	33

## Chapitre III : Matériels et Méthodes

III. L'analyse spectrale .....	34
III.1. Analyse spectrale avec la transformée de Fourier rapide (FFT).....	35
III.1.2 Les paramètres de la FFT.....	36
➤ Fréquence d'échantillonnage : $F_e$ .....	36
➤ Règle d'échantillonnage de Shannon.....	36
➤ Nombre de points temporels du calcul FFT (nfft).....	37
III.1.3. Efficacité de l'algorithme de la FFT.....	37
III.2. Estimation de l'énergie spectrale par la méthode de PWELCH utilisé dans le programme Matlab .....	37
III.2.1 La densité spectrale d'énergie.....	37
III.2.2. Généralités sur les estimateurs de la DSP.....	38
III.2.3. La fenêtre spectrale.....	38
III.2.4. Principe du périodogramme.....	38
III.2.5. Principes des différents estimateurs de type Fourier.....	39
➤ Principe de la méthode Welch.....	39
III.2.6. Définition de Pwelch (périodogramme de Welch).....	39
➤ Le périodogramme.....	39
III.2.7. Estimateur de WELCH .....	39
➤ Utilisation de la méthode de Welch en océanographie.....	40
➤ Noverlap.....	41
➤ La fenêtre Hamming.....	41
III.3. Le logiciel Matlab.....	41
III.3.1. Définition et utilité.....	41
III.3.2 Espace de travail dans Matlab.....	42
III.4. La méthodologie utilisée dans notre étude.....	46
III.4.1. Analyse d'un signal du niveau de la mer.....	46
➤ Choix de la région et de la période de mesure.....	46
➤ Présentation des données marégraphiques.....	47
III.2.4. La procédure utilisée dans Matlab.....	48

➤ Langage de programmation Matlab.....	49
➤ Qu'est -ce que la fenêtre Hann.....	50
III.5. Filtrage numérique du signal du niveau de la mer.....	53
III.5.1. Filtre bande passante.....	54

## **Chapitre VI : Résultats et Discussions**

VI.1. signal temporel brut du niveau de la mer entre le 01/10/2011 à 31/12/2011.....	56
VI.1.1. Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global entre le 01/10/11/12 à 31/12/2011.....	57
VI.1.2 Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel.....	58
a. Résultat du Filtre band pass entre 4h et 24h.....	58
b. Filtre band pass entre 2 min et 3h.....	60
VI.2. Signal brut temporel du niveau de la mer durant la période entre le 14/02/2012 à 14/03/2012.....	60
VI.2.1 Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global.....	61
VI.2.2 Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel entre le 14/02/2012 et 10/04/2012.....	62
a. Filtre band pass entre 2 min et 3h.....	62
b. Filtre band pass entre 4h et 24h.....	63
VI.3 Signal brut temporel du niveau de la mer durant la période entre le 01/10/11/12 à 31/12/2011.....	64
VI.3.1 Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global entre le 01/03/2012 à 30/04/2012.....	65
VI.3.2 Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel entre le 01/03/2012 et 30/04/2013.....	66
a. Filtre band pass entre 4h et 24h.....	66
b. Filtre band pass entre 2min et 3h.....	68
VI.4 Signal brut temporel du niveau de la mer durant la période entre le 01/01/2013 à 28/02/2013.....	69
VI.4.1 Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global (entre le 01/1/2013 et 28/2/2013).....	70
VI.4.2 Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel entre le 01/01/2013 et 28/02/2013.....	71
a. Filtre band pass entre 2min et 3h.....	71
b. Filtre band pass entre 4h et 24h.....	72
VI.5. Signal brut temporel entre 01/05/2013 et 31/05/2013 au niveau de la baie d'Alger.....	73
VI.5.1. Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global (durant le mois de Mai 2013).....	74
VI.5.2 Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel allant du 01/05/2013 et 31/05/2013.....	75
a. Résultat du filtre opéré entre 2 min et 3h.....	75
b. Résultat du filtre opéré entre 4h et 24h.....	76
<b>Conclusion.....</b>	<b>77</b>

## **Références bibliographiques**

## **Annexes**

## Liste des figures

---

<b>Figure 1.</b> Les facteurs principaux des variations du niveau de la mer et leurs échelles Spatio-temporelles associées, d'après).....	6
<b>Figure 2.</b> Evolution temporelle du niveau de la mer depuis 600 millions d'années....	6
<b>Figure 3.</b> Evolution temporelle de la vitesse d'élévation du niveau de la mer depuis 6000 ans.....	7
<b>Figure 4.</b> Diagramme comparant les contributions climatiques à l'élévation du niveau de la mer au XX <sup>ème</sup> siècle et les observations marégraphiques.....	8
<b>Figure 5.</b> Principe de la mesure altimétrique.....	11
<b>Figure 6.</b> Circulation des vents géostrophiques autour d'un système dépressionnaire dans l'hémisphère nord.....	14
<b>Figure 7.</b> Schéma illustrant les différents paramètres entrant en compte dans l'estimation des niveaux d'eau extrêmes.....	16
<b>Figure 8.</b> Effets de la force d'attraction sur les masses d'eau.....	17
<b>Figure 9.</b> La force centrifuge.....	18
<b>Figure 10.</b> La force génératrice de la marée.....	19
<b>Figure 11.</b> Formation des surcotes et décotes barométriques.....	20
<b>Figure 12.</b> Action des vents d'afflux et des vents de reflux.....	21
<b>Figure 13.</b> Situation géographique de la baie d'Alger.....	23
<b>Figure 14.</b> Carte bathymétrique de la baie d'Alger.....	24
<b>Figure 15.</b> La carte géologique de la baie d'Alger et de sa région.....	25
<b>Figure 16.</b> Les roses des vents dans la baie d'Alger.....	28
<b>Figure 17.</b> Bilan des courants de dérive et dynamique sédimentaire dans la baie d'Alger.....	31
<b>Figure 18.</b> La circulation de l'eau dans le bassin Algérien.....	32
<b>Figure 19.</b> Présentation de fenêtre de commande (command window).....	43
<b>Figure 20.</b> Présentation de fenêtre d'Editor (Edit Window).....	44
<b>Figure 21.</b> Présentation de fenêtre d'Editor avec la commande plot.....	45
<b>Figure 22.</b> Présentation d'un plot (figure window).....	45
<b>Figure 23.</b> Site marégraphique d'Alger.....	46
<b>Figure 24.</b> Présentation de l'emplacement des fichiers de MATLAB.....	48
<b>Figure 25.</b> Présentation du code dans la fenêtre d'editor.....	52
<b>Figure 26.</b> Présentation du code dans la fenêtre Commande.....	53

## Liste des figures

---

<b>Figure 27.</b> Signal temporel brut prélevé entre 01/10/2011 et 31/12/2011 au niveau de la baie d'Alger.....	56
<b>Figure 28.</b> La Densité spectrale de puissance des fréquences entre le 01/10/2011 et 31/12/2011.....	57
<b>Figure 29.</b> Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h pour la période entre le 01/10/2011 et 31/12/2011.....	58
<b>Figure 30.</b> Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h pour la période entre le 01/10/2011 et 31/12/2011.....	59
<b>Figure 31.</b> Résultats du filtre band pass entre 2 min et 3h de la période entre le 01/10/2011 et 31/12/2011.....	60
<b>Figure 32.</b> Signal brut temporel entre le 14/02/2012 et 10/04/2012 au niveau de la baie d'Alger.....	60
<b>Figure 33.</b> La Densité spectrale de puissance des fréquences entre le 14/02/2012 et 10/04/2012.....	61
<b>Figure 34.</b> Résultats du filtre band pass entre 2min et 3h pour la période entre le 14/02/2012 et 10/04/2012.....	62
<b>Figure 35.</b> Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h pour la période entre le 14/02/2012 et 10/04/2012.....	63
<b>Figure 36.</b> Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h pour la période entre le 14/02/2012 et 10/04/2012.....	64
<b>Figure 37.</b> Signal temporel du niveau de la mer entre le 01/03/2012 et 30/04/2012..	65
<b>Figure 38.</b> La Densité spectrale de puissance des fréquences entre le 01/03/2012 et 30/04/2013.....	65
<b>Figure 39.</b> Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre le 01/03/2012 et 30/04/2012.....	66
<b>Figure 40.</b> Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre le 01/03/2012 et 30/04/2012.....	67
<b>Figure 41.</b> Résultats du filtre band pass entre 2min et 3h de la période entre le 01/03/2012 et 30/04/2012.....	68
<b>Figure 42.</b> Signal temporel but entre le 01/1/2013 et 28/02/2013 au niveau de la baie d'Alger.....	69
<b>Figure 43.</b> La Densité spectrale de puissance des fréquences entre le 01/01/2013 et 28/02/2013.....	70

## Liste des figures :

---

<b>Figure 44.</b> Résultats du filtre band pass entre 2min et 3h pour la période entre le 01/05/2013 et 31/05/2013.....	71
<b>Figure 45.</b> Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre le 01/01/2013 et 28/02/2013.....	72
<b>Figure 46.</b> Signal brut temporel entre 01/05/2013 et 31/05/2013 au niveau de la baie d'Alger.....	73
<b>Figure 47.</b> La densité spectrale de puissance des fréquences entre le 01/05/2013 et 31/05/2013.....	74
<b>Figure 48.</b> Résultats du filtre band pass entre 2min et 3h pour la période entre le 01/05/2013 et 31/05/2013.....	75
<b>Figure 49.</b> Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h pour la période entre le 01/105/2013 et 31/05/2013.....	76

## Liste des tableaux :

---

<b>Tableau 1.</b> Estimations récentes de la hausse observée du niveau marin au cours du XX <sup>ème</sup> siècle, basées sur l'analyse des données marégraphiques.....	10
<b>Tableau 2.</b> Impacts estimés de quelques événements historiques de surcotes de tempêtes.....	20
<b>Tableau 3.</b> Répartition annuelle des fréquences d'apparition par direction des vents (en%).....	29
<b>Tableau 4.</b> Période de mesure des données marégraphiques retenue.....	47
<b>Tableau 5.</b> Le domaine d'utilisation des différentes fenêtres de pondération.....	51

## Liste des abréviations

---

**FFT** : La transformé de Fourier rapide

**Nfft** : Nombre de point de la transformé de Fourier rapide

**Fe** : Fréquence d'échantillonnage

**F max** : Fréquence maximale

**TFD** : La transformé de Fourier discret

**PWELCH** : Périodogramme de Welch

**Pxx** : Le spectre de Pwelch

**PSD** : La densité spectrale de puissance

**ESD** : La densité spectrale d'énergie

**W** : La fenêtre de pondération

**X** : La longueur de vecteur utilisé

**n** : Nombre d'échantillons

# **Introduction**

A l'échelle d'une vie humaine, le niveau moyen de la mer apparaît comme fixe. C'est d'ailleurs lui qui sert de référence pour mesurer l'altitude des reliefs des continents ou la profondeur des océans (**Paskoff, 1993**). Cependant, la simple observation de la mer montre que la hauteur du plan d'eau est variable. L'élévation soudaine du niveau de la mer est un phénomène qui se distingue de l'élévation contemporaine du niveau de la mer qui résulte d'une conjonction de facteurs naturels dans le contexte actuel de changement climatique.

Si la première est visible à court terme (de quelques heures à quelques jours), la seconde nécessite des dizaines d'années pour sa mise en évidence.

En effet, l'élévation soudaine du niveau de la mer englobe toutes les ondes marines de basse fréquence ( $f < \text{min}^{-1}$ ) qui pourraient être générées aussi bien par des phénomènes météorologiques et sismiques que par la force induite par les astres qui environnent notre planète.

En effet, même quand elle semble stable, la mer est en perpétuel mouvement. et en raison de la basse fréquence ( $f < \text{min}^{-1}$ ) de certaines oscillations de la mer, il est généralement très difficile d'observer certaines oscillations de la mer comme la marée et les seiches, sauf si l'observateur reste concentré pendant un moment considérable (des minutes voire des heures) sur le niveau de la mer au rivage. Cependant, d'autres ondulations de haute fréquence ( $f > \text{min}^{-1}$ ) comme les vagues et la houle sont facilement perceptibles à l'œil humain.

En ce qui concerne les côtes microtidales (marnage  $< 2\text{m}$ ), comme les côtes méditerranéennes, il a été souvent considéré que le risque lié à la l'élévation soudaine du niveau de la mer est minimisé en raison de la hauteur faible des oscillations tidales. Cependant, plusieurs études ont montré que les côtes méditerranéennes sont l'endroit où le phénomène de l'élévation soudaine du niveau de la mer est fréquemment observé (**Rabinovich et Monserrat., 1995 ; Monserrat et al, 2006 ; Drago, 2009 ; Sepic et al, 2009**).

L'élévation soudaine du niveau de la mer pourrait être induite par des tsunamis qui sont des vagues ayant des périodes de quelques minutes à 2-3h (**Gourious, 2012**). Ces ondes marines de basse fréquence peuvent être induites par différentes sources d'excitation comme les séismes, les éboulements côtiers ou sous-marins, les éruptions

volcaniques, etc. aussi, d'autres vagues marines appelées par la communauté scientifique « météotsunamis » (Defant, 1961 ; Rabinovich, 2009) et ayant des caractéristiques physiques (fréquences) semblables à celles des tsunamis peuvent exister dans le signal brut du niveau de la mer si la morphologie de ces vagues ressemble à celle des tsunamis, les météotsunamis sont uniquement induits par les perturbations atmosphériques.

Au large les météotsunamis, ont des hauteurs centimétriques. Cependant, à l'intérieur des baies et des ports, ces ondes marines peuvent rentrer en résonance avec la fréquence propre des ports et des baies pour générer les seiches (ondes très dangereuses à l'intérieur des ports). Par conséquent les baies et les ports sont des facteurs pouvant amplifier les météotsunamis. Il est aussi très important de rappeler qu'à la cote, notamment sur les côtes basses, les ondes de basses fréquences peuvent amplifier l'effet du *run up* due au déferlement des vagues sur la côte.

L'objectif de notre travail est de contribuer à comprendre le phénomène de la hausse soudaine du niveau de la mer ainsi déterminer les différentes ondes marines contenus dans un signal du niveau de la mer. Aussi pour une meilleure compréhension de ces phénomènes, on peut chercher à déterminer leurs caractéristiques (amplitude et période) en tant que phénomène oscillatoire. Les signaux de différentes durées ont pu être analysés.

Pour cette étude, nous privilégions une approche méthodologique basée sur l'analyse fréquentielle des signaux du niveau de la mer en utilisant deux logiciels optimisés pour ce type de traitement (MATLAB et SIGVIEW).

Notre présent travail est constitué de quatre chapitres :

**Le chapitre I** est consacré à la définition des différentes oscillations que peut comprendre le niveau brut de la mer

**Le chapitre II** est destiné à la description de la zone d'étude, il consiste en une reconnaissance du site et de son environnement.

**Le chapitre III** est réservée à la méthodologie appliquée pour l'auscultation du niveau de la mer mesuré par le marégraphe numérique installé dans le port d'Alger.

## **Introduction générale**

---

**Le chapitre VI** comprend les résultats des différentes analyses et traitements des signaux et leur interprétation ;

Et enfin nous concluons notre travail par une conclusion sur l'importance de l'installation des marégraphes numériques le long de la côte algérienne en vue de surveiller les risques liés à l'élévation soudaine du niveau de la mer.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le niveau de la mer**

## I.1. Définition du niveau de la mer

Le niveau de la mer est la hauteur de la surface de la mer à une référence donnée. Les variations du niveau de la mer sont appelées absolues ou relatives selon le cadre dans lequel (inertiels ou terrestre) elles sont exprimées (**Cazenave, 2009**).

Les variations absolues du niveau de la mer représentent généralement le changement du volume de l'eau dans les bassins océaniques (que ce soit en raison du changement de la densité de l'eau, changement ou variation de la masse de l'eau), tandis que les variations du niveau marin relatif désignent les changements de hauteur de la mer par rapport au sol (représentant ainsi les deux variations du niveau de la mer absolues ainsi les mouvements du sol).

## I.2. Mesures du niveau de la mer

### I.2.1. Pourquoi mesurer le niveau de la mer ?

Depuis plusieurs siècles déjà, les premières observations du niveau de la mer ont été effectuées. En effet, les peuples anciens et dans de nombreux pays ont pu attribuer les mouvements réguliers de la mer à l'action de la lune et du soleil sur la terre. Mais il fallut attendre les travaux réalisés par Jean-Félix Picard et Philippe de La Hire en 1927, puisque ils étaient les premières mesures systématiques publiées dans ce domaine.

Ces travaux ont été suivis par d'autres dont le but est de décrire et développer les mécanismes de génération de la marée (**Cartwright, 1999 ; Woodworth, 2010**). Mais, la question qui se pose est la suivante : à quoi servent ces observations ? Et pourquoi continuer à mesurer le niveau de la mer ? En effet, les premières mesures du niveau de la mer sont venues pour répondre aux besoins de la navigation côtière et de l'accès dans les ports à fort marnage. Ainsi, d'autres principales applications peuvent être citées (**Simon, 2007**).

- L'élaboration des cartes marines afin d'apporter des corrections de la marée sur les sondages bathymétriques ;
- Les mesures de prédiction pour la réalisation des annuaires de la marée (**Nicolle & Karpytchev, 2007**) ;
- La mise en place de réseaux de prévision, de vigilance et d'alerte pour les événements extrêmes naturels à savoir les ondes de tempêtes, tsunamis et les vagues de submersion) (**Courteau, 2007**) ;
- le contrôle et la validation des mesures des altimètres radars embarqués sur satellite (**Chambers et al. 1998; Leuliette et al, 2004**). De même, les études portant sur l'aménagement des infrastructures portuaires, des ouvrages côtiers, des plates-formes pétrolières ou encore l'établissement des Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR), ont en commun le besoin de connaître les niveaux maximum et/ou minimum susceptibles d'être atteints par la mer sur de très longues périodes (le siècle si possible) (**Simon, 2008**) ;

- Enfin, le niveau de la mer est un bon indicateur du phénomène des changements climatiques et de leurs effets associés tels que la fonte des glaces, que ce soit les calottes glaciaires ou les glaciers terrestres (**Church *et al.*, 2008**). L'importance de cet indicateur est confirmée par l'impact direct de tels changements climatiques sur les populations côtières (**Nicholls & Cazenave, 2010**).

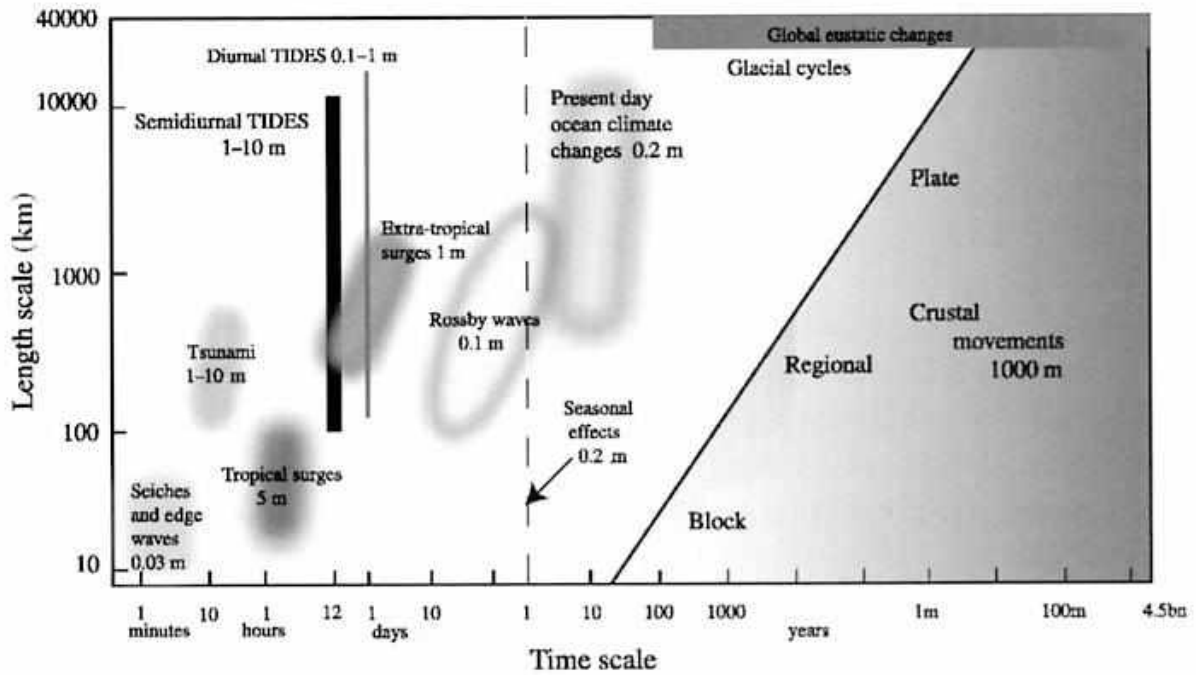
### I.3. Les variations du niveau de la mer

#### I.3.1. Les différentes échelles spatio-temporelles

Durant l'histoire de notre planète, le niveau de la mer et leur changement sont deux termes (concepts) indissociables en relation avec les fluctuations du climat. au moins pour les échelles de temps courtes ou moyennes (inférieures au million d'années). Avant de nous focaliser sur l'échelle humaine qui semble très intéressant dans notre travail, il est primordiale de rappeler que la terre est un système dynamique, plutôt c'est un siège de fortes interactions (géologiques, fluctuations hydrologiques du système « terre et le niveau de la mer » (**Liovel, 2010**).

Cependant, l'accentuation des phénomènes relatifs au réchauffement climatique observés à l'échelle mondiale depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle est principalement provoquer par l'action anthropique. les conséquences de ce réchauffement global en relation avec l'élévation du niveau de la mer sont potentiellement inquiétantes en vue de nombre importants des populations demeurant les zones côtières vulnérables (**Lombard, 2005**).

En fait, le niveau de la mer est généralement affecté par nombreux processus intervenant sur de multiples échelles spatio-temporelles : chaque jour on observe les marées, phénomènes d'origine astronomique ayant des amplitudes varient d'une région à l'autre. En revanche, et pour des périodes de temps qui varient de 1 million à 100 millions d'années ce qui correspond à des échelles géologiques, ce sont les mouvements tectoniques qui agissent sur la forme des bassins océaniques provoquant la modification du niveau de la mer à l'échelle globale. La figure n°1 résume les principaux facteurs qui interviennent au processus de la variation du niveau de la mer (**Pugh, 2004**).



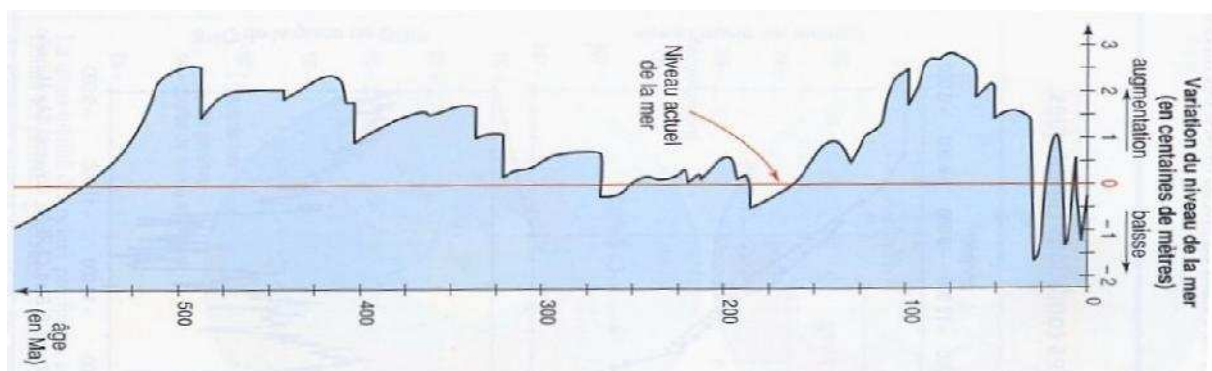
**Figure 1.** Les facteurs principaux des variations du niveau de la mer et leurs échelles Spatio-temporelles associées, d'après Pugh (2004)

### I.3.1.1. Les variations du niveau de la mer au cours des temps géologiques

Sur des échelles de temps géologiques, différentes facteurs ont contribué à la modification et au contrôle de la forme des bassins océaniques, agissant directement sur les variations du niveau de la mer. Généralement, ces facteurs dus principalement à l'activité tectonique de la terre à savoir ; la subduction de plaques océaniques, la collision des continents, l'apparition de nouveaux océans et la formation des dorsales océaniques (**Lombard, 2005**).

Les différentes variations des lignes de rivage enregistrées par les marges continentales sont considérées comme de bons indicateurs de la variation du niveau de la mer.

Afin de reconstruire les variations passées du niveau de la mer, plusieurs études ont été effectuées, tel que l'étude réalisé par (**Vail et al, 1977**), basée sur l'analyse des roches sédimentaires. Ces études ont montré que le niveau de la mer à beaucoup évolué en relation avec les cycles sédimentaires consécutifs (figure n°2).



**Figure 2.** Evolution temporelle du niveau de la mer depuis 600 millions d'années, d'après Vail et al. (1977).

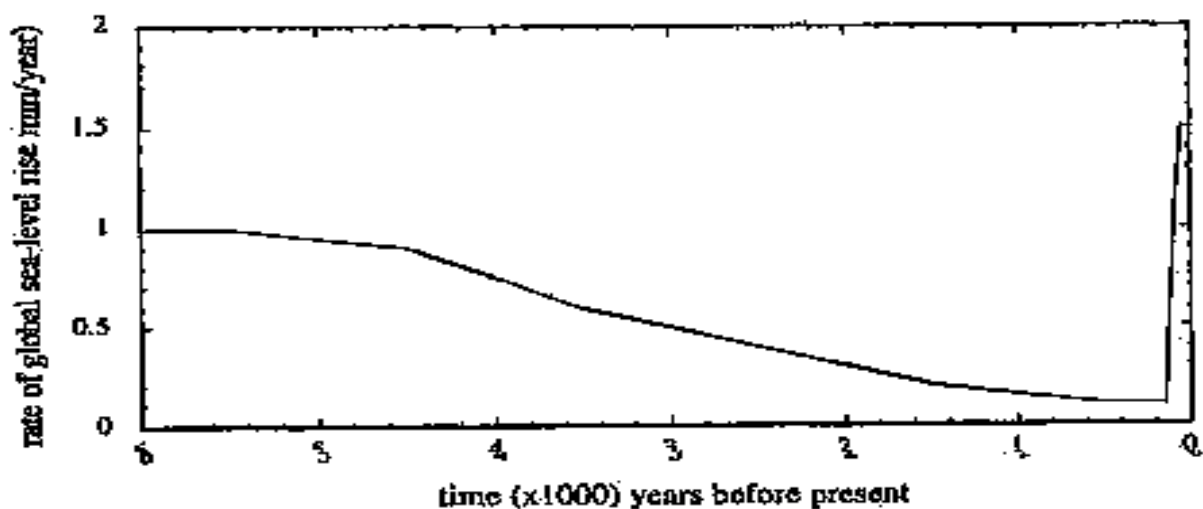
### I.3.1.2. Cycles glaciaires-interglaciaires du Quaternaire

Sur des échelles temporelles comprises entre quelques milliers d'années et plusieurs centaines de milliers d'années, les différentes variations qui affectent le niveau de la mer sont principalement gouvernées par les échanges de masses d'eaux entre les continents et les océans, plus particulièrement les variations de volume des glaces continentales liées aux variations de la température de l'atmosphère intimement liées à celles de l'insolation solaire reçue dans les régions de haute latitude au cours de l'année (**Milankovitch, 1938**).

Au cours du quaternaire (il y a déjà environ deux millions d'années), les scientifiques dénombrent 17 cycles glaciaires et interglaciaires, liées à des périodes froides (hémisphère nord englacé et donc le niveau de la mer set bas), et des périodes chaudes similaires aux conditions actuelles.

Depuis environ 20000 ans, ce qui correspond au dernier maximum glaciaire du quaternaire, les études réalisées, ont montré que le niveau de la mer était 120 mètres plus bas qu'aujourd'hui (**Fleming et al, 1998**).

Au cours des derniers 1 000 ans et avant le XX<sup>ème</sup> siècle, les variations du niveau de la mer sont principalement associées aux changements climatiques que soit d'origine naturels ou anthropiques, plusieurs auteurs (**Lambeck and Bard, 2000 ; Lambeck, 2002**), ont estimé que ces variations sont de l'ordre de 0,2 mm/ an (figure n°3).



**Figure 3.** Evolution temporelle de la vitesse d'élévation du niveau de la mer depuis 6000 ans, d'après Lambeck (2004).

### I.3.1.3. Les variations récentes du niveau de la mer : Le XX<sup>ème</sup> siècle

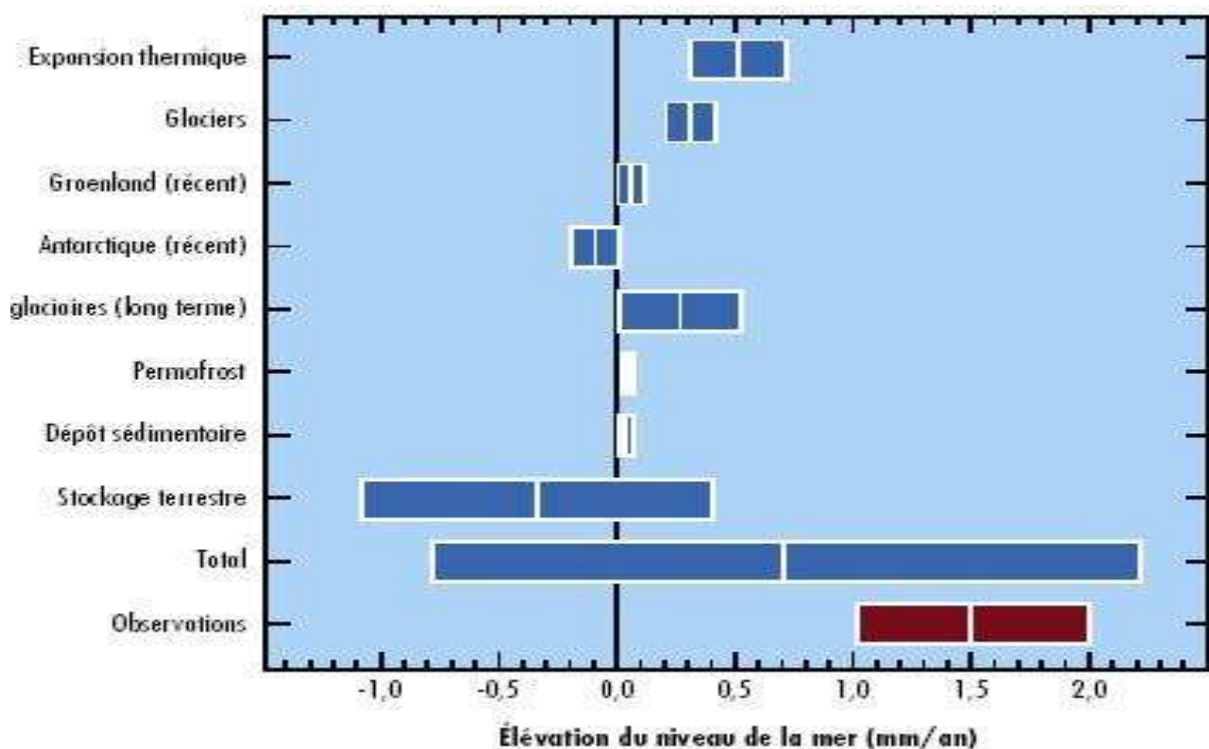
Pour le 20<sup>ème</sup> siècle, et grâce aux importants moyens d'observation du niveau de la mer, des analyses récentes basées sur les données mesurées à l'aide des marégraphes, révèlent une élévation du niveau de la mer d'environ 1,5 à 2 mm/ an (largement supérieure à celle enregistrée au cours des temps géologiques (**Douglas, 2001 ; Church et al, 2004 ; Holgate et Woodworth, 2004**). Cette élévation de 15 à 20 cm pour un siècle est 10 fois supérieure à celle observée lors des siècles précédents.

#### I.4. Les principales causes des variations du niveau de la mer sur des échelles de temps de la décennie au siècle

Pour des périodes allant de quelques années à plusieurs décennies, les variations du niveau de la mer à l'échelle globale sont principalement expliquées par deux processus majeurs :

- La dilatation thermique de l'océan provoqué par les variations de la température et de la salinité. En effet, ces variations génèrent une variabilité régionale importante du niveau de la mer à voir un effet négligeable à l'échelle globale (**Lombard, 2005**) ;
- Les apports d'eau douce à l'océan engendrés par la fonte des calottes polaires et des glaciers de montagnes ; ces apports constituent un réservoir important contribuant à la hausse observé du niveau marin depuis plusieurs années maintenant (**Lemke et al, 2007**).

Une étude récente réalisée par (**Church et al ,2001**) pour l'estimation des différentes contributions climatiques à la hausse du niveau marin mesurée par les marégraphes (entre 1 mm/an et 2 mm/an) pendant le XX<sup>ème</sup> siècle a montré que la somme de ces contributions à l'élévation du niveau de la mer du XX<sup>ème</sup> siècle est estimée à 0.7 mm/an (figure n°4).



**Figure 4.** Diagramme comparant les contributions climatiques à l'élévation du niveau de la mer au XX<sup>ème</sup> siècle et les observations marégraphiques (d'après IPCC, Church et al. 2001).

### I.5. Les conséquences de l'élévation actuelle du niveau de la mer

Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine de la hausse du niveau de la mer en zone côtière ; ces phénomènes peuvent être regroupés en trois catégories (**Nichollas et Leatherman, 1994**) :

- aggravation de la submersion des côtes basses ;
- accélération de l'érosion des plages et des falaises ;
- salinisation accrue des aquifères et des eaux de surface.

Cependant, les inondations permanentes liées à la hausse du niveau marin constituent une grande menace pour les littoraux bas, ces régions vulnérables sont aussi des zones fertiles et donc souvent très densément peuplées (**Downs et al, 1994**). En réalité, l'ampleur des dégâts socio-économiques générés par les inondations dans ces régions est très inquiétante. Outre plusieurs millions de personnes déplacées, les pertes économiques causées par la disparition ou le ralentissement des activités agricoles et maritimes risquent de poser de véritables problèmes (**Nicholls et Leatherman, 1994**).

### I.6. Les moyens d'observation actuels du niveau de la mer

Pour cette période de temps, les moyens d'observation du niveau de la mer sont principalement limités à deux grandes catégories : les marégraphes et les altimètres spatiaux.

Les marégraphes sont utilisés il y a environ un siècle, assurant la mesure des variations du niveau de la mer d'une façon permanente. Embarqués à la côte, ces appareils fournissent la mesure du niveau de la mer relative à la croute terrestre.

Depuis environ 17 ans maintenant, les satellites altimètres fournissent directement des mesures absolues du niveau de la mer avec une précision de quelques dixièmes de mm/an et une couverture quasi complète du domaine océanique (**Lombard, 2005**).

En effet, les données historiques du niveau de la mer mesurées à l'aide des marégraphes sont principalement destinées à l'évaluation de la hausse du niveau marin au cours du siècle passé.

Rappelons que les premières mesures effectuées par les marégraphes remontent au 18<sup>ème</sup> siècle, fournissant de longues séries temporelles afin d'estimer les fluctuations séculaires du niveau de la mer (**Woppelman, 1997**).

Malheureusement, une vingtaine de stations seulement fournissent des données au cours du XX<sup>ème</sup> siècle et ces dernières sont situées principalement dans l'hémisphère nord le long des côtes d'Europe et d'Amérique du Nord (d'où, une résolution spatiale des données marégraphiques très limitée) (**Lombard, 2005 ; Liovel, 2010**).

### I.6.1. Principe de la mesure marégraphique : mesure du niveau de la mer relatif

Les premières mesures étaient réalisées à l'aide d'un outil appelé l'échelle de marée ; simple mire graduée en bois fixée à un quai. Dès le XIX<sup>ème</sup> siècle, des nouveaux moyens ont été développés ; les marégraphes mécaniques à flotteur : leur principe repose sur le simple déplacement du flotteur dans un puits de tranquillisation pour filtrer les oscillations de courtes périodes de la surface de la mer (**Liovel, 2010**), par la suite les mouvements verticaux seront transmettre par un système mécanique à un stylo pour les enregistrer analogiquement sur un rouleau de papier nommé « marégramme ».

Maintenant, il existe des marégraphes très modernisés (marégraphe à ultra sons, à pression) qui mesurent le niveau instantané de la mer par rapport à une référence local, Cette référence locale est définie par rapport à des repères matériels au voisinage immédiat du socle de l'instrument, appelé repère de marée. Ce repère assure la cohérence des mesures du niveau de la mer, car la continuité de l'enregistrement marégraphique est un facteur très important pour l'étude des variations à long terme du niveau de la mer.

Le tableau ci-dessous résume les études récentes effectuées à partir des données récoltées par les marégraphes afin d'estimer l'élévation séculaire du niveau de la mer.

**Tableau 1.** Estimations récentes de la hausse observée du niveau marin au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, basées sur l'analyse des données marégraphiques (d'après, **Woppelmann et al, 2009**).

Auteurs	Tendance (mm/an)	période
<i>Church et al. [2001]</i>	1 – 2	20 <sup>ème</sup> siècle
<i>Peltier [2001]</i>	1.84 +/- 0.35	20 <sup>ème</sup> siècle
<i>Douglas [2001]</i>	1.71 +/- 0.5	20 <sup>ème</sup> siècle
<i>Douglas and Peltier [2002]</i>	1.5 – 2	20 <sup>ème</sup> siècle
<i>Jevrejeva et al. [2006]</i>	1.8	20 <sup>ème</sup> siècle
<i>Woppelmann et al. [2009]</i>	1.61 +/- 0.19	20 <sup>ème</sup> siècle

### I.6.2. L'altimétrie spatiale : observations synoptiques à haute précision du niveau de la mer

Depuis environ vingtaine d'années, et avec la succession des missions altimétriques à haute précision dont principalement Topex /Poséidon (lancé en août 1992), Jason-1 et Jason-2 (lancées successivement en 2001 et 2008), il est possible maintenant de mesurer la hauteur du surface de la mer avec une grande précision de l'ordre de 1 à 2 cm

#### I.6.2.1. Principe de la mesure altimétrique: mesure du niveau de la mer absolu

Le principe repose sur l'émission d'un signal en direction de la terre et la récupération d'un écho réfléchi par la surface de la mer à l'aide d'un radar altimètre embarqué à bord d'un satellite. Ensuite, l'analyse de l'écho permet de calculer avec une grande précision le temps de trajet aller-retour entre le satellite et la surface de la mer, mais aussi la hauteur de vagues et la vitesse du vent (figure n°5). L'objectif essentiel est de mesurer le niveau de la mer par rapport à une référence terrestre (Nerem et Mitchum, 2001 ; Cazenave et Nerem, 2004 ; Leuliette et al., 2004).

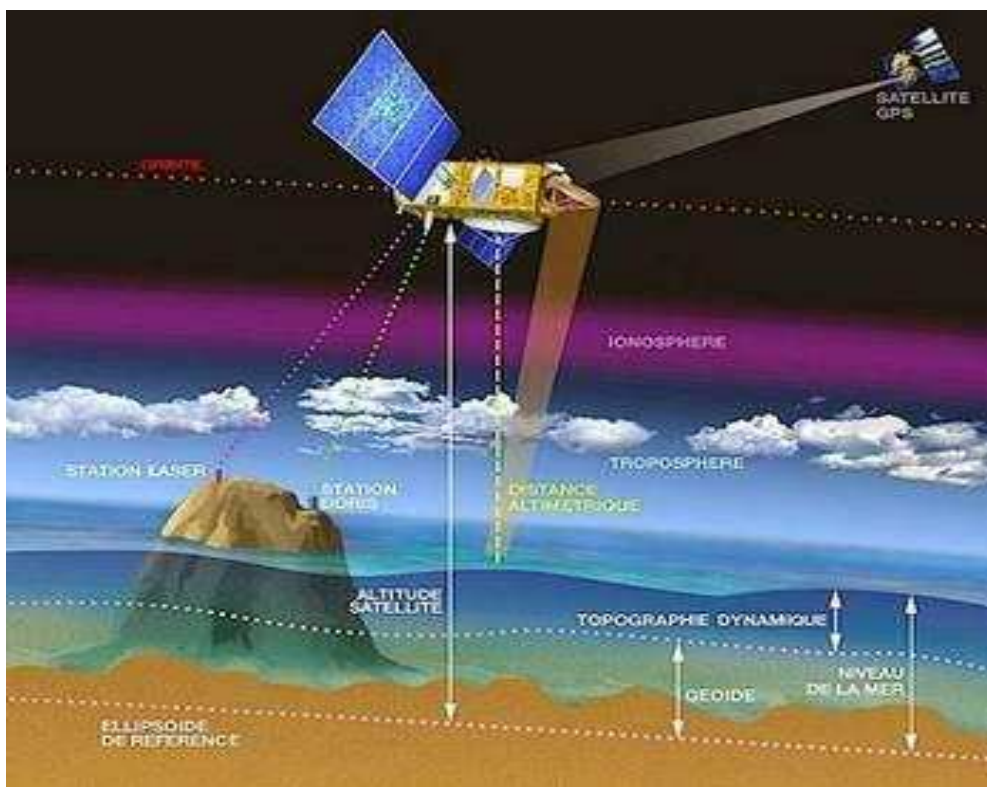


Figure 5. Principe de la mesure altimétrique (Liovel, 2010)

### 1.7. Variations à court terme et périodique du niveau de la mer :

La surface de la mer et des océans est toujours agitée, alors que cette agitation se manifeste par des mouvements aléatoires ou périodiques, de grande période de l'ordre d'une demi-journée ou une journée : les marées, et sous forme de phénomènes de courte période à savoir : les vagues, les houles, les seiches (Woppelman, 1997).

En réalité, la surface de la mer est soumise en permanence à des effets planétaires (attraction de la lune et de soleil) ce qui génère des ondulations très lentes nommées : les marées astronomiques, d'autres conditions atmosphériques (vent, pression) peuvent être à l'origine des ondulations caractérisées par leur amplitude, leur période ainsi que leur longueur d'onde (**Grasso, 2009**).

### 1.7.1. Types d'ondes :

Le frottement du vent exercé sur la surface de la mer provoque une agitation de la surface et par conséquent la formation des ondulations dont les caractères dépendent de l'intensité, de la durée et de la distance sur laquelle souffle le vent « Fetch », la mer du vent est considérée comme la superposition de nombreux ondes sinusoïdales formant des ondes appelées « irrégulières ou réelles » (**Kraus, 2005 ; Grasso et al, 2009**).

En effet, des phénomènes comme les dépressions peuvent être à l'origine de la hausse locale de la surface de l'océan, en provoquant la formation des ondulations dont la période est plus élevée par rapport à celles engendrées par le vent ; par la suite et sous l'effet de la pression atmosphérique ces ondes se propagent, c'est le cas des ondes dites « gravitaires » (**Thornton et al, 2000**). Encore et par une séquence d'arrangement aléatoires très rare, de nombreux vagues peuvent se combiner pour former des vagues dont la hauteur est considérable, dites « vagues scélérates » caractérisées par leur imprévisibilités, ce qui les rend très dangereuses pour les navigateurs (**Grasso, 2009**).

Généralement le caractère d'irrégularité des vagues est à l'origine de la génération des groupes de vagues nommés «paquet », caractérisées par une enveloppe de vagues incidentes ressemble à une onde dont la période est d'ordre de 100 secondes (**Grasso, 2009**). Au moment de déferlement des vagues, le niveau moyen est plus important en présence de gros (paquet de vagues). Ces variations du niveau moyen à la fréquence des groupes de vagues influent sur la surface de la mer et génèrent des ondes de basse fréquence appelées ondes infragravitaires (**Symonds et al, 1982**). Le domaine infragravitaire est généralement caractérisé par les ondes de basse fréquence, par contre le domaine gravitaire regroupe des ondes courtes (**Higgins et Stewart, 1962**).

- **La houle**

Représente des ondulations qui évoluent en dehors de la zone de génération par le vent, sous forme d'une série indéfinie parallèles et presque identiques, elles se propagent d'une façon plus ou moins sensible vers le rivage (**Grasso, 2005**). Cependant, les variations qui affectent la hauteur de la houle peuvent avoir un effet marquant sur le niveau de la mer, provoquant une hausse du niveau marin à l'approche du rivage, notamment cette surélévation peut être en fonction de différents facteurs tels que, la bathymétrie et l'amplitude de la houle (**Castelle, 2004**).

- **Seiches**

Dans un port, un bassin ou un lac, les seiches sont considérées comme des oscillations stationnaires générées à cause d'un mécanisme d'excitation et amplifiées selon la forme des plans d'eaux. En général, la période de ces événements dépend de la période des plans d'eaux. Parmi les phénomènes d'excitation possibles on peut citer :

Les phénomènes météorologiques tels que les vents violents (rafales).

Les tsunamis engendrés par les séismes.

Les phénomènes de basse fréquence (battement de déferlement).

Les seiches ont des périodes de 12 à 40 minutes et des fréquences inférieures à 0,01 Hz. Outre les ports, les plans d'eaux fermés (tels que les lacs les mers fermées) peuvent être le siège de génération des seiches (**Wilson, 1972 ; Pean et Rymple, 1991**).

- **Marées**

Les marées sont engendrées essentiellement par des forces astronomiques (attraction de la lune et du soleil), ce qui permet la prévision précise des marées ainsi les courants associées (**Pugh, 1987**). Dans la mesure où les marées sont des ondes longues les phénomènes de résonance (seiches) et les effets de shoaling (levé, gonflement) induits par la géographie et la bathymétrie peuvent générer une amplification importante des niveaux des marées dans les mers peu profondes et les baies (**Simon, 2005**).

En effet, la marée est considérée comme étant le signal le plus important dans un enregistrement marégraphique, à cause de sa facilité à être distinguée, en raison de ses périodes plutôt bien définies. Cependant, l'amplitude de la marée se diffère d'une région à l'autre en fonction de la profondeur et des dimensions des bassins océaniques (**Grasso et al, 2007**).

- **Tsunamis**

Il s'agit d'une série d'ondes provoquées par un déplacement d'une très importante masse d'eau généralement d'origine sismique. Ce mouvement peut être aussi généré par d'autres phénomènes tels que : un glissement de terrain sous marins, une éruption volcanique sous marine, des explosions ou même un impact météorique (**Gourious, 2012**).

Bien que la vitesse d'un tsunami puisse atteindre 800 km/h quand le fond de l'océan est profond, sa longueur d'onde peut dépasser 100 km et sa période peut varier de quelques minutes à plus d'une heure. La hauteur d'un tsunami est généralement faible au large (1m), mais en se rapprochant de la côte cette hauteur devient très importante et peut atteindre 10m (30 m dans les cas extrêmes). Ces phénomènes sont capables de causer des sérieux dégâts matériels et d'importantes pertes humaines (**Marrifield, 2005**). La capacité de prévenir un tsunami dépend de multiples paramètres ; particulièrement l'acquisition des données sismiques, mais encore la disponibilité d'un réseau de marégraphes pour surveiller la

propagation de l'onde, afin d'estimer le temps exact d'arrivée de cette onde sur une côte éloignée et encore sur d'autres régions sujettes à ce phénomène (**Gouriou, 2012**).

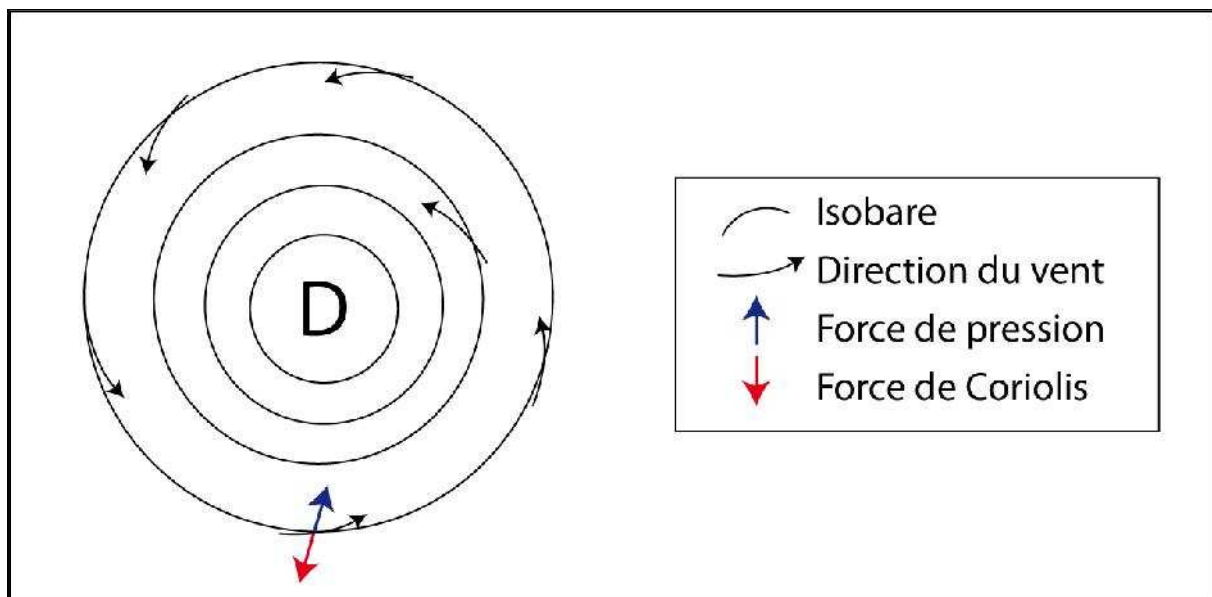
### I.8. Les submersions marines

Les submersions marines sont essentiellement provoquées par le passage des tempêtes près de la côte. Les conditions météo-marines à l'origine de ces perturbations atmosphériques provoquent l'élévation temporaire des masses d'eau à la côte et donc génèrent des niveaux d'eaux extrêmes (**Besson, 1991**).

#### I.8.1. Les tempête

**Tabeau et al (2009)** ont défini les tempêtes comme étant une dépression qui peut générer un vent moyen d'une vitesse de 80 km/h. Ces dépressions atmosphériques correspondent en réalité à des zones de faible pression atmosphérique donnant naissance aux forts vents. Dans l'hémisphère nord, les vents géostrophiques soufflent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour du centre dépressionnaire (Figure n°6).

Dans l'hémisphère nord, le régime de circulation des vents géostrophique est conditionné par le gradient de pression et la force de coriolis.



**Figure 6.** Circulation des vents géostrophiques autour d'un système dépressionnaire dans l'hémisphère nord (**Cariolet, 2011**).

#### I.8.2. Les surcotes

Les surcotes sont essentiellement induites par l'action de deux facteurs différents : l'action d'une basse pression atmosphérique ainsi que l'action du vent d'afflux qui souffle de la mer vers la terre. Donc, suite à ces deux origines on peut avoir deux types de surcotes marines : les

surcotes d'origine barométrique et celles d'origine anémométrique. Ces deux phénomènes peuvent se combiner, amplifiant alors la surcôte totale (**Cariolet, 2011**).

#### I.8.4. Processus de formation d'une onde de tempête

La baisse du gradient de pression atmosphérique provoque la réduction du poids de la colonne d'air sur l'eau, ce qui provoque une élévation du niveau de l'océan. D'après la règle du baromètre inversé ; la baisse de la pression atmosphérique de 1 h Pa génère une élévation d'ordre de 1 cm de la surface de l'eau (**Harris, 1963**). Lors de passage d'une tempête, le vent qui l'accompagne influe par friction sur la surface de la mer et génère une accumulation d'eau au niveau des littoraux exposés aux ces vents. Plus le vent souffle sur une grande distance (fetch), plus l'élévation du niveau de la mer à la côte sera importante (**Harris, 1963**). La direction du vent peut avoir un rôle essentiel dans le processus d'élévation du niveau de la mer à la côte.

Au moment de déplacement d'une dépression, elle est souvent accompagnée par une onde de pression et une onde induite par l'action du vent. La combinaison de ces deux ondes forme ce que l'on appelle une onde de tempête (**Hontarrède et Galli, 2001**). La célérité d'une onde de tempête est essentiellement fonction de la profondeur :

$$C = \sqrt{gh} \quad (I-1)$$

Où :

c = vitesse de l'onde en m/s

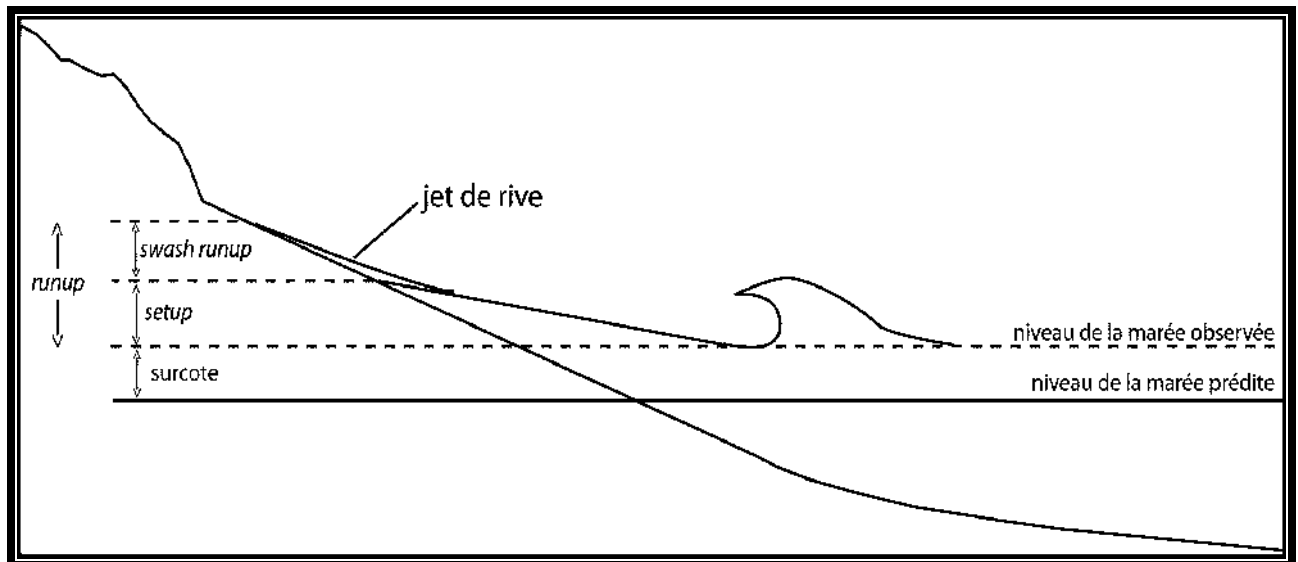
g = accélération gravitationnelle = 9,81 m/s<sup>2</sup>

h = profondeur d'eau en m

La célérité d'une onde de tempête est freinée par la diminution de la profondeur d'eau. Généralement et au moment du rapprochement de l'onde sur la côte, sa vitesse de déplacement diminue, alors que son amplitude augmente. Pour cette raison, les surcôtes sont plus importantes à la côte (**Cariolet, 2011**).

#### I.8.5. Elévation du niveau d'eau due au déferlement des vagues

Les vents induits lors de passage des tempêtes génèrent des houles en soufflant sur la surface de l'océan. On appelle « mer du vent » l'agitation marine locale engendrée par l'action du vent. Alors que la mer totale est le résultat de la combinaison de la mer du vent et les houles engendrées au large. La hausse du niveau de la mer générée par l'action des vagues s'exprime à travers le phénomène de *run up*, qui est considéré comme étant la différence entre le niveau maximal atteint par le jet de rive et le niveau moyen observé en l'absence d'agitation (**Komar, 1998**) (Figure n°7).



**Figure 7.** Schéma illustrant les différents paramètres entrant en compte dans l'estimation des niveaux d'eau extrêmes (d'après Komar, 1998).

### I.8.6. Le Wave Setup

Le concept de *wave setup* désigne la surélévation de niveau de l'eau à la côte dans les zones exposées aux vagues (pouvait être un mètre plus haut que dans les zones protégées) et cela été remarqué lors du passage d'un Ouragan en 1938 sur la côte est des Etats-Unis (**Guza et Thornton, 1981 ; Holman et Sallenger, 1985**). De nombreuses études en laboratoire ont prouvé que le niveau d'eau dans la zone de surf était augmenté par le déferlement des vagues (**Savage, 1957 ; Fairchild, 1958 ; Saville, 1961**).

### I.8.7. Le Run up

Le phénomène du *run up* est induit par l'action de deux phénomènes distincts :

- L'élévation du niveau de la mer générée par le déferlement des vagues appelée *wave setup*.
- La hausse maximale atteinte par le jet de rive exprimée *swash runup* (**Komar, 1998**).

### Conclusion partielle :

De multiples conditions météo-marins (basses pression, vent), peuvent induire des élévations extrêmes du niveau marin. Les phénomènes de submersion marine surviennent essentiellement lorsque le niveau de la mer à la côte est suffisamment haut pour franchir ou déborder un cordon littoral (**Benavente et al., 2006**). Sur la cote, il semble primordial de quantifier les niveaux d'eaux extrêmes car ils sont considérés comme des éléments clés dans le dimensionnement des différentes ouvrages côtiers (côte d'arses) ainsi pour déterminer l'altitude de référence des zones potentiellement inondables par la mer (**Garry et al., 1997 ; Benavente et al., 2006 ; Peeters et al., 2009**).

## I.9. Origine de la marée : théorie statique

### I.9.1. Les forces à l'origine du phénomène

La marée est un incessant va-et-vient de la mer due à la Lune et au Soleil. Plus précisément, ce phénomène d'origine astronomique est une manifestation de l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur la Terre. **Newton (1687)**, a donné une explication scientifique à ce phénomène grâce à sa découverte des lois de l'attraction universelle. La force génératrice de la marée, résulte essentiellement de la force d'attraction gravitationnelle et de la force centrifuge de chacun des deux astres (**Simon, 2007**) (Figure n°8).

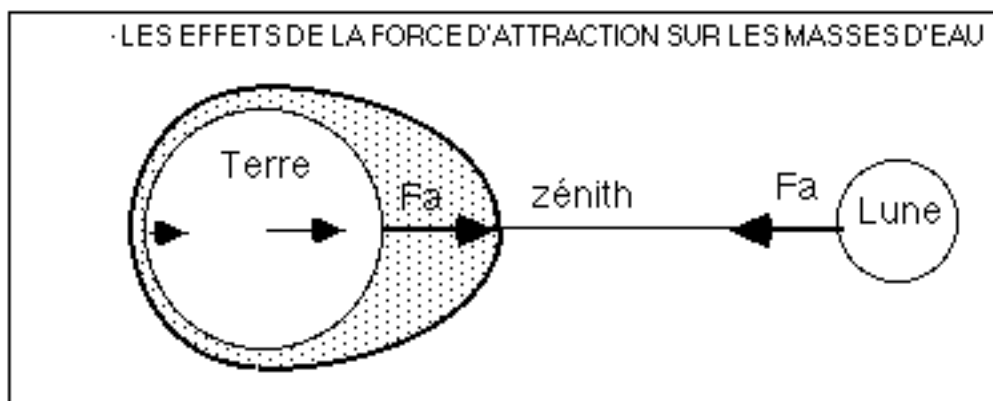
#### I.9.1.1. La force d'attraction gravitationnelle

Cette force  $F_a$  est exercée par la lune ou le soleil (de masse  $M_1$ ) sur les particules d'eau à la surface de l'océan (Nicolle, 2006), cette force est exprimée par la relation suivante :

$$F_a = \frac{GM_1M_2}{d^2} \quad (\text{I-2})$$

Avec  $G$  = constante universelle de gravitation =  $6.672 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{Kg}^{-2}$

$d$  = distance Terre-astre



**Figure 8.** Effets de la force d'attraction sur les masses d'eau (Source : Nicolle, 2006)

Cette force atteint son valeur maximum lorsque la terre est en point le plus proche de l'astre (c'est-à-dire quand l'astre est au zénith du point d'observation), en revanche lorsque la terre est au nadir, cette force atteint son minimum (**Simon, 2007**).

### I.9. 1.2. La force centrifuge

Cette force  $F_g$  est la conséquence de la rotation de la terre autour du centre de gravité de l'un des deux systèmes (Terre-Lune ou Terre-Soleil) et elle est l'équivalent exact de la force d'attraction gravitationnelle (Figure n°9). Elle est identique en tout point de la surface de la Terre (Nicole, 2006), elle s'exprime sous la forme suivante :

$$F_g = \frac{GM_1M_2}{d^2} \quad (I-3)$$

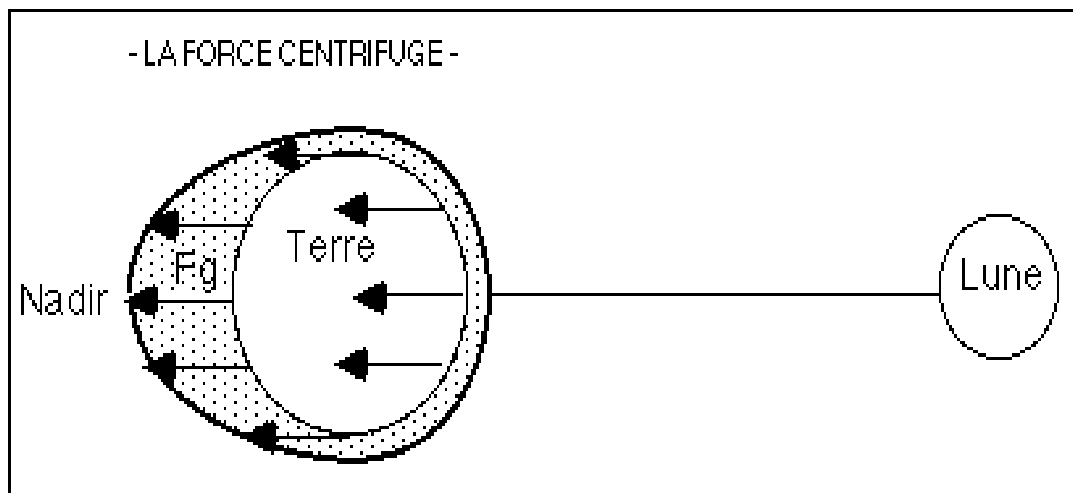


Figure 9. La force centrifuge (Source : Nicolle, 2006)

### 1.9.1.3 La force génératrice de la marée

C'est la résultante des deux forces  $F_a$  et  $F_g$ . Elle dépend de la position sur la Terre :

- elle est nulle au centre de la Terre :  $F_a = F_g$
- elle est dirigée vers la Lune au zénith :  $F_a > F_g$
- elle est dirigée à l'opposé de la Lune au nadir :  $F_a < F_g$
- elle est dirigée plus ou moins vers le centre de la Terre pour les points situés perpendiculairement à l'axe zénith-nadir (Figure n°10).

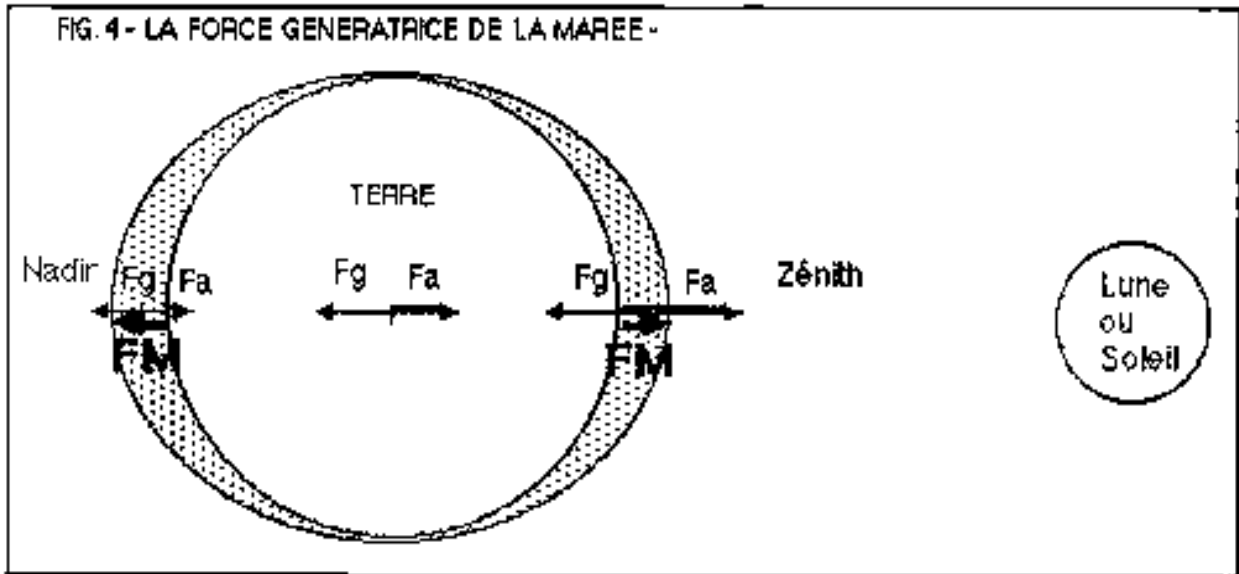


Figure 10. La force génératrice de la marée (Source : Nicolle, 2006)

### I.10. les surcotes et les décotes

Les variations du niveau de la mer sont essentiellement regroupées en deux catégories : celles liées aux marées astronomiques ainsi les surcotes et les décotes météorologiques.

Les surcotes et les décotes désignent la différence entre le niveau marin observé et celui enregistré en présence de la marée astronomique seule (marée prédite). Donc, la notion de surcote-décote regroupe tous les mouvements qui relèvent des effets météorologiques (vent et pression atmosphérique), effets sismiques (tsunamis) (Nicolle, 2006).

Lorsqu'une tempête arrive sur une zone peu profonde, elle génère des surcotes de grande hauteur qui coïncident avec la pleine mer en période de vives eaux. La combinaison de ces deux phénomènes engendrent de sévères inondations qui peuvent provoquer de sérieux dégâts lorsque ces zones côtières sont densément peuplées (Pugh, 2004).

Le tableau ci-dessous représente l'ampleur que peuvent atteindre de tels phénomènes.

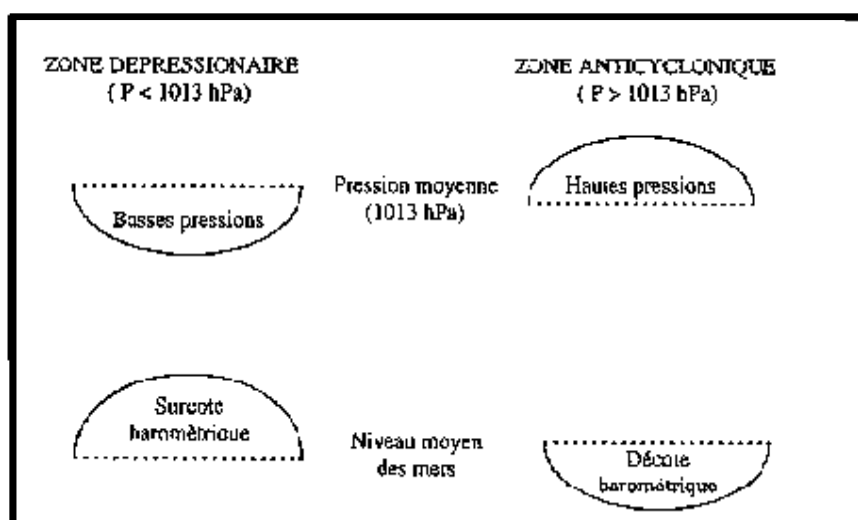
**Tableau 2.** Impacts estimés de quelques événements historiques de surcotes de tempêtes.  
(Source : Pugh, 2004)

Date	Région	Max surge level (m)	Lives lost
Novembre 1970	Bangladesh	9.0	250000
Novembre 1978	Sri Lanka	4	373
Novembre 1988	Bangladesh	4,4	5708
Aout 1992	Miami, Florida	5,1	50
Octobre 1999	Orissa, India	7-8	10000

### II.10.1. Rôle de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique standard est définie comme étant la pression exercée au niveau moyen de la mer par une colonne verticale de 760 mm de mercure à une température de 0°C ; sa valeur est fixée à 1013.25 hPa (Nicolle, 2006). En météorologie, cette valeur peut être considérée comme une valeur moyenne de la pression atmosphérique prise à partir des différentes estimations de cette valeur au niveau moyen de la mer dans les zones tempérées. Elle est choisie d'une telle manière à distinguer les régions où la pression est plus haute (zones anticycloniques) de celles où la pression est plus basse (zones dépressionnaires) (Barbot, 1998).

Dans les conditions normales de l'équilibre hydrostatiques de l'océan et selon la loi de baromètre inversé, une baisse de pression d'environ un hectopascal est susceptible d'engendrer une élévation de l'ordre d'un centimètre du niveau de la mer (Figure n°11).



**Figure 11.** Formation des surcotes et décotes barométriques (d'après Barbot, 1998).

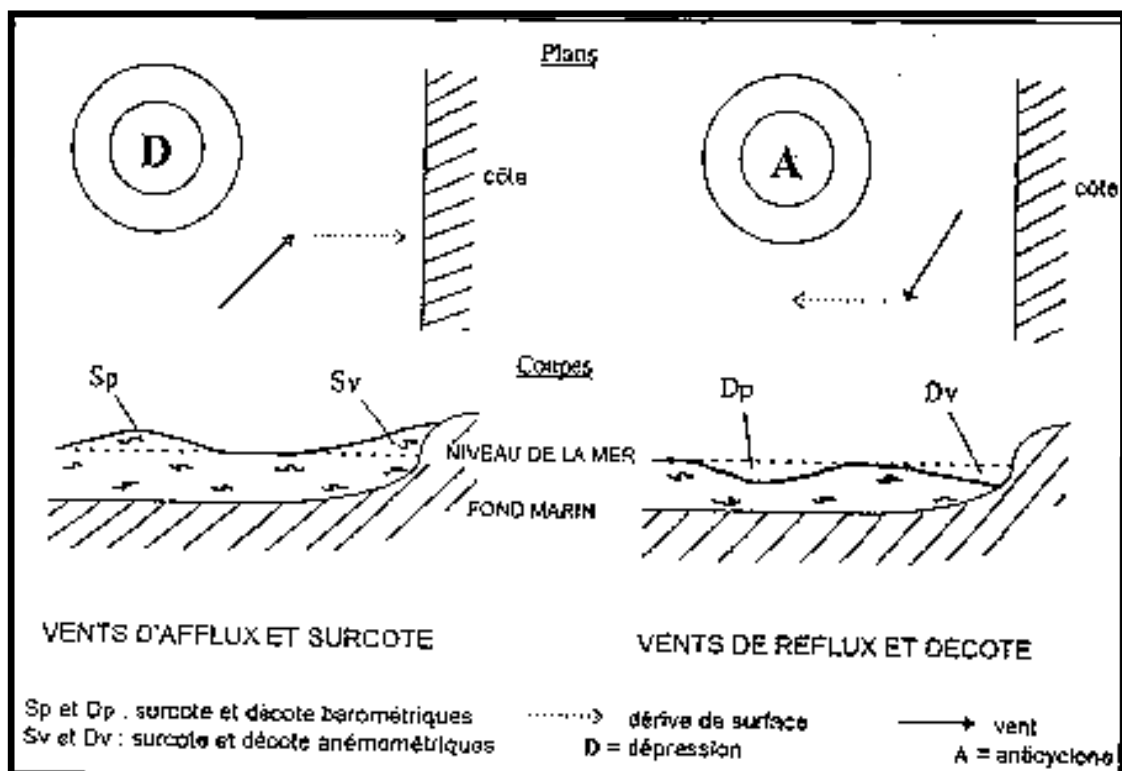
En réalité, une pression inférieure à 1013 hectopascal (hPa) engendre une dépression et par conséquent la formation d'une surcote barométrique alors qu'une pression supérieure à 1013 hPa génère un anticyclone donnant naissance à une décote barométrique (**Barbot, 1998**).

### I.10.1.2. Rôle du vent

Le vent influe sur la surface de la mer par les forces de frottement induisant l'agitation du niveau de la mer (formation des houles et des courants). Ces variations du niveau marin peuvent provoquer d'importantes surcotes ou décotes (de 1.50 m à -60 cm sur la Côte Atlantique).

Selon **Barbot (1998)**, l'action du vent qui se combine aux effets de la pression dérive essentiellement de trois paramètres :

- **La direction du vent** : selon sa direction, le vent peut entraîner (provoquer) un afflux d'eau vers la côte ce qui permet la génération ou l'amplification de la surcote, ou bien produire un reflux et contribuer à la formation d'une décote.
- **Vitesse du vent** : qui amplifie le plus souvent ces effets.
- **Durée d'action du vent** : elle constitue un paramètre clé dans le processus de formation de la houle car leurs caractéristiques (amplitude, longueur d'onde) dépendent de la distance dont la houle a parcouru sous le vent (Figure n°12).



**Figure 12.** Action des vents d'afflux et des vents de reflux (d'après, Barbot, 1998).

Pour illustrer le rôle que joue le vent dans le processus de formations des surcotes, il suffit de suivre son action pendant les tempêtes. Des vents d'une violence exceptionnelle accompagnent le passage de ces dépressions elles dépassent souvent 200 km/h (**Ullmann, 2008**).

La pression atmosphérique et le vent ne sont pas les seuls facteurs à jouer un rôle clef dans la génération des surcotes; les interactions avec la marée et la houle peuvent aussi agir sur l'amplification du phénomène.

## **Chapitre II**

### **Définition de la zone d'étude**

### II.1. Présentation du site d'étude

La baie d'Alger est située dans la partie centrale de la côte algérienne. Elle s'inscrit en creux dans la plaine de Mitidja de forme semi-circulaire d'une superficie approximative de l'ordre de 180 Km<sup>2</sup> délimitée par deux caps, la Pointe Pescade (Rais Hamidou) à l'ouest et le cap Matifou (Bordj El- Bahri) à l'est. Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée avec une longitude Est 03°.14'.50 à 03°.00'.40 et une latitude nord 36°.49'.35 à 36°.49'.50. (Figure n°13).

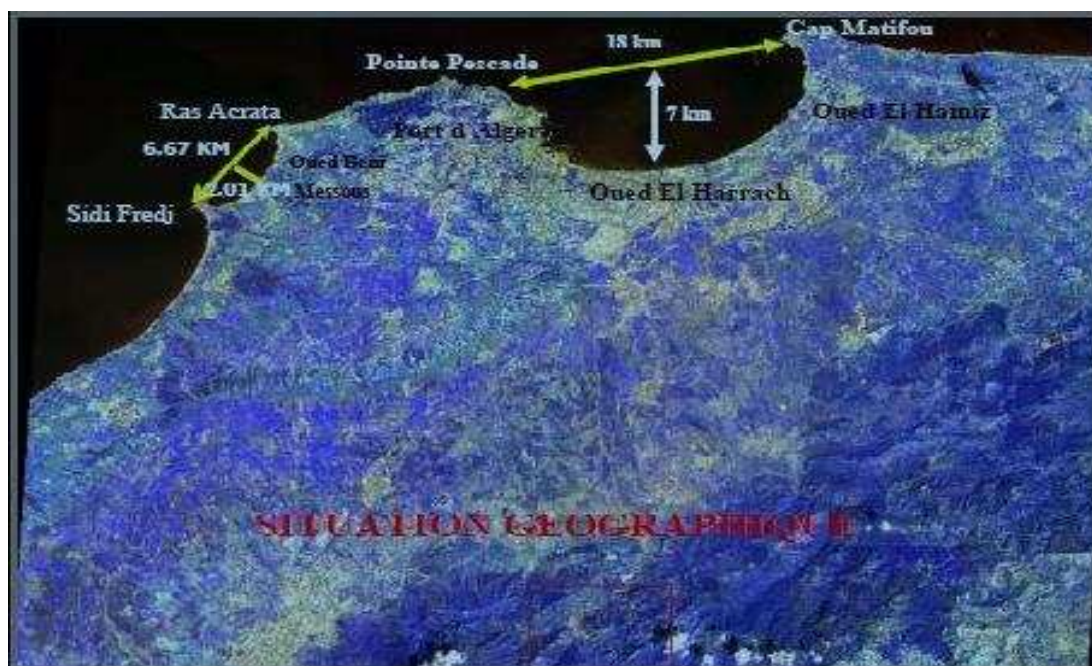


Figure 13 : Situation géographique de la baie d'Alger (Bachari et al, 2011).

### II.2. Bathymétrie de la baie d'Alger

Le plateau continental est très étroit mais s'élargi au centre de la baie. Ce dernier ne dépasse pas l'isobathe 120 m. En effet, l'isobathe 50m est à 4,1Km de la côte, celui de 100m est à 7,6Km quant à celui 1000 m il ne se trouve qu'à 12,1Km de la côte (Figure n°14).

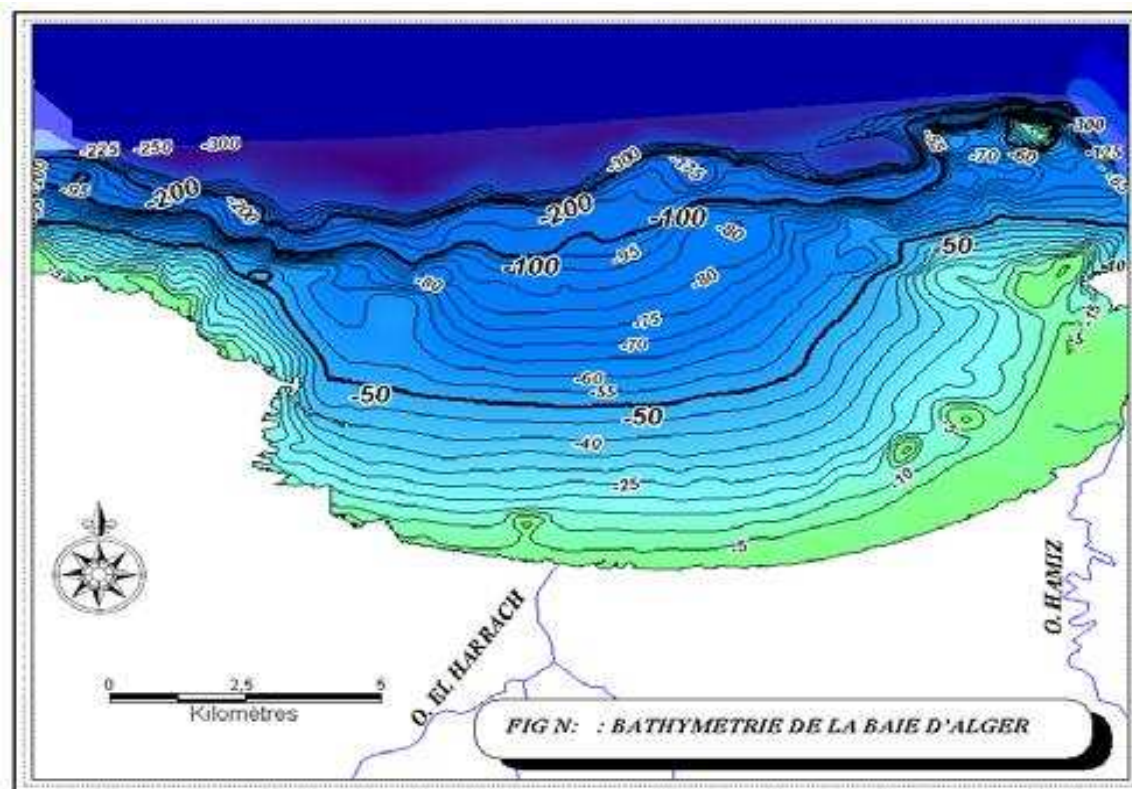


Figure 14. Carte bathymétrique de la baie d'Alger (Bachari et al, 2011).

### II.3. Géomorphologie

#### II.3.1. Aspect géomorphologie local

La connaissance de la géologie et la géomorphologie locale d'un site permet de définir sa sensibilité face aux agressions marines. L'environnement géologique du site d'étude fait partie intégrante du cordon littoral dunaire algérois, ce cordon consiste en une barrière étroite sablo-gréseuse allongée parallèlement au rivage ; elle renferme les affleurements pléistocène Est Algérois (LEM, 1996).

La région d'Alger a connu une très grande lacune de sédimentation au cours du Secondaire et de base du Tertiaire (Éocène-Oligocène). Seul le Primaire et le Mio-Plio-quaternaire sont représentés. Les terrains bordant la baie d'Alger appartiennent à des formations plioquaternaires. Mais la formation la plus importante est celle du quaternaire (LEM, 1996).

II.3.2. La formation Quaternaire

La mer réoccupe la zone septentrionale de la région d'Alger au Calabrien. Elle correspond à une oscillation positive du niveau marin dans un contexte globalement régressif.

La répartition des dépôts pléistocènes est dirigée par la composition du Glacio-eustatisme et des mouvements tectoniques post-Astienne.

Les terrasses marines étagées dans le secteur occidental du sahel (unités transgressives inverse) sont superposées dans sa partie orientale (Unités transgressives) attestent de la relation tectonique-sédimentation tout au long du Palio-quaternaire (Figure n°15). D'une façon générale chaque cycle climato-sédimentaire est surmonté par des formations continentales qui matérialisent les phases régressives (LEM, 1996).

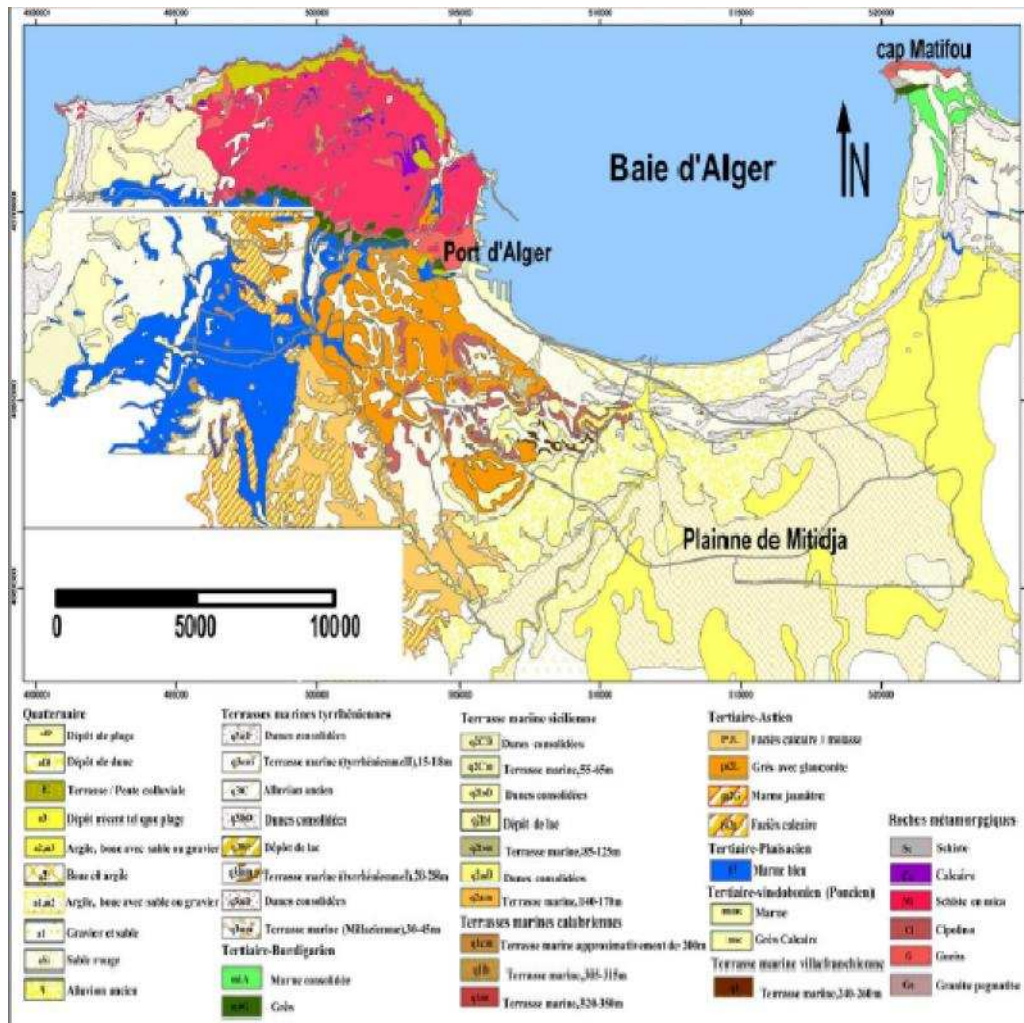


Figure 15. La carte géologique de la baie d'Alger et de sa région (LEM, 1996).

Les zones entre cap Caxine et le port sont formées dans des roches métamorphiques dures (gneiss) qui ont la particularité de résister aux agressions marines (érosion lente). Leur nature topographique leur confère une auto protection.

Les zones entre le port et cap Matifou sont caractérisées par leur nature sableuse qui leur donne une particularité fragile aux agressions marines (LEM, 1996).

### **II.3.3. Données météorologique et hydrographique**

#### **II.3.3.1. Données météorologiques**

La zone d'étude connaît un climat méditerranéen caractérisé par une saison pluvieuse s'étalant de septembre à Mai et un été sec. Ce littoral jouit d'un climat tempéré dû à l'action modératrice de la mer. L'amplitude diurne, au cours d'une année est inférieure à 10°C (LEM, 1996).

##### **II. 3.3.1.1. Précipitations (Données O.N.M 1975-1984)**

Les pluies sont importantes en automne et en hiver avec le plus souvent un régime orageux.

Les pluies sont celles d'une saison froide qui tombent d'octobre à mai avec un maximum prononcé en novembre et un autre en février. La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 700mm. Les statistiques mettent en évidence deux périodes distinctes :

a) une saison relativement pluvieuse s'étalant sur huit (08) mois d'octobre à mai avec trois pics :

Novembre : 110mm

Février : 85mm

Avril : 65mm

b) une saison sèche de juin à Septembre avec de faibles précipitations relevées (LEM, 1996).

### II. 3.3.1.2. Les vents

Les vents jouent un rôle important dans la dynamique des eaux marines superficielles. Ils sont générateurs des houles et des courants superficiels.

#### a) Données de l'US. Naval Weather Service (1914-1970)

Les résultats des observations effectuées au large des côtes algéroises ( $37^{\circ} 4'N$  et  $3^{\circ} 9'E$ ) sont rapportés sous forme de roses des vents pour chaque trimestre de l'année (Figure n°16).

Les roses trimestrielles montrent que pendant l'hiver (Octobre-Mars) les vents des secteurs Ouest à Nord-ouest sont dominants. Une grande partie de ces vents présente une vitesse supérieure à 16 nœuds. Les vents d'Est à Nord-est sont dominants au cours de l'été mais la majorité de ceux-ci ont des vitesses inférieures à 16 nœuds. La rose annuelle des vents montre que les vents de secteur Ouest sont appréciables par leur force et par leur fréquence (**LEM,1996**).

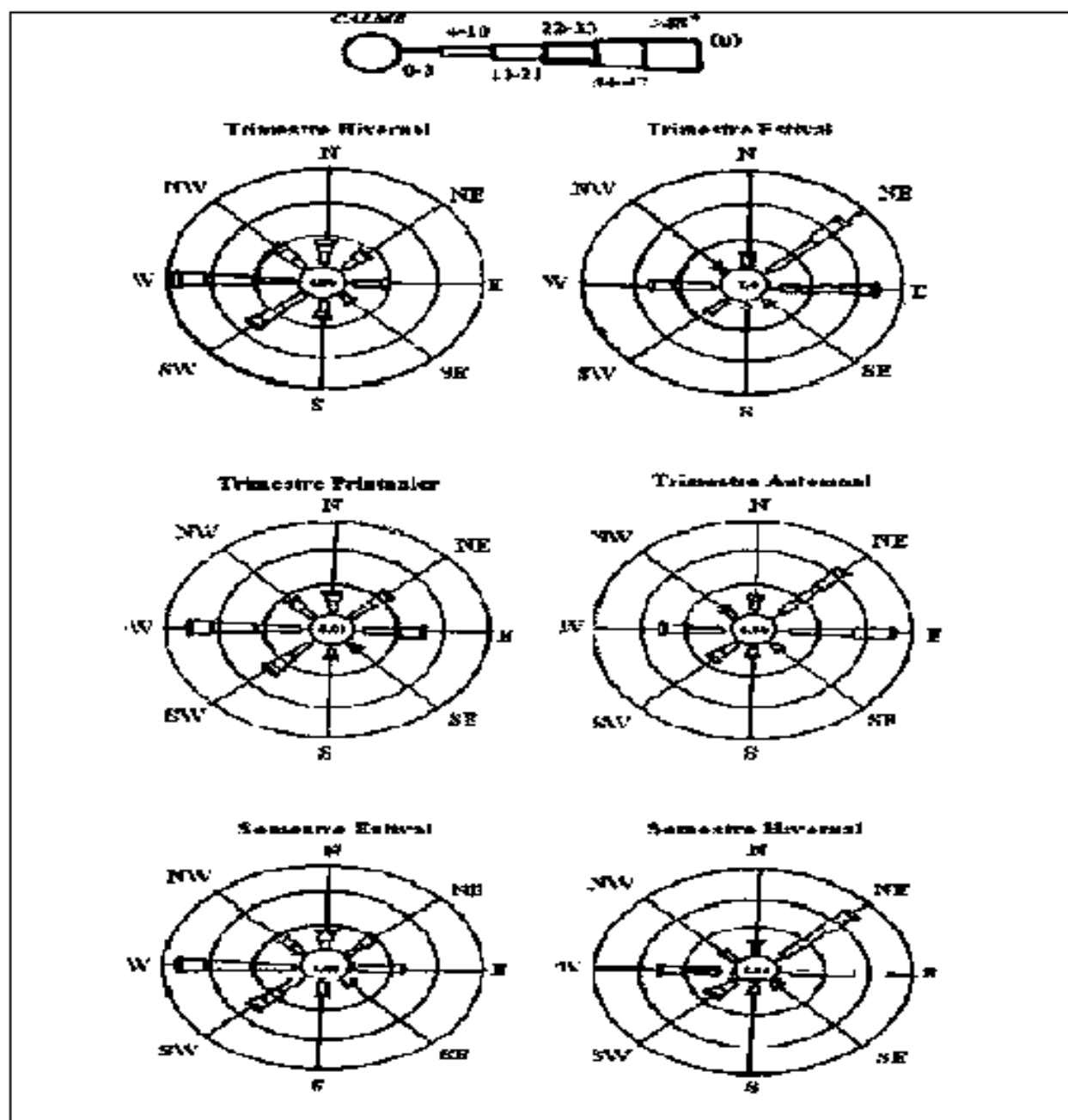


Figure 16. Les roses des vents dans la baie d'Alger (l'US. Naval Weather Service, 1914-1970 in LEM, 1996).

**b) Données de l'Office National de Météorologie (1975-1984)**

La rose récapitulative sur dix (10) ans (1975-1984) des vents enregistrés au niveau de la station de Dar El-Beida donne quatre (04) directions prédominantes.

- Nord (N360°)
- Nord-est (N45°)
- Sud-ouest (N225°)
- Ouest (N270°)

Les vents de direction N360° (fréquence=12%) et N 45° (fréquence=10%) sont dominants en période estivale s'étalant de Mai à Septembre. Les vents de direction N 360° montrent une répartition constante durant toute l'année. Le vent de direction N 225° (fréquence=14,5%) et N 270° (fréquence=11,5°) sont dominants en période hivernale qui s'étale d'Octobre à Avril (Tableau n°3).

**Tableau 3.** Répartition annuelle des fréquences d'apparition par direction des vents (en%) (O.N.M, 1975-1984)

Période	N 225°	N 360°	N 45°	N 270°
Janvier	24.6	6.0	4.2	24.6
Février	21.6	8.0	6.0	21.6
Mars	14.4	18	6.0	14.4
Avril	12.0	14.4	11.4	11.4
Mai	9.0	15.0	12.	10.2
Juin	6.6	18	18.0	7.2
Juillet	5.4	18.4	22.2	5.4
Aout	8.4	15	20.4	8.4
Septembre	8.4	12.6	16.2	8.4
Octobre	15.6	9.6	8.4	16.2
Novembre	21.6	10.2	4.2	22.2
Décembre	21.0	3.6	3.0	21.0

Pour les quatre (04) directions de vent considérées, les classes des vitesses de vents allant de 1 à 5 m/s et de 6 à 10 m/s totalisent un taux d'apparition important (>46%). La classe de vent allant de 11 à 15 m/s présente une fréquence d'apparition très faible (0,6%) pour la direction N270°.

Les vitesses de vents supérieurs à 16 m/s sont soit inexistantes ou présentant des fréquences insignifiantes. Localement, la baie d'Alger est soumise à la fréquence des vents de secteur Ouest et Nord-Ouest. Ces derniers sont appréciables d'une part, par leur intensité et, d'autre part, par leur fréquence d'apparition. Contrairement aux vents du secteur Est et Nord-est qui sont caractérisés par leur fréquence d'apparition et non par leur force. Par contre, les vents du secteur Sud à Sud - Ouest sont caractérisés par une intensité assez forte mais ne jouent aucun rôle sur l'hydrodynamisme côtier (LEM, 1996).

### I.3.4. Données hydrodynamiques

#### I.3.4.1. La houle

Etant le facteur le plus important dans la dynamique sédimentaire des petits fonds, sa direction de propagation est liée à celle du vent et de la profondeur, tant que la profondeur est plus grande que la longueur d'onde de la houle. Ainsi la houle de la baie d'Alger suit le régime des vents, qui est un régime saisonnier comme pour le reste de la marge algérienne (Leclaire, 1972).

En hiver, les houles dominantes sont de direction W-NW (300°) et, en été, elles sont de direction N-NE (20°- 40). (**Benzohra, 1993; Belkessa et al., 2008; LEM, 1998**).

Au contact des irrégularités du fond, les houles donnent lieu à des rouleaux qui provoquent la mise en suspension des particules favorisent leur déplacement. Le sens et l'intensité de ce courant sont fonction de l'amplitude, de l'incidence de la houle par rapport à la côte, de la topographie de la plage sous-marine et de la granulométrie des sédiments (**Millot, 1989**).

Dans le cas général de houles de petites et moyennes amplitudes, les courants ne sont notables que dans les zones de déferlement et n'affectent donc que le triage des sables et des graviers de la frange littorale "fond -10 m". Ils assurent le transport latéral par dérive littorale et la dispersion. Par contre les houles de fortes amplitudes pourraient agir jusqu'à des fonds de 40 m 60 m (**Leclaire, 1972**).

#### I.3.4.2. Les courants

La mer Méditerranée est connue par son excès d'évaporation par rapport aux apports fluviaux et aux précipitations, ceci est responsable d'une baisse de niveau de la mer estimée à 1m/an, ce déficit est compensé par un flux entrant (de 31600 Km<sup>3</sup>/an) d'eau atlantique, par le détroit de Gibraltar. Ces eaux de salinité (S < 36,5 PSU), au fur et à mesure de leur progression vers l'est, elles se « méditerranisent » le long des côtes algériennes, d'où l'appellation du courant algérien (**Millot, 1987**).

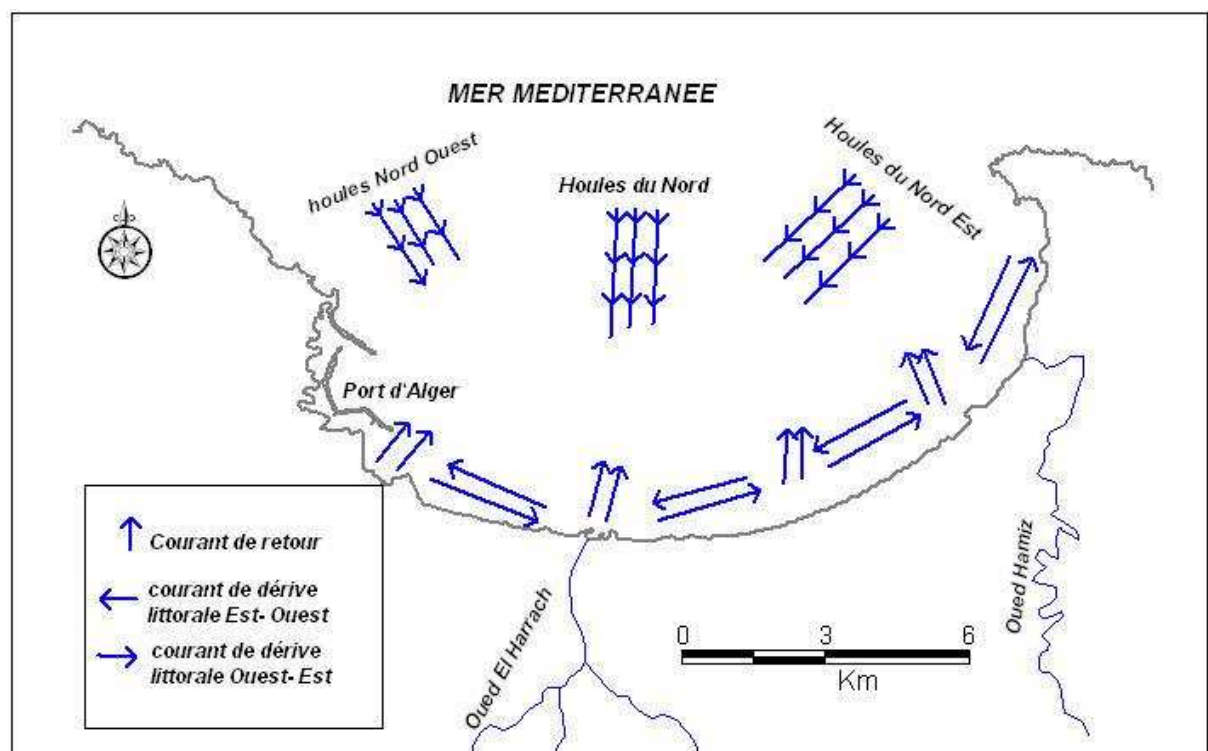
Les côtes algériennes sont plus ou moins influencées par ce courant, qui agit sur la distribution des facteurs physico-chimiques, nutritifs, biologiques voire sur la dispersion des polluants.

La vitesse du courant général des eaux atlantiques de Gibraltar vers l'est reste généralement dans un ordre de grandeur de 0,5 à 1 m/s, au large des côtes algériennes. Ce courant général crée dans la plupart des baies un contre-courant littoral vers l'ouest (**Benzohra, 1993**).

Le courant de retour : correspond à une zone de flot de retour à partir du courant existant au lieu de déferlement de la houle. Ces courants possèdent une vitesse qui dépend de l'énergie de la houle et de la pente de la plage. Ces courants sont responsables de la dispersion d'une partie des sédiments côtiers vers le large (Figure n°17).

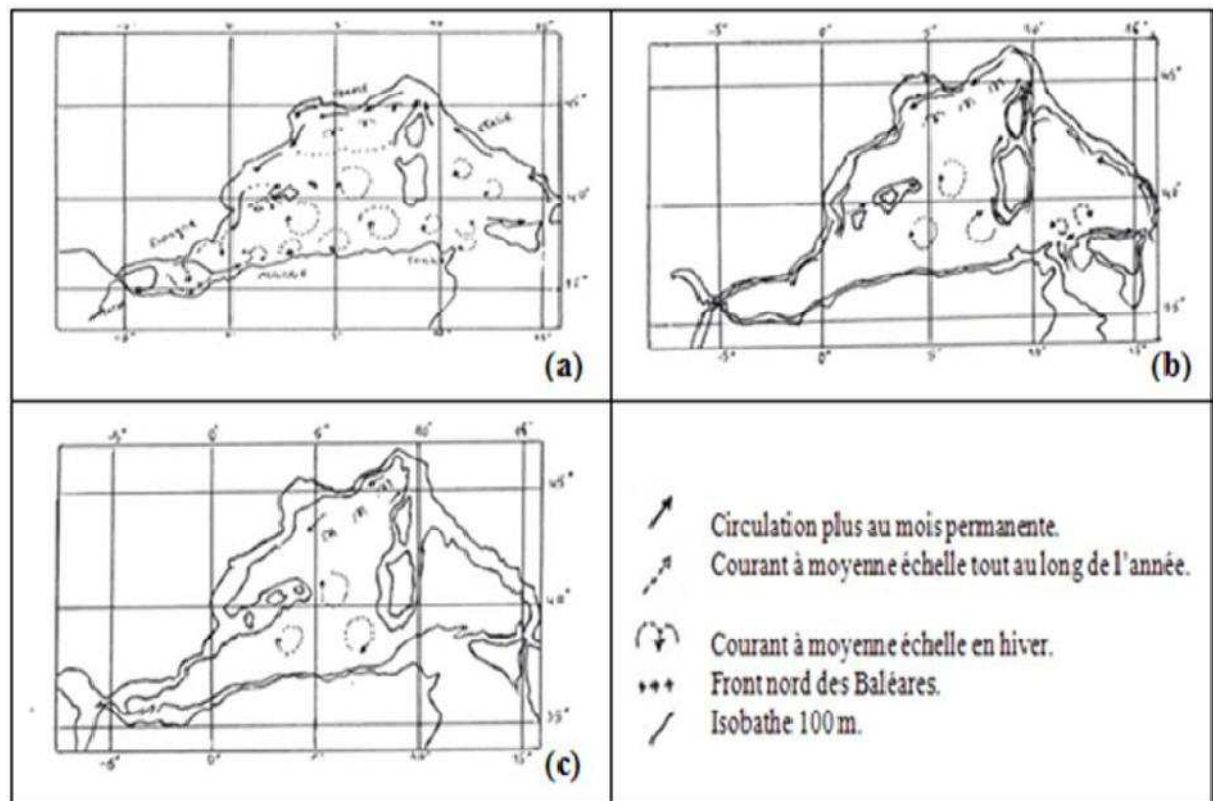
Les courants de dérive littorale : Lorsque la houle arrive à la côte avec une incidence oblique celle-ci donne naissance à un courant de dérive littorale. La vitesse de ce courant est maximale pour un angle d'incidence de 45 % à 50%. La dérive littorale prend naissance au niveau de la zone de déferlement où l'énergie est maximale (Millot, 1987). Cette énergie permet la remise en suspension et le transit des particules sédimentaires le long de la côte.

La dérive générale dans la baie d'Alger engendrée par le courant atlantique (contre-courant atlantique) tourne dans le sens des aiguilles d'une montre avec une vitesse moyenne en surface de l'ordre de 0,3 km/h. A proximité du fond la vitesse de ces courants diminue très rapidement et devient pratiquement négligeable (LEM, 1998).



**Figure 17.** Bilan des courants de dérive et dynamique sédimentaire dans la baie d'Alger (LEM, 1998).

La baie d'Alger a la même circulation que le bassin algérien, D'une façon générale, l'hydrologie de la baie est caractéristique des eaux atlantiques dont la circulation varie en fonction du régime des vents (Figure n°18). La baie largement ouverte à l'ouest reçoit les eaux océaniques qui s'écouleraient à vitesse moyenne de trois nœuds avec un maximum en décembre et un minimum en juillet-août où les vents d'Est sont dominants (Gaumer, 1981).



(a): Circulation de l'Eau Atlantique Modifiée (MAW), (b): Circulation de l'Eau Levantine Intermédiaire (LIW), (c): Circulation de l'Eau Profonde (DW).

**Figure 18.** La circulation de l'eau dans le bassin algérien (Millot, 1989).

### II.5. Les Marées

Le long des côtes algériennes, l'amplitude moyenne des marées astronomique est de l'ordre de 6cm. Les variations du plan d'eau sont soumises plus à l'effet des vents (phénomène de seiche) qu'à l'attraction luni-solaire. Les variations journalières observées sur les côtes algériennes sont inférieures à dix (10) cm. La différence entre valeur maximale et valeur minimale de la marée (le marnage) ne dépasse pas 50 cm. **(LEM, 1996).**

# **Chapitre III**

## **Matériels et Méthodes**

Dans ce chapitre, nous allons détailler la méthodologie suivie dans notre travail qui se base essentiellement sur le traitement du signal temporel du niveau de la mer. Ce signal est issu du marégraphe numérique localisé au niveau du port d'Alger.

Généralement, pour traiter un signal il est très important de savoir quelques paramètres caractérisant ce dernier. Parmi ces paramètres, on peut citer :

- ✓ La fréquence : la fréquence( $f$ ) renseigne sur le nombre des oscillations comprises dans une seconde et s'exprime en Hertz [Hz].

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots \text{(III-1)}$$

- ✓ L'amplitude : c'est la distance entre le maximum de l'onde et l'axe horizontal.  
L'amplitude ou l'intensité est définie par la force de l'ondulation, c'est-à-dire la hauteur d'une vague.
- ✓ La phase : est une notion permettant de comparer deux signaux sinusoïdaux entre eux.

### III. L'analyse spectrale :

L'analyse spectrale est considérée comme un élément primordial dans le traitement du signal. En fait, elle constitue la base de traitement de tous les signaux numériques. Elle s'intéresse à l'amélioration de la connaissance des caractéristiques d'un signal en se basant sur le domaine fréquentiel. Autrement dit, l'analyse spectrale vise à déterminer ou à extraire le spectre énergétique d'un signal (l'énergie contenu dans chaque composante du signal). Lorsque le signal est considéré comme stationnaire, le spectre met en évidence la valeur que présente chaque fréquence sur le plan énergétique (**Durnerin, 1999**). Avec l'introduction de nombreuses méthodes d'estimations du spectre, l'analyse spectrale a connu d'importantes avancées. Cependant, cette multiplication des possibilités d'analyse rend également très complexe la maîtrise du choix optimal d'une méthode par rapport à une autre (**Adnet, Martin, 1990**).

Entre 1950-1960, les travaux de **Rice (1944-1945)** dans le traitement des signaux ont été étendus pour l'étude des vagues marines (**Kinsman, 1965 ; Phillips, 1977**). Cette méthode d'analyse s'est nettement distinguée de la méthode temporelle grâce à l'avènement de l'informatique et à la méthode de Fourier (**Hemdane, 2006**).

L'analyse spectrale est une méthode qui décrit la forme d'un signal temporel comme une superposition de composantes de formes simples. C'est une méthode en physique pour

déterminer les caractéristiques fréquentielles et énergétiques d'un phénomène ondulatoire observé. L'intensité du phénomène en fonction du temps constitue un signal. Ce dernier est traité mathématiquement afin d'extraire ses caractéristiques pour avoir des informations sur le phénomène oscillatoire à étudier et qui est dans notre cas l'étude des surcotes marines. Cette analyse permet d'identifier chaque composante, amplitude, période et phase, ainsi elle permet de séparer les différents types d'oscillations que comprend un signal brut du niveau de la mer (Fleury, 2001).

### III.1. Analyse spectrale avec la transformée de Fourier rapide (FFT) :

Généralement, les estimateurs de type Fourier sont conçus pour estimer la densité spectrale de puissance d'un signal échantillonné stationnaire ergodique de durée limitée (Durnerin, 1997). Dans ce cas, notre signal est considéré comme un signal à temps discret et fréquence continu et sa densité spectrale de puissance peut être définie selon Priest (1981), Marple (1987) par l'équation suivante :

$$\gamma_x(\nu) = \lim_{N \rightarrow \infty} \xi \{ |X_N(\nu)|^2 / NT_e \} = \lim_{N \rightarrow \infty} \xi \left\{ \frac{T_e}{N} \left| \sum_{n=-N/2}^{+N/2} X[n] e^{-2\pi j \nu n T_e} \right|^2 \right\} \dots \dots \dots (\text{II.2})$$

Où :

$\gamma_x(\nu)$  : la densité spectrale de puissance

Avec  $X_N(\nu) = \text{TFD}(X_N[n])$  ,  $\gamma_x(\nu)$  est périodique de période  $1/T_e$

TFD : transformé de fourrier discret

La transformé de Fourier est un outil mathématique qui permet de décrire un signal par son spectre de fréquence. Elle est très utilisée pour représenter un phénomène temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence (Gasquet et Witomski, 1990).

La décomposition en série de Fourier est un outil simple et pratique pour trouver les spectres d'un signal périodique (sinusoïdal ou cosinusoidal) (Durnerin, 1997).

**Série de Fourier :**

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin(2\pi t/T) + A_2 \sin(4\pi t/T) + \dots + A_n \sin(2n\pi t/T) \dots \dots \dots (\text{II.3})$$



**Nombre de points temporels du calcul FFT (nfft) :**

C'est le nombre d'échantillons temporels utilisés dans le bloc mémoire pour l'algorithme FFT.

✓ Résolution temporelle (période T) :

C'est la longueur du signal nécessaire pour obtenir un spectre instantané (T exprimé en seconde (s)).

✓ Résolution fréquentielle :

C'est la résolution d'analyse du spectre FFT (exprimé en Hertz).

**III.1.3. Efficacité de l'algorithme de la FFT :**

La FFT réduit considérablement le nombre de calculs nécessaires, c'est-à-dire elle permet de ramener le calcul de la transformé de Fourier discrète de  $N^2$  à  $N \log N$  opérations. Cette réduction de complexité suffit à faire passer d'impossibles à facilement résolubles nombre de problèmes. Ainsi, pour  $n=1024$ , le temps de calcul de l'algorithme est peut être 100 fois plus rapide que le calcul utilisant la formule de définition de la TFD (transformé de Fourier discrète) (Allen, 1997 ; Harris, 1978).

L'application principale de l'analyse FFT est donc la mise en évidence des périodicités du signal et le calcul de l'énergie contenu dans le signal pour chacune des fréquences (Durnerin, 1999).

**III.2. Estimation de l'énergie spectrale par la méthode de WELCH****III.2.1 La densité spectrale d'énergie :**

Dans le traitement du signal, la densité spectrale de puissance (PSD), ou la densité spectrale d'énergie (ESD), est une fonction réelle positive d'une variable associée à une fréquence fixe, qui a des dimensions de puissance par fréquence, ou de l'énergie par fréquence. la fonction de densité spectrale par puissance (PSD) montre la force des variations (énergie) en fonction de la fréquence (Clark ; Mullis, 1993). Autrement dit, elle montre à quelles fréquences les variations sont fortes et où elles sont faibles. Pour notre cas, nous utilisons la méthode de pwelch pour calculer la densité spectrale de puissance de signal d'entrée (Clergeot, 1984).

### III .2.2. Généralités sur les estimateurs de la DSP

Durant cette étude, nous allons appliquer la méthode de WELCH basée sur l'analyse de Fourier dont le but est d'estimer la densité spectrale de puissance définie par l'équation ci-dessus (2.2.) en se fondant sur la transformé de Fourier (**Jekkins and Watts, 1986**) ; (**Max, 1987**).

L'intérêt de cette méthode est qu'elle ne se réfère à aucun modèle, contrairement à la plupart des méthodes paramétriques. En fait, la performance de cette méthode dépend essentiellement du nombre de points du signal et ne pas de la bonne adéquation du signal avec le modèle présumé (**Durnerin, 1999**).

### III.2.3. La fenêtre spectrale

Tous les estimateurs de type Fourier ont des caractéristiques communes. La principale caractéristique est celle de la notion de fenêtre spectrale qui due au phénomène de durée limitée et à l'application d'une fenêtre d'apodisation, mais aussi à la structure de chaque méthode (**Kuno, 1980 ; Durnerin, 1999**).

### III.2.4. Principe du périodogramme :

La méthode de périodogramme (employée dans notre travail), se fonde directement sur les données pour estimer la DSP, en ne considérant que les points du signal.

$$\gamma_x(v) = \lim_{N \rightarrow \infty} \xi\{|X_N(v)|^2 / NT_e\} = \lim_{N \rightarrow \infty} \xi\left\{\frac{Te}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} X|n| e^{-2\pi jvnTe} \right|^2\right\}, \dots \dots \dots (III-5)$$

$X|n|$ ,  $0 \leq n \leq N$  est le signal à analyser et  $X(v)$  sa TFD.

Cette méthode va apporter des modifications au signal traité. Afin d'améliorer l'estimation de la DSP (**Durnerin, 1999**). La première modification envisagée par Welch pour le périodogramme est d'employer des fenêtres de pondération. Dans le cas du périodogramme, le découpage du signal en plusieurs segments de durée limitée a pour but de produire une fenêtre spectrale proportionnelle au module carré de la fonction porte (**Barlett, 1948 ; Welch, 1967**).

### III.2.5. Principes des différents estimateurs de type Fourier

En effet, il existe de nombreuses méthodes de traitement du signal se différencient selon leurs paramètres et leurs principes, pour notre cas, nous allons utiliser la méthode de Welch appelée parfois tout simplement périodogramme moyennée.

#### ➤ Principe de la méthode Welch

Le principal problème de cette méthode est d'être un estimateur non consistant, alors que la variance normalisée de l'estimateur reste constante malgré le fait que le nombre de points du signal augmente (**Mathews, 1987**).

Historiquement, Bartlett (**Barlett, 1948**), a tout d'abord introduit une méthode qui a pour but de découper le signal à traiter en segments qui ne se recouvrent pas, pour ensuite calculer le périodogramme de chaque segment et de moyenniser enfin l'ensemble de ces périodogrammes. L'objectif était de produire un estimateur consistant. En 1967, **Welch** a modifié cette méthode pour utiliser des fenêtres de pondération et ce, afin de permettre le recouvrement entre les segments. Le but de ce recouvrement est d'augmenter le nombre de segments et d'en diminuer la variance de l'estimateur. Cette méthode est devenue très populaire de par sa robustesse, sa relative simplicité et la possibilité de la programmer aisément dans un système temps-réel. C'est d'ailleurs la méthode de tous les analyseurs de spectre numérique

### III.2.6. Définition de Pwelch (périodogramme de Welch) :

#### ➤ Le périodogramme :

C'est l'estimation de la densité spectrale d'énergie qui consiste à calculer la transformée de Fourier du signal observé sur une période temporelle discrète (**Johnson and Long, 1999**). Et afin d'améliorer les performances du périodogramme, **Welch (1967)** a proposé la variante que nous détaillerons ci-après.

### III.2.7 .Estimateur de WELCH

Celui-ci, rajoute la possibilité d'utiliser des segments et multiplie chaque segment par une fenêtre de pondération  $W$  et ce, afin de maîtriser les pics secondaires des périodogrammes élémentaires. Et chaque section est intégrée dans un système de fenêtrage contenant des fenêtres dont le type est choisi préalablement par l'utilisateur. Ensuite, huit périodogrammes modifiés sont calculés et ramenés à une moyenne (**Fleury, 2001**).

En effet, la méthode Welch est basée sur les points suivants:

- 1- Le signal est divisé en segments qui se chevauchent (overlapping) : le segment original de données est divisé en  $L$  segments de données d'une longueur  $M$  se chevauchant sur  $D$  points. Le pourcentage de ce chevauchement étant variable à souhait. En effet, la taille des segments  $M$  doit être inférieure à  $N$  (nombre de point du signal à analyser) (**Durnerin, 1999**).
- 2- Les segments de recouvrement sont alors représentés dans des fenêtres : à chaque segment de donnée  $L$ , sera attribuer une fenêtre (dans le domaine temporel). Ce sont ces fenêtres qui font de cette méthode un périodogramme modifié. Le choix d'un type de fenêtre influe peu sur la variance de la densité spectrale de puissance estimée et sur la résolution de cette densité spectrale de puissance. Son rôle est surtout prépondérant pour diminuer les fuites d'énergie (**Johnson and Long, 1999**).
- 3- Une manière de réduire la variance de l'estimateur est de subdiviser l'intervalle de définition du signal en un certain nombre de sous-intervalles. On calcule alors la moyenne des densités spectrales sur chacun des sous-intervalles. Ce qui fait de cette méthode, un périodogramme est moyenné. Le décalage entre segments influe sur la variance de l'estimateur, mais n'a aucune influence sur la résolution. Ainsi, le décalage est en général fixé par le choix de la fenêtre d'apodisation pour diminuer au maximum la variance de l'estimateur (**Durnerin, 1999**).

#### ➤ Utilisation de la méthode de Welch en océanographie

La transformée de Fourier impose une hypothèse de stationnarité du signal sur son contenu fréquentiel. Or, pour l'étude des signaux océanographiques, qui sont des signaux naturels non stationnaires, la méthode de Welch est favorisée, vu qu'elle va diviser le signal en plusieurs sous-séquences afin d'être considéré comme stationnaire pour chaque sous-séquence. De plus, le recouvrement de ces sous-séquences va réduire considérablement les erreurs d'estimation du spectre de fréquence.

### ➤ Noverlap

Indique le nombre d'éléments de données qui se chevauchent entre les segments adjacents de données. La valeur par défaut est la longueur qui se traduit par un chevauchement de la moitié des éléments de données entre les segments adjacents.

Le périodogramme de Welch nécessite :

- Une longueur de fenêtre qui ne dépasse la longueur de la FFT
- NOVERLAP doit être strictement inférieur à la fenêtre
- Les valeurs doivent être entières positives pour nfft et NOVERLAP

### ➤ La fenêtre Hamming

La fenêtre de Hamming est une fenêtre moyenne entre un pic principal étroit et un amortissement modéré des pics secondaires. On distingue dans cette fenêtre le pic principal et les pics secondaires. On peut atténuer l'amplitude de ces dernières en utilisant une fenêtre de pondération telle que la fenêtre de Hamming (**Dumas et Bennevaut, 2001**).

## III.3. Le logiciel Matlab

Il fut conçu initialement (au milieu des années 80) pour manipuler aisément des matrices à l'aide des fonctions préprogrammées (addition, multiplication, inversion,...), en s'affranchissant les contraintes des langages de programmation classique.

### III.3.1. Définition et utilité

MATLAB est un langage de calcul scientifique de haut niveau développé par la société the Math Works. Il est devenu un outil incontournable pour l'ingénierie et recherche scientifique. De par sa simplicité d'utilisation et sa puissance de calcul et de visualisation.

Le nom de Matlab vient de Matrix LABORatory, les éléments de données de base manipulés par MATLAB étant des matrices (pouvant bien évidemment se réduire à des vecteurs et des scalaires) qui ne nécessitent ni dimensionnement ni déclaration de type (**Mokhtari et Marie, 1988**). Il se présente avant tout comme un langage de commande dont la caractéristique est d'être interprétée ; il permet donc d'utiliser simplement des structures de données et d'écrire rapidement des programmes assez complexes.

Les opérations et fonctions MATLAB permettent de manipuler directement et interactivement des données matricielles, rendant ainsi MATLAB particulièrement efficace en calcul numérique, analyse et visualisation de données en particulier (Mokhtari, 2000).

Au logiciel de base s'ajoutent, selon la configuration choisie, les fonctions provenant d'une série de boîtes à outils (toolbox) dédiées à des domaines techniques spécifiques, comme :

- Le traitement de signal (signal processing toolbox),
- La régulation automatique (control system toolbox),
- L'identification (system identification toolbox),
- Le calcul symbolique (symbolic math toolbox),
- ...etc.

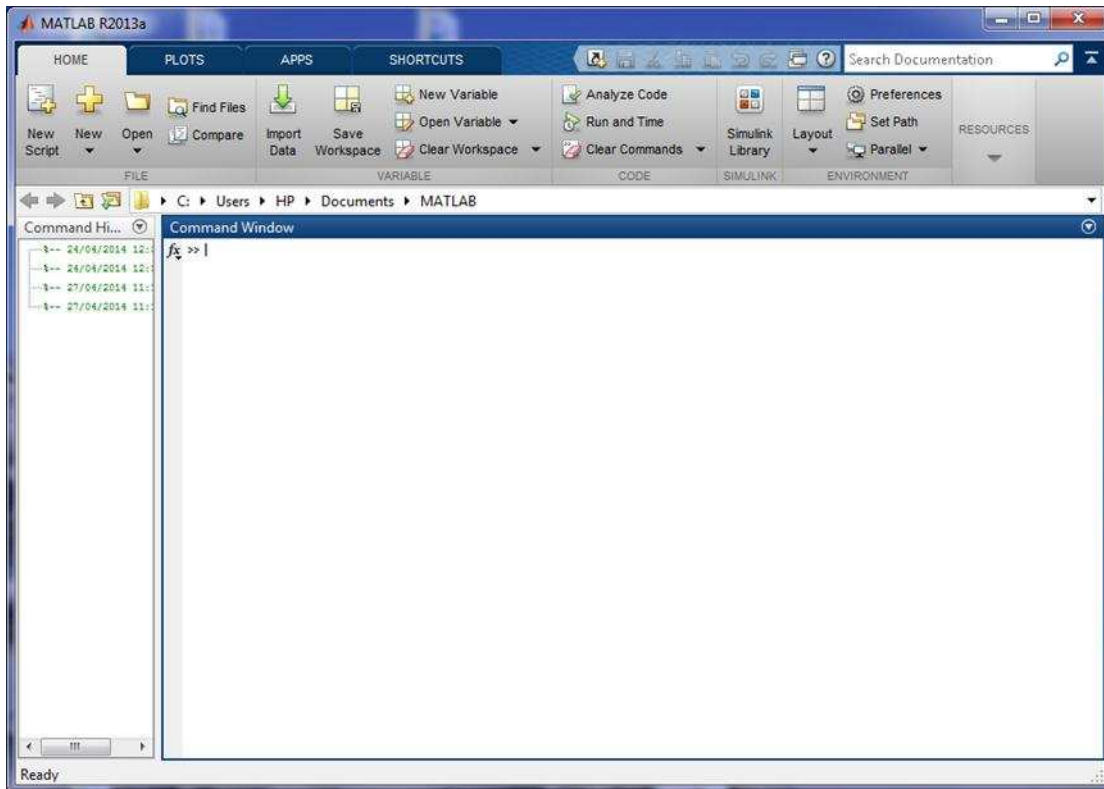
### III.3.2 Espace de travail dans Matlab

L'utilisation de MATLAB peut se faire de façon interactive en exécutant des commandes directement après le prompt ou par des scripts, peuvent être des simples programmes ou des fonctions avec des paramètres d'appel et de retour. Ces fonctions sont très utiles dans la mesure où chaque utilisateur peut étendre les possibilités de MATLAB à son domaine d'application.

Matlab affiche plusieurs fenêtres sur l'écran. Les trois fenêtres les plus importants sont :

- **Command Window**, où toutes les commandes sont entrées (Figure n°19):

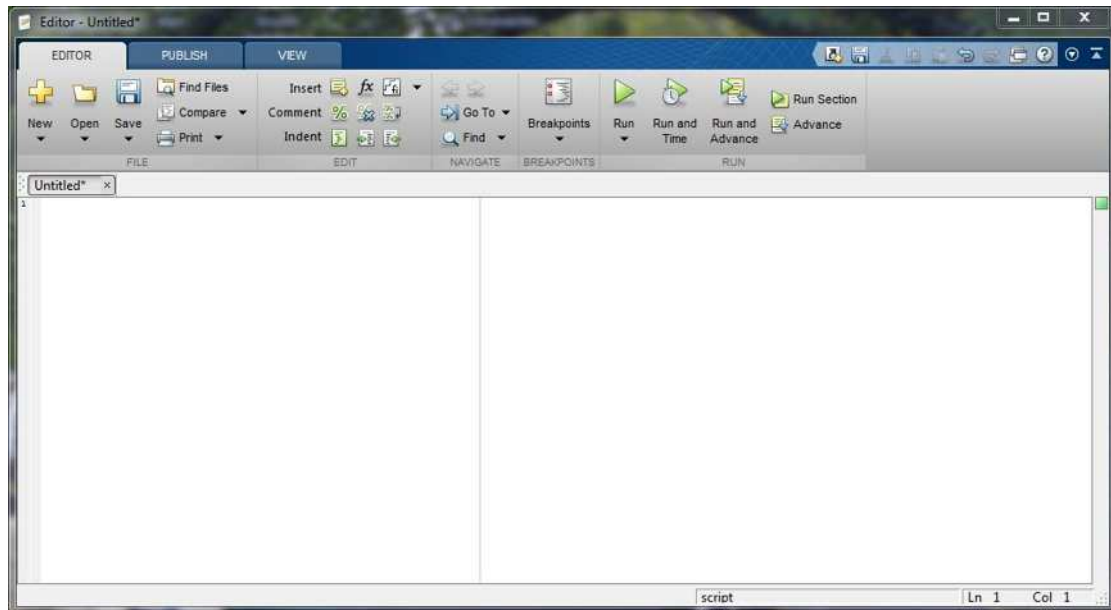
Une fois que MATLAB démarre, une fenêtre appelée command Window apparaît sur l'écran. L'utilisateur peut introduire multiples commandes ou équations mathématiques après le signe '>>' qui apparaît au côté gauche de la fenêtre. Pour exécuter une opération, il faut toujours appuyer sur la touche 'entrer' du clavier. De plus, il faut terminer l'opération par un point-virgule ';', sinon, toutes les étapes du calcul seront affichées sur l'écran sans avoir été exécutées.



**Figure 19. Présentation de fenêtre de commande (commandes window)**

➤ Edit Window :

Au lieu de taper les commandes individuellement et directement dans la fenêtre de commande, il est possible de créer un fichier 'm-file' qui contient toutes les fonctions et commandes nécessaires et qui peut être rapidement exécuté en tapant le nom du fichier dans la fenêtre de commande. Ces fichiers sont appelés 'script files' et se terminent avec l'extension 'm'. La fenêtre 'Edit Window' est utilisée pour créer ou modifier les 'm-file'. Et pour créer un nouveau fichier, il faut aller dans le menu de sélection : FILE/NEW/M-FILE. La fenêtre Edit Window peut être vue comme un éditeur de texte (Figure n°20).



**Figure 20. Présentation de fenêtre d'Editor (Edit Window)**

➤ Fenêtres des figures : (figure Window) :

Cette fenêtre est utilisée pour afficher des graphiques en 2 et en 3 Dimensions. et la commande plot est utilisée pour afficher le dessin sur l'écran (Figures n°21-22):

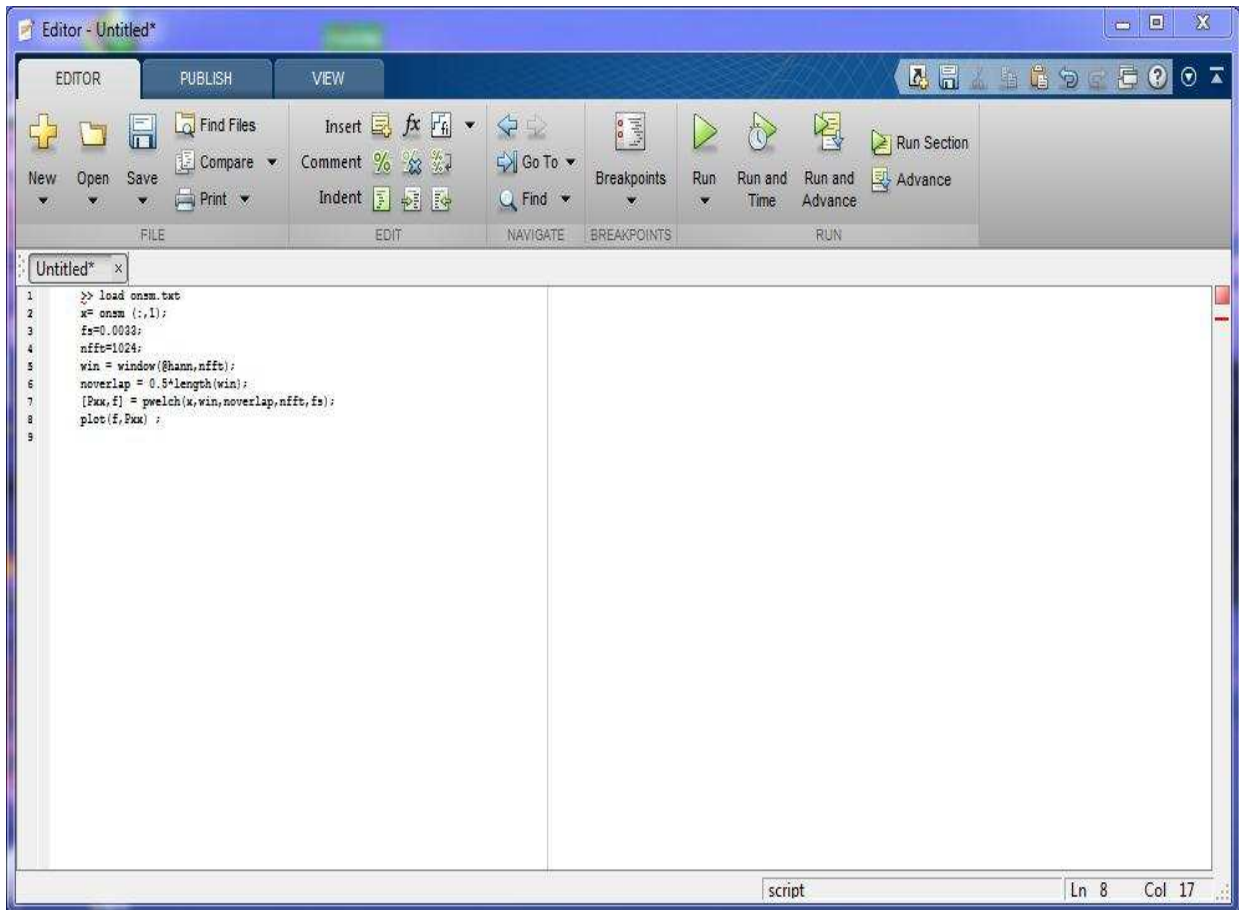


Figure 21. Présentation de fenêtre d'Editor avec la commande plot

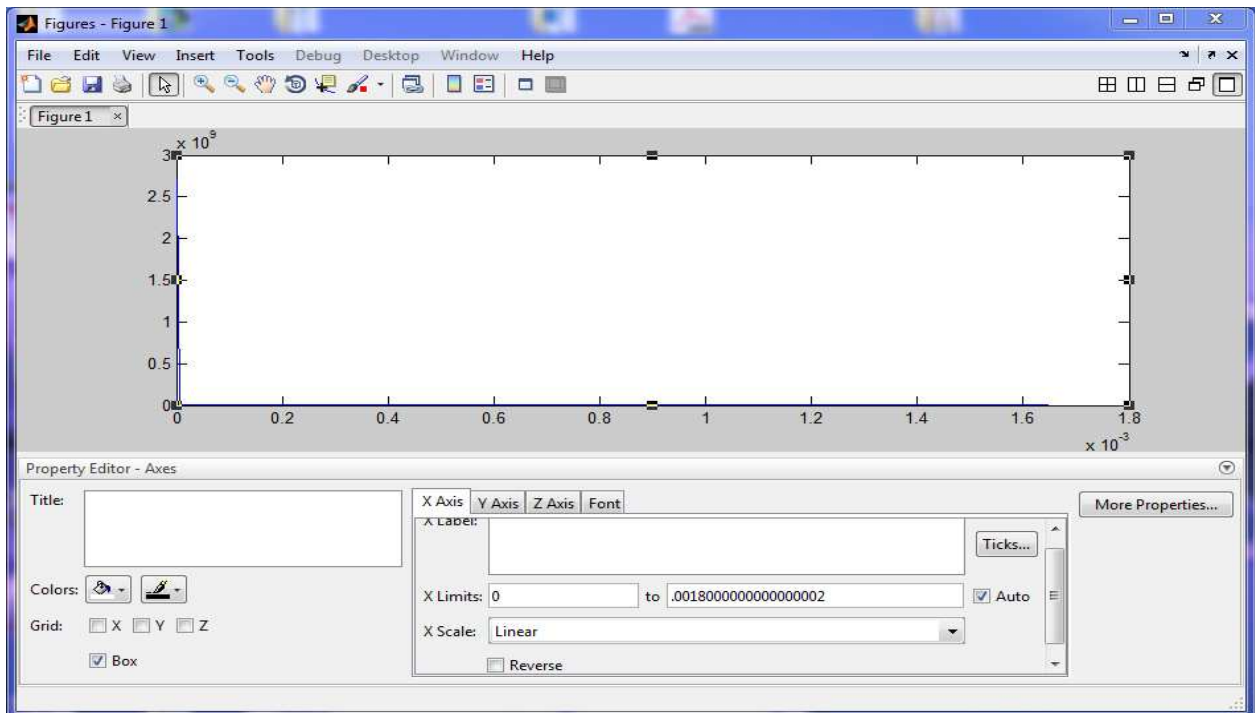


Figure 22. Présentation d'un plot (figure window)

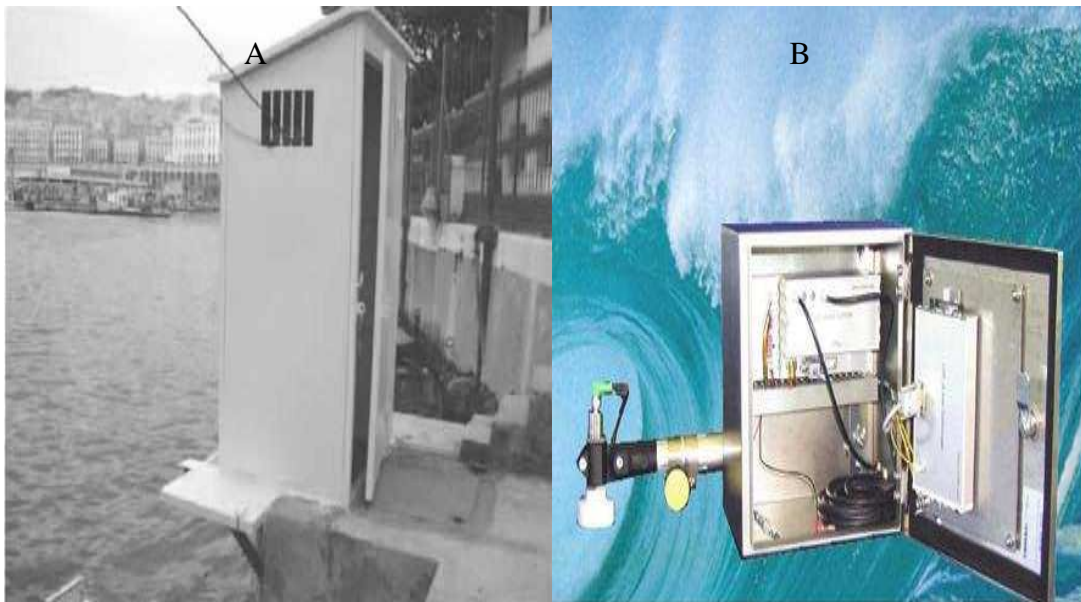
### III.4. La méthodologie utilisée dans cette étude

Dans cette étude, nous avons privilégié une approche méthodologique basée sur le traitement du signal et ce, afin d'ausculter le signal du niveau de la mer mesuré par un marégraphe de type Acoustique "**Log a-Level**" basé sur un capteur à ultrasons qui se trouve à l'Amirauté au port d'Alger, durant la période comprise entre 2011 et 2013. Ainsi, nous avons appliqué deux méthodes ; la densité spectrale de puissance et les filtres qui ont permis, respectivement, d'étudier les différentes fréquences énergétiques contenu dans le signal brut et de séparer les différentes ondes marines contenues dans le signal brut du niveau de la mer. Pour ce faire, nous avons utilisé deux logiciels optimisés pour ce type de traitement (MATLAB et SIGVIEW).

#### III.4.1. Analyse d'un signal du niveau de la mer

➤ **Choix de la région et de la période de mesure**

L'objectif de ce travail est d'essayer de comprendre le phénomène de la hausse soudaine du niveau de la mer et d'essayer de déterminer la contribution des différentes composantes qui le constituent. Cependant, en présence du marégraphe numérique de type acoustique de l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) installé au niveau du port d'Alger, nous avons pu ausculter le signal du niveau de la mer mesuré par ce marégraphe (Figure n°23).



**Figure 23.** Site marégraphe d'Alger : A) site du marégraphe ; B) capteur du marégraphe à acquisition automatique (Source INCT).

Pour les besoins de ce travail, nous avons retenu les données de mesures du niveau de la mer pour une période de neuf mois, réparties sur trois ans (2011, 2012,2013) comme le montre le tableau ci-dessous.

**Tableau 4. Période de mesure des données marégraphiques retenue**

Période de mesure Année	Période de mesure retenue		
2011	Octobre	Novembre	Décembre
2012	Février	Mars	Avril
2013	Janvier	Février	Mai

#### ➤ Présentation des données marégraphiques

Les données utilisées sont celles collectées dans la période répartie sur trois années (2011,2012, 2013) avec un échantillonnage d'une minute. Ces données sont stockées dans un fichier sous format ASCII. Toutes les données sont exprimées en heures universelles (TU+0). Le système altimétrique de référence est le Niveau Général Algérien (NGA).

Pour pouvoir exploiter les données marégraphiques, il faut d'abord filtrer le bruit contenu dans le signal marégraphique, puis calibrer le signal filtré.

Le niveau de la mer référencé au zéro hydrographique est obtenu par l'une des équations suivantes :

$$\Delta h = N_1 + N_2 - \text{lecture de la hauteur intérieure}$$

$$\Delta h = N_1 + N_3 - \text{lecture de la hauteur extérieure}$$

Où :

$N_1$  représente l'altitude du sommet du puit du marégraphe par rapport au Nivellement Général Algérien (NGA),

$N_2$  est l'altitude de la plate-forme du marégraphe par rapport au (NGA),

$N_3$  est l'altitude du zéro du NGA par rapport à l'altitude du Zéro Hydrographique et qui est fixé à 34 cm (Hadad, 2006).

Après le filtrage, les données marégraphiques subissent une phase de calibration avant les utiliser pour le traitement.

#### II.4.2. La procédure utilisée dans Matlab

Dans un premier lieu, nous avons ouvert un répertoire désigné pour MATLAB dans lequel nous avons sauvegardé les fichiers nommé Works Matlab. Puis, à l'ouverture du MATLAB, il faut s'assurer toujours qu'on travaille dans le véritable répertoire dont notre fichier est enregistré, sinon on obtiendra des erreurs. Dans notre étude le fichier qui contient les données nécessaire pour notre travail est mis dans répertoire 'C:/utilisateurs/KAD/Workmatlab' (Figure n°24):

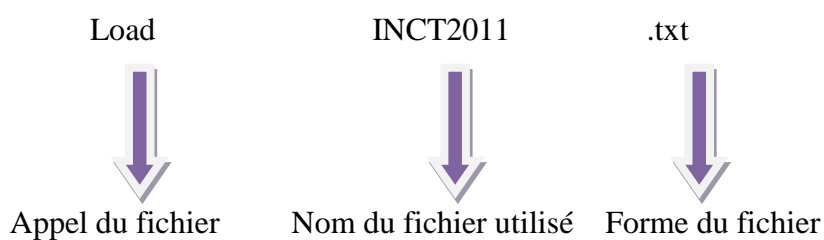


**Figure 24.** Présentation de l'emplacement des fichiers de MATLAB

Après avoir donné un emplacement à notre fichier contenant les données numériques destinées au traitement, nous commençons à programmer notre code.

➤ La programmation du code :

Une fois sur Matlab, nous ouvrons la fenêtre « editor » dans laquelle nous allons écrire notre code. Puis, nous recherchons notre fichier en utilisant :



Nous définissons  $x$  avec :  $X = \text{INCT 2011}(:,1);$

X représente la hauteur  
du niveau de la mer

Le nom du fichier la colonne que prend  $x$   
dans le fichier

On utilise le point-  
virgule pour terminer  
l'instruction

Par la suite, on va définir la méthode utilisée dans ce travail qui est Pwelch pour estimer la densité spectrale de puissance.

### Langage de programmation Matlab

La méthode de Welch est représentée sur Matlab par la fonction **pwelch**. Elle s'écrit comme suit :

```
load Nom du fichier.txt
x=Nom du fichier(:,1);
fs=0.0033;
nfft=1024;
win = window(@hann,nfft);
noverlap = 0.5*length(win);
[Pxx,f] = pwelch(x,win,noverlap,nfft,fs);
loglog(f,pxx)
```

Où :

- **Nom du fichier** : Le titre du fichier contenant les données à utiliser dans les calculs.
- **X** : Correspond aux variations du paramètre à étudier en fonction du temps et qui est représenté dans le fichier par la 1<sup>ère</sup> colonne du tableau des données.
- **Fs** (Sampling frequency) : La fréquence d'échantillonnage en (Hz).
- **Nfft** : La longueur du segment ou plus précisément, la taille de la mémoire associée à chaque segment (généralement une puissance de 2).  
Par exemple, un bloc de  $N = 1024 = 2^{10}$  échantillons temporels.
- **Win** (window) : La fonction de fenêtrage appliquée.

- **Hann** : Le type de fenêtre (Hann ou fenêtre glissante dans ce cas).
- **Loglog(f,pxx)** : Correspond à la représentation logarithmique des amplitudes ou des densités spectrales de puissance (pxx) en fonction des fréquences (f).

### Qu'est -ce que la fenêtre Hann ?

Afin de comprendre la notion de fenêtre de Hann, il est indispensable de passer par la notion de fenêtrage. Avec un ordinateur, il est impossible de calculer la transformée de Fourier d'un signal discret. En effet, il faudrait un temps et une mémoire infinie. Ainsi, on est contraint de travailler avec un nombre fini de points N.

Le fenêtrage sert à rendre le signal **périodique** sur la durée d'analyse. Pour ce faire, on va multiplier le signal temporel dans la mémoire par une fonction temporelle périodique (fenêtre d'analyse ou de troncature), de période égale à la durée d'examen du signal, qui commence par 0 et fini par 0. On construira donc un signal tronqué qui sera limité à N échantillons **(Dumas et Bennevault, 2001)**.

Parmi les différentes fenêtres de pondération utilisées, nous citons la fenêtre rectangulaire, triangulaire, de Hann, de Hamming, de Blackman, de Kaise-Bessel, ...etc.

Le type de fenêtre est à choisir selon ce qu'on souhaite observer d'un spectre. En effet, Le choix d'une fenêtre dépend de l'analyse à effectuer ainsi que de la nature du signal étudié **(Carre, Roullier, 1975)**.

Le tableau suivant résume les domaines d'utilisation des différents types de fenêtres :

**Tableau 5.**Le domaine d'utilisation des différentes fenêtres de pondération

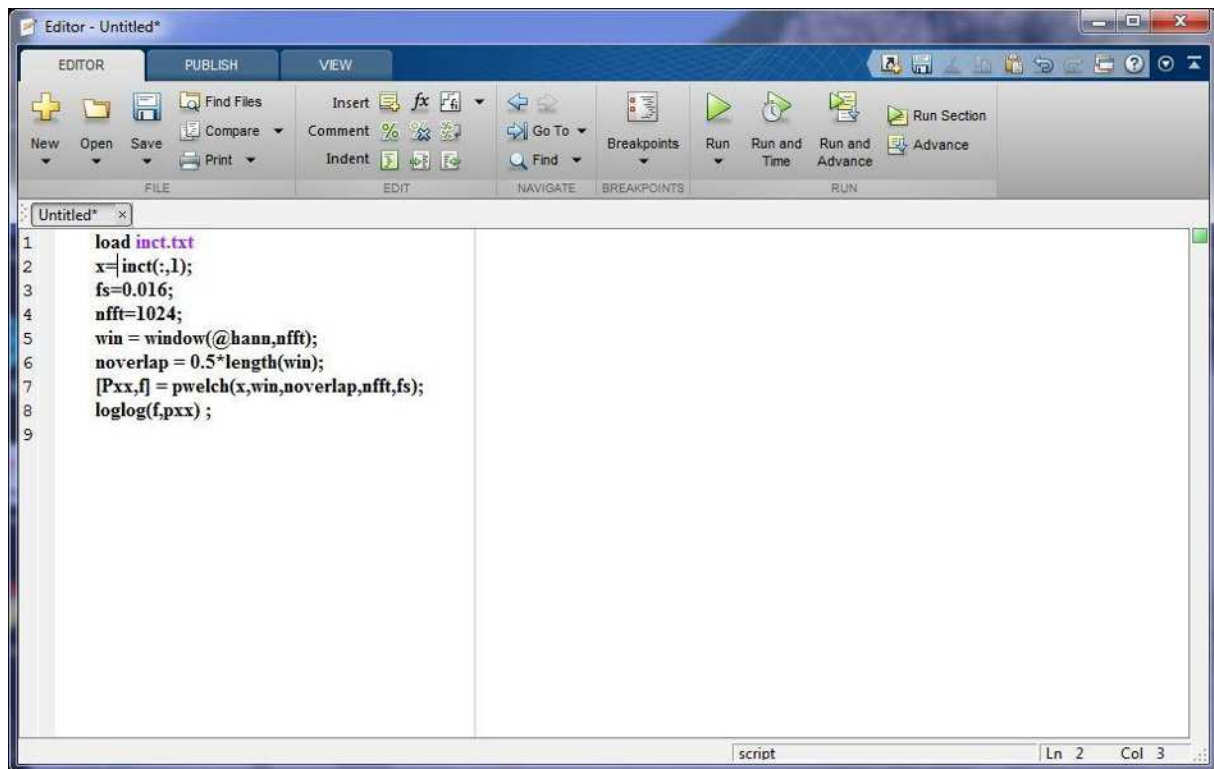
Fenêtre	Utilisation
<b>Rectangulaire</b>	Tout le signal entre dans un bloc temporel
<b>Hanning</b>	Signal pseudo-stationnaire
<b>Hamming</b>	Meilleure résolution en fréquence
<b>Kaiser-Bessel</b>	Meilleure résolution en amplitude
<b>Flat Top</b>	Étalonnage

En traitement du signal, la fenêtre de Hann est une fonction de fenêtrage qui peut être vue comme un cosinus sur une plateforme. Elle est définie par la fonction suivante :

$$w_n = \begin{cases} 0.5 \left[ 1 - \cos \frac{2\pi n}{N} \right] & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

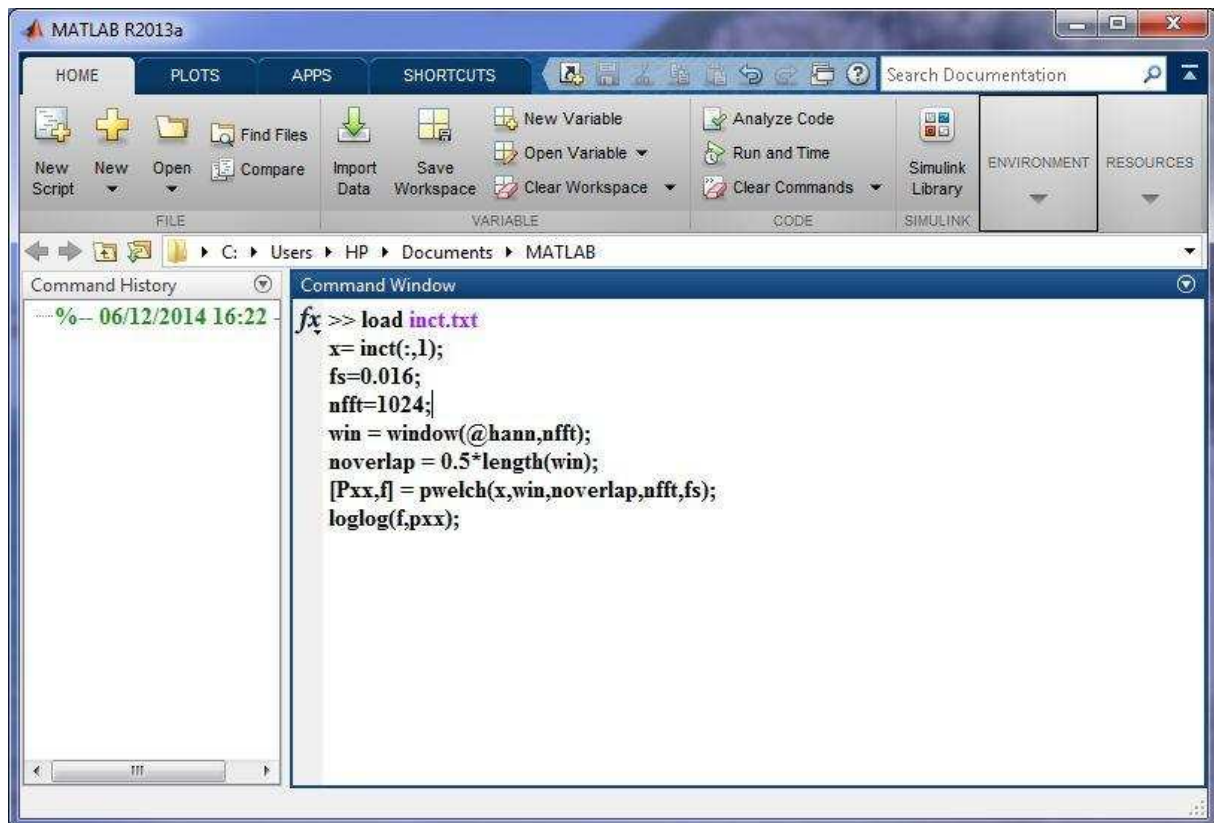
#### Avantage et inconvénient

Après avoir défini la méthode que nous allons utiliser, nous ouvrons ensuite l'espace Editeur pour taper notre code (Figure n°25).



**Figure 25.** Présentation du code dans la fenêtre d'editor

Une fois qu'on termine l'écriture du code dans la fenêtre d'Editor, nous collons une copie du code dans la fenêtre de commande Window (Figure n°26):



**Figure 26.** Présentation du code dans la fenêtre Commande

Puis, en cliquant sur entrée nous aurons les spectres de nos signaux obtenus par rapport aux paramètres choisis.

### III.5. Filtrage numérique du signal du niveau de la mer

Parce que chaque type d'onde marine a sa propre gamme fréquentielle, et dans le but de séparer les différentes harmoniques que peut contenir un signal brut, nous avons appliqué la méthode de filtrage dans le domaine de Fourier qui permet de séparer et isoler les différentes ondes marines contenues dans le signal du niveau de la mer.

En effet, le filtrage est un processus qui consiste à enlever ou permettre le passage de certaines fréquences d'un signal (**Delencre,2009**). En ce qui concerne notre étude nous allons utiliser le filtre pass-band (bande passante), mais il existe d'autres filtres dont on peut citer :

**Les filtres passe-bas** : consistent à bloquer le passage des hautes fréquences, en ne laissant passer que les ondes de basses fréquences.

**Les filtres passe-haut** : Il a pour objectif d'isoler la bande de haute fréquence et de faciliter la détection du phénomène que représente cette fréquence. Un filtre passe-haut est appliqué à la surcote par exemple. En effet, le but est de garder uniquement les fréquences caractéristiques du phénomène qu'on veut étudier sans altérer l'amplitude de ce dernier (Rabinovich, 2009).

**Les filtres passe-bandes** : permettent seulement le passage des fréquences faisant partie d'une marge spécifique.

### III.5.1. Filtre bande-passante

En premier lieu, et à l'aide du logiciel MATLAB nous avons tracé le graphe qui représente les fluctuations du niveau de la mer au cours du temps en utilisant le simple algorithme suivant :

```
load inct11.txt;  
fs=0.016;  
x=inct(:,1);  
t=inct(:,2);  
plot(t,x);
```

Où:

**inct11.txt**: représente le fichier qui contient les données destinées aux calculs

**F<sub>s</sub> (Sampling frequency)** : La fréquence d'échantillonnage en (Hz).

**X** : Correspond aux variations du niveau de la mer en (cm) et qui est représenté dans le fichier par la 1<sup>ère</sup> colonne du tableau des données.

**t** : le temps en seconde

Après avoir obtenu le graphe du signal global, nous procédons à l'analyse de ce dernier en lui faisant subir des filtres band-pass (bande passante) et pass-high (passe-haut). Pour cela, on procède à ouvrir la boîte de dialogue pour choisir le type de filtre (band pass) ainsi la période du phénomène qu'on veut étudier. A ce propos, la période de la marée étant comprise entre

environ 4h et 24h, avec respectivement, les fréquences de 0.000069 et 0.000011 Hz. Quant à la gamme fréquentielle des autres ondes dues à l'élévation soudaine du niveau de la mer, nous avons retenu celles qui vont de 5 min à 3h, avec respectivement les fréquences de 0.0033 et 0.00009 Hz.

Dans le but de séparer ou extraire les différentes ondes contenues dans le signal brut du niveau de la mer, nous allons réaliser un filtre avec Butterworth sur MATLAB pour le signal enregistré avec un pas de mesure de 1 min (0.016Hz).

Le code utilisé pour le filtre pass-band (bande-passante) est le suivant :

```
load inct.txt;

fs=0.016;

x=inct(:,1);

t=inct(:,2);

plot(t,x) ;

grid

Fc1=0.0000069;

Fc2=0.000011;

[b,a]=butter(2,[Fc1 Fc2]/(fs/2));

f=filter(b,a,x);

hold on

plot(t,f,'r') ;
```

Où :

Fc1, Fc2 : représentant les fréquences de la bande passante pour la période entre 4h et 24h.

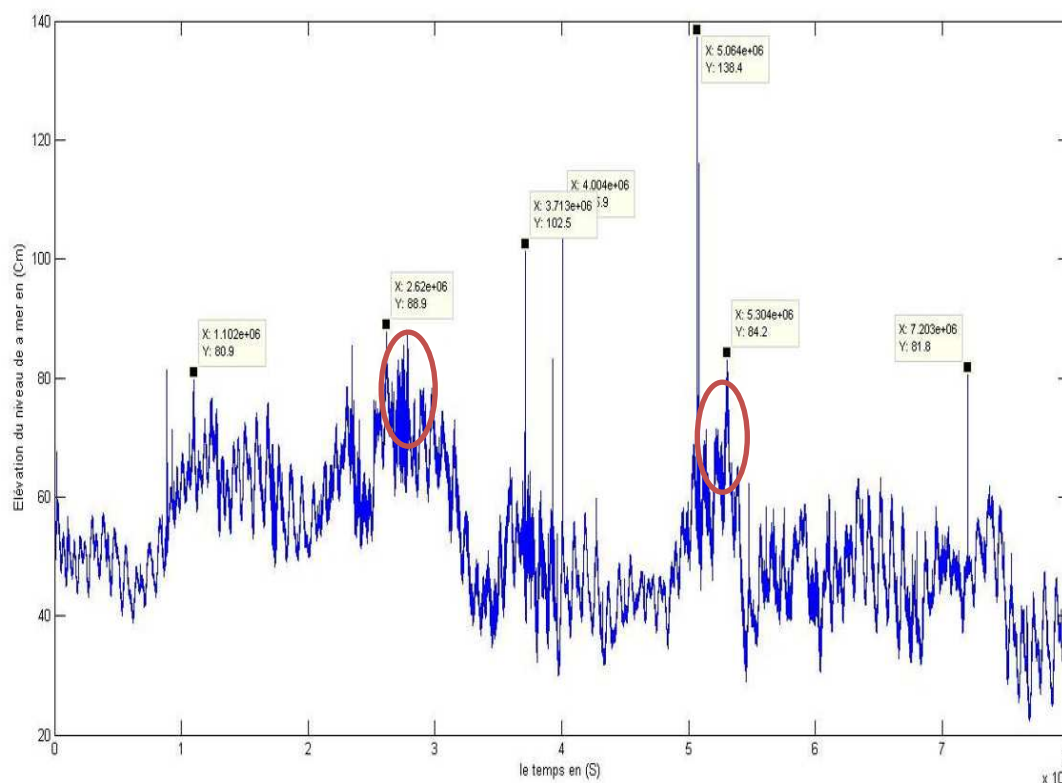
**[b,a]=butter(2,[Fc1 Fc2]/(fs/2))**: filtre bande passante de type Butterworth.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et Discussions**

Nous présentons dans cette partie les résultats des différents traitements (densité spectrale de puissance et filtrage) effectuées sur le signal brut du niveau de la mer comprenant les périodes où ces événements ont été survenus.

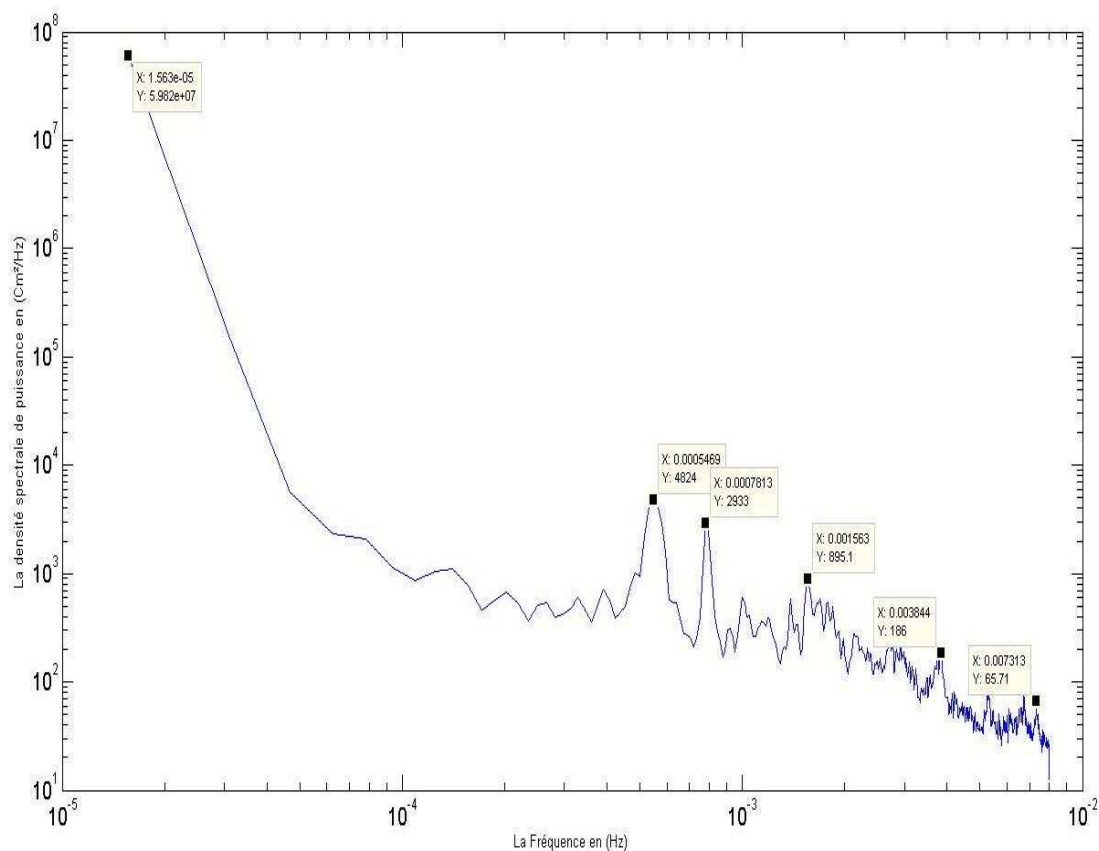
### VI.1. signal temporel brut du niveau de la mer entre le 01/10/2011 et 31/12/2011



**Figure 27.** Signal brut temporel prélevé entre 01/10/2011 et 31/12/2011 au niveau de la baie d'Alger.

La figure n° 27 montre les variations du niveau de la mer mesurées par le marégraphe durant la période qui va du 01/10/2011 jusqu'au 31/12/2011. On peut constater la présence des élévations significatives qui dépassent 80 cm, et ce vers la fin du mois d'octobre, puis le niveau de la mer baisse et varie entre 20 et 60 cm durant les deux premières semaines du mois de Novembre, puis il revient à élever et atteint son maximum vers la fin du mois de Novembre avec une amplitude de 84 Cm. durant le mois de Décembre le niveau de la mer varie légèrement entre 40 cm et 60 cm. vers la fin du mois de Décembre, le niveau de la mer baisse jusqu'il atteint une valeur minimale de l'ordre de 20 cm. alors l'analyse spectrale et les filtres appliquées au signal, nous aiderons à comprendre la cause de ces élévations soudaines du niveau de la mer.

### VI.1.1. Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global entre le 01/10/11/12 et 31/12/2011

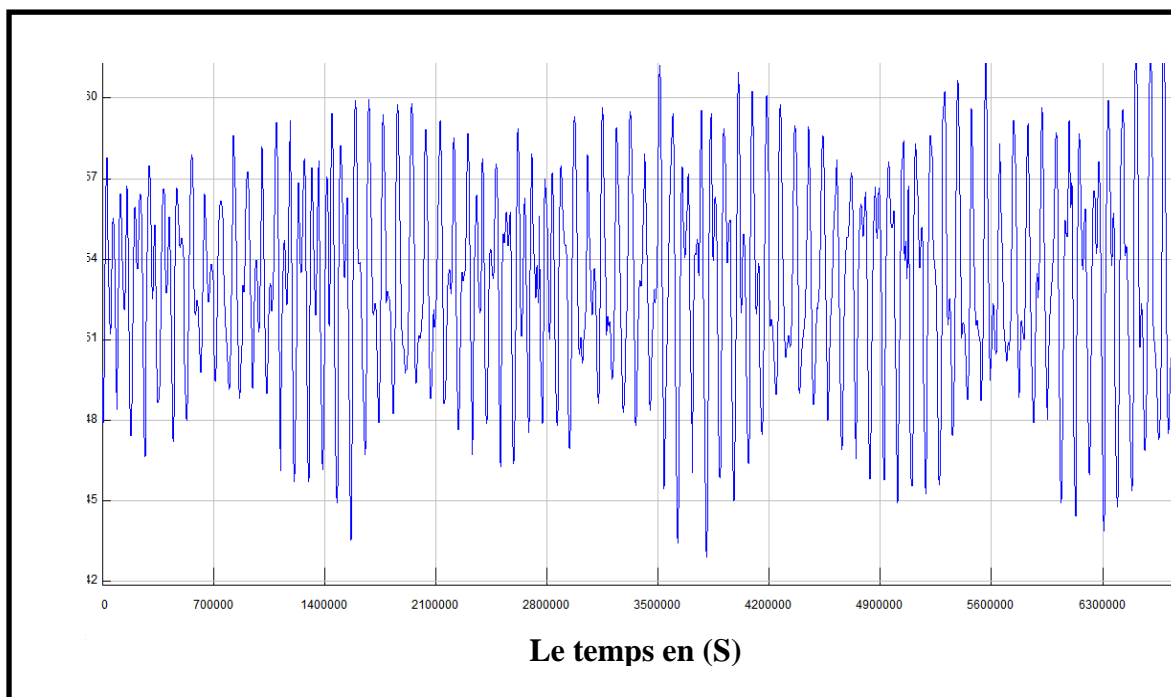


**Figure 28.** La densité spectrale de puissance des fréquences entre le 01/10/2011 et 31/12/2011.

Sur la figure n° 28, représentant les données accumulées durant trois mois de mesure, nous pouvons constater la présence des différentes ondes marines de hautes fréquences ( $T=2$  à  $5$  mn), avec une dominance d'ondes à basses fréquences, notamment aux alentours d'une période de ( $T=18$ h) représente la marée journalière diurne (Simon, 2005). Ainsi on peut remarquer l'apparition d'autres pics englobant l'intervalle comprise entre  $0.0005469$  Hz soit ( $30.47$  min) et  $0.0038$  Hz correspond à une période de  $4.33$  min. toutes ces fréquences appartiennent aux effets des seiches et tsunamis (Wilson, 1972). Si nous avons disposées des informations sur l'activité sismique durant cette période on peut déterminer l'origine de ces phénomènes. Vers les hautes fréquences un pic dont la fréquence est de  $0.007313$  Hz apparaît, peut être attribué à l'action des ondes infragravitaires induites par le déferlement des vagues à la proximité des côtes (Grasso, 2009).

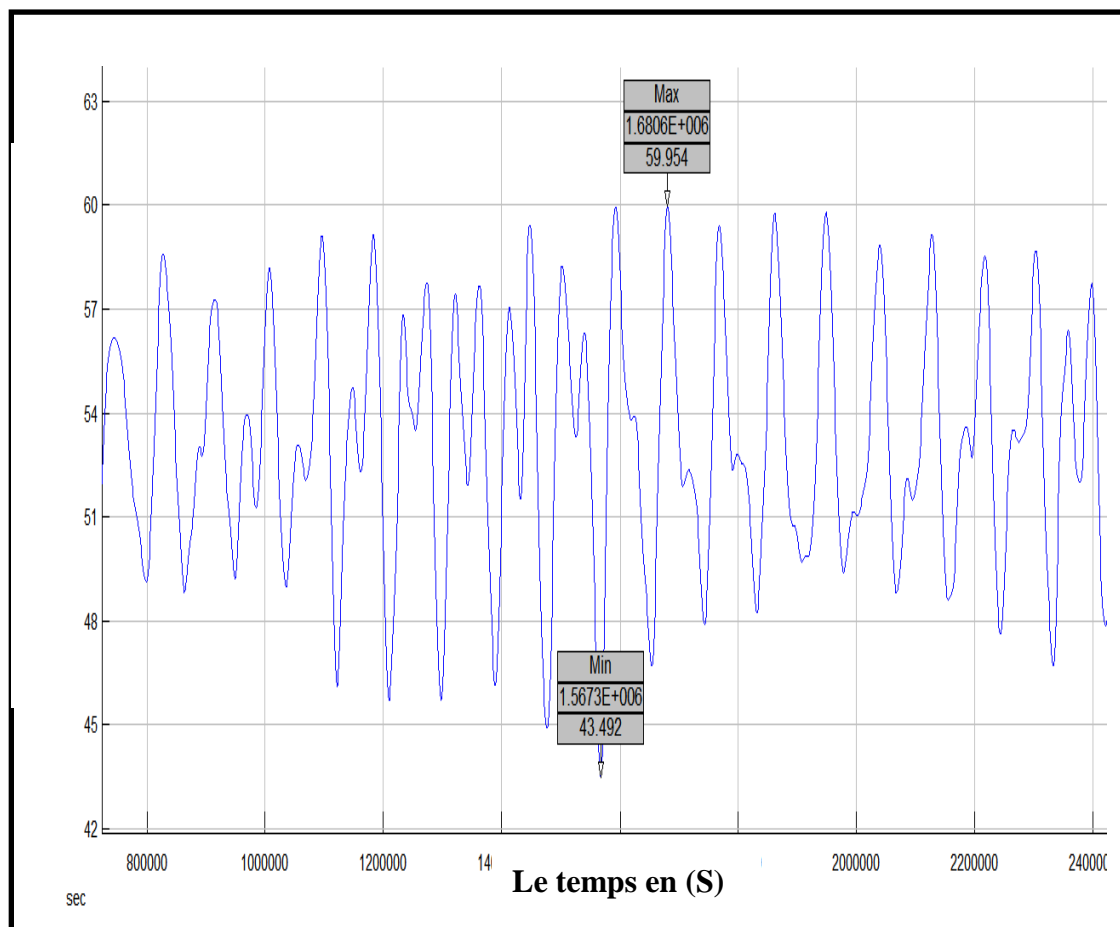
## VI.1.2. Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel

## a. Filtre band pass entre 4h et 24h



**Figure 29.**Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h pour la période entre le 01/10/2011 et 31/12/2011.

La figure n° 29, illustre les résultats du signal du niveau de la mer (baie d'Alger) filtré par *band pass* entre 4h et 24h et ce, pour la période allant du 01/10/2011 au 31/12/2011.les hauteurs enregistrées s'échelonnent entre 42cm et 63 cm, pour mieux caractériser le type de marée ainsi estimer le marnage maximal atteint durant cette période nous examinerons le zoom que nous avons effectué sur un segment du signal après filtrage. La figure n° 30, montre les détails de la marée pendant la durée de mesure que nous avons retenue.



**Figure 30.** Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre le 01/10/2011 et 31/12/2011.

La figure n°30, ci-dessus montre clairement que la marée qui domine notre région d'étude est de type mixte (succession de la marée diurne et semi diurne), avec une hauteur maximal de 59.95 cm et une hauteur minimale de 43.49 cm, ce qui donne un marnage maximal de 16.46 cm. ainsi nous avons pu déterminer la période propre de la marée de notre région d'étude. Celle-ci est de d'ordre de 23h pour la marée diurne et 4h pour la marée semi diurne.

Afin de déterminer les caractéristiques des phénomènes de basses pressions observées sur le signal global ainsi sur les résultats de densité spectrale d'énergie, et après avoir éliminé la marée nous aurons le spectre ci-dessous (figure n°31), qui représente les résultats du filtre band pass entre 2 min et 3h. Celles-ci représente l'élévation du niveau de la mer forcé uniquement par les conditions atmosphériques (météotsunamis et surcote).

b. Filtre band pass entre 2 min et 3h

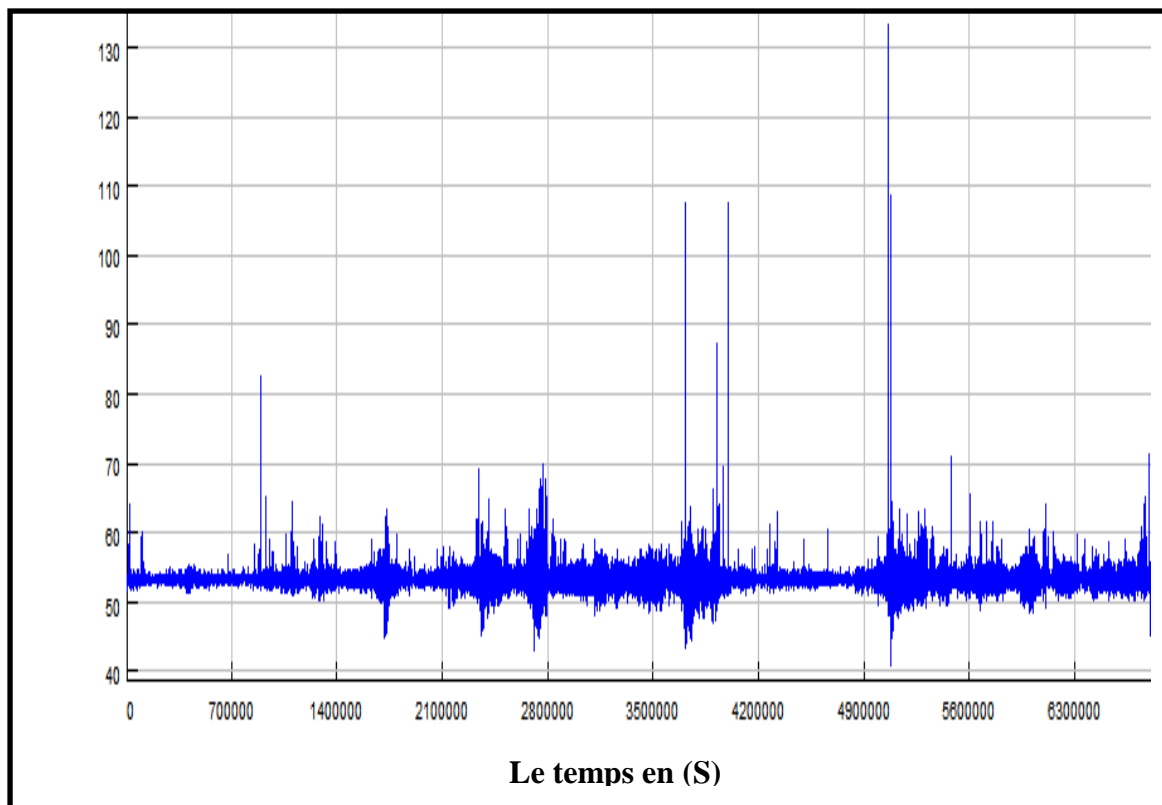


Figure 31. Résultats du filtre band pass entre 2 min et 3h de la période entre le 01/10/2011 et 31/12/2011.

VI.2. Signal brut temporel du niveau de la mer durant la période entre le 14/02/2012 à 14/03/2012

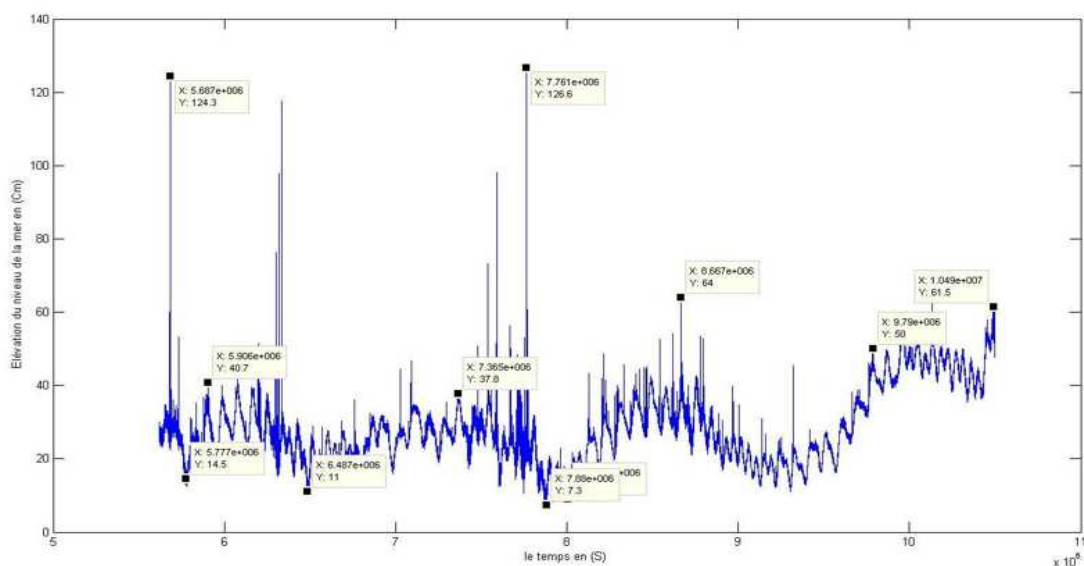
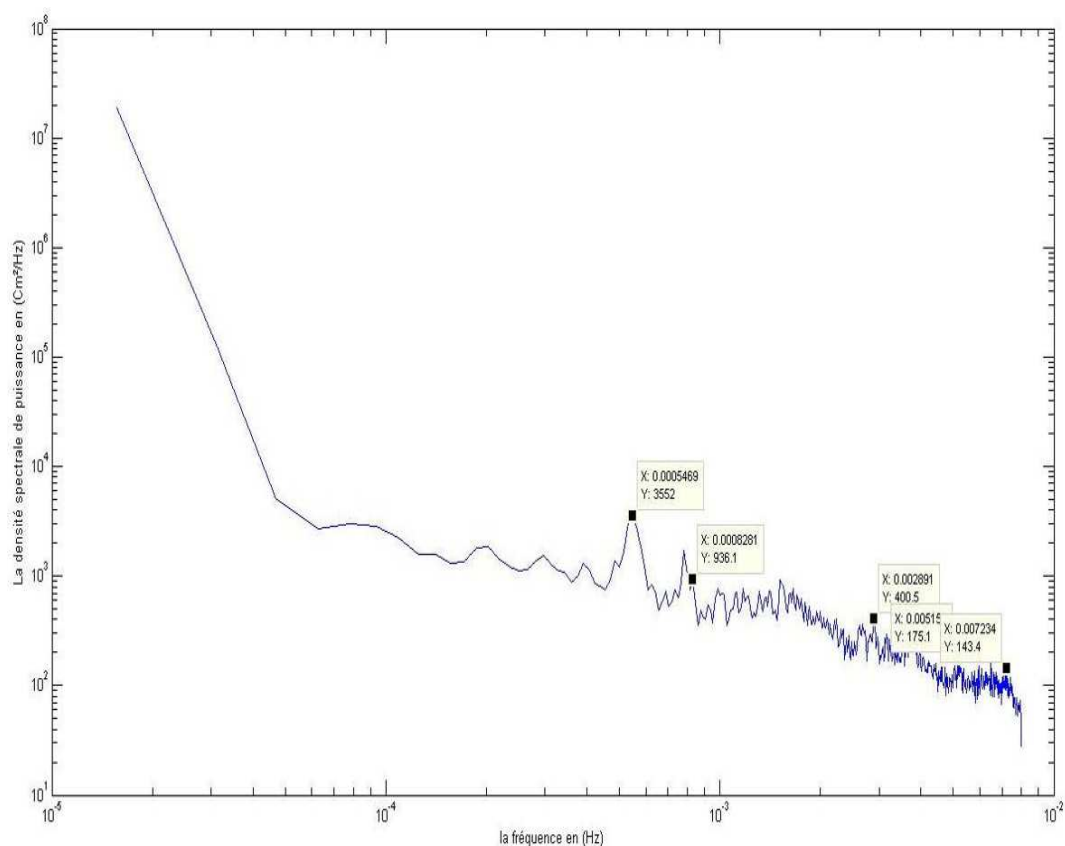


Figure 32. Signal brut temporel entre le 14/02/2012 et 10/04/2012 au niveau de la baie d'Alger.

La figure n°32, représente le signal du niveau de la mer mesuré par le marégraphe numérique de L'INCT localisé au port d'Alger, durant la période qui s'étale du

14/02/2012 à 00h : 00 jusqu'au 10/04/2012 23 :59 min, la simple observation de cette figure montre que la hauteur du niveau de la mer fluctue entre une valeur minimale de 7.3 cm et une valeur maximale de 64 cm avec une valeur moyenne de 37.8 cm. aussi, on constate la présence de quelques pics isolés dépassants 120 cm peuvent être expliqués par des erreurs affectant la mesure marégraphique. Dans le but de comprendre la cause des élévations significatives observés sur le signal temporel ainsi de déterminer les différentes ondes marines contenues dans le signal du niveau de la mer durant cette période, on procède à estimer la densité spectrale de puissance pour ce signal en utilisant la méthode de Welch détaillé dans la partie précédente.

### VI.2.1. Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global



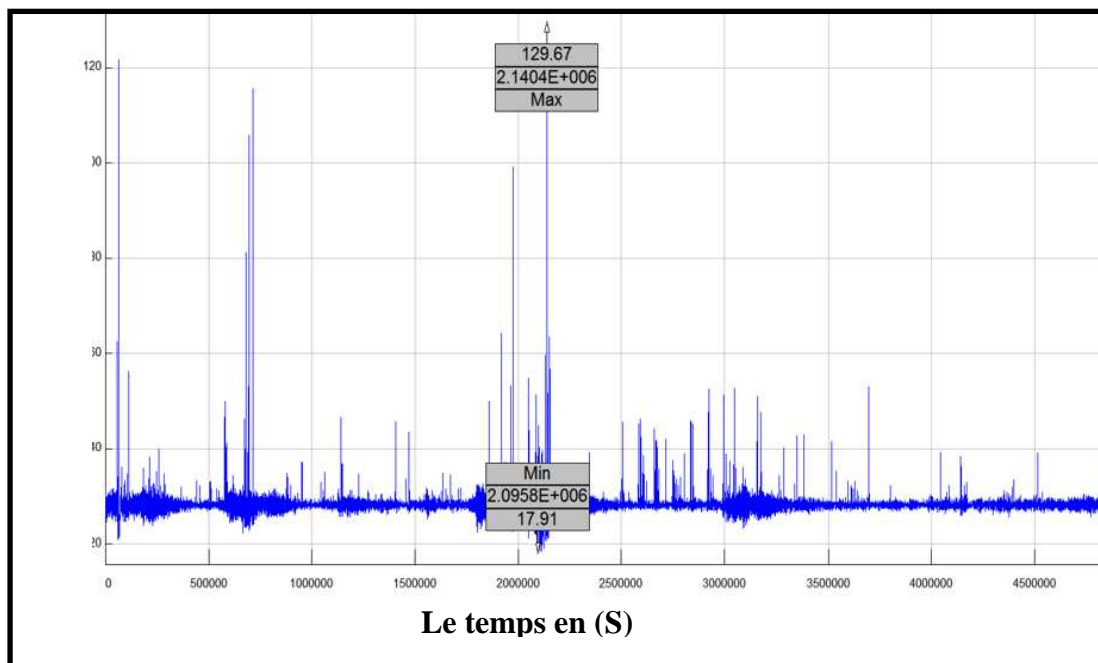
**Figure 33.** La densité spectrale de puissance des fréquences entre le 14/02/2012 et 10/04/2012.

Sur la figure n° 33, représentant les données accumulées durant la période comprise entre le 14/02/2012 et le 10/04/2012, nous pouvons constater la présence de différents types d'ondes marines avec une dominance d'ondes à basses fréquences, notamment on peut remarquer la présence de plusieurs pics dont les fréquences sont successivement 0.0005499 Hz soit (30.30 min), 0.0008281 Hz soit (20.12min), 0.00515 Hz soit (3.23min), toutes ces ondes de basses fréquences appartiennent à la gamme fréquentielle des tsunamis et météotsunamis (seiches). En allant vers les hautes fréquences on remarque la présence d'un pic ayant une fréquence de 0.007234 Hz soit une période de 2.30 min appartenant à l'intervalle des ondes infragravitaire.

D'après ces résultats on peut constater la dominance des phénomènes de basses fréquences, cela peut être expliqué par des perturbations climatiques spécifiques durant cette période. Afin de déterminer la nature de ces ondes de basses fréquences, et le type de la marée présente dans notre région (baie d'Alger), nous avons appliqués un filtre band pass sur le signal temporel brut.

### VI.2.2. Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel entre le 14/02/2012 et 10/04/2012

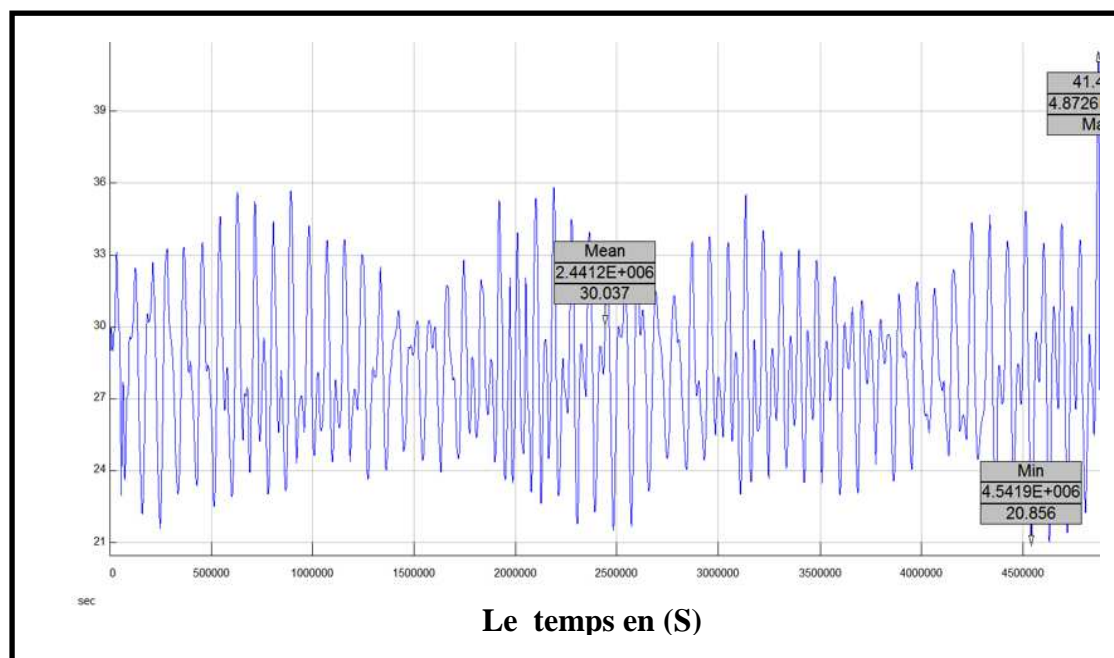
#### a. Filtre band pass entre 2 min et 3h



**Figure 34.** Résultats du filtre band pass entre 2min et 3h pour la période entre le 14/02/2012 et 10/04/2012

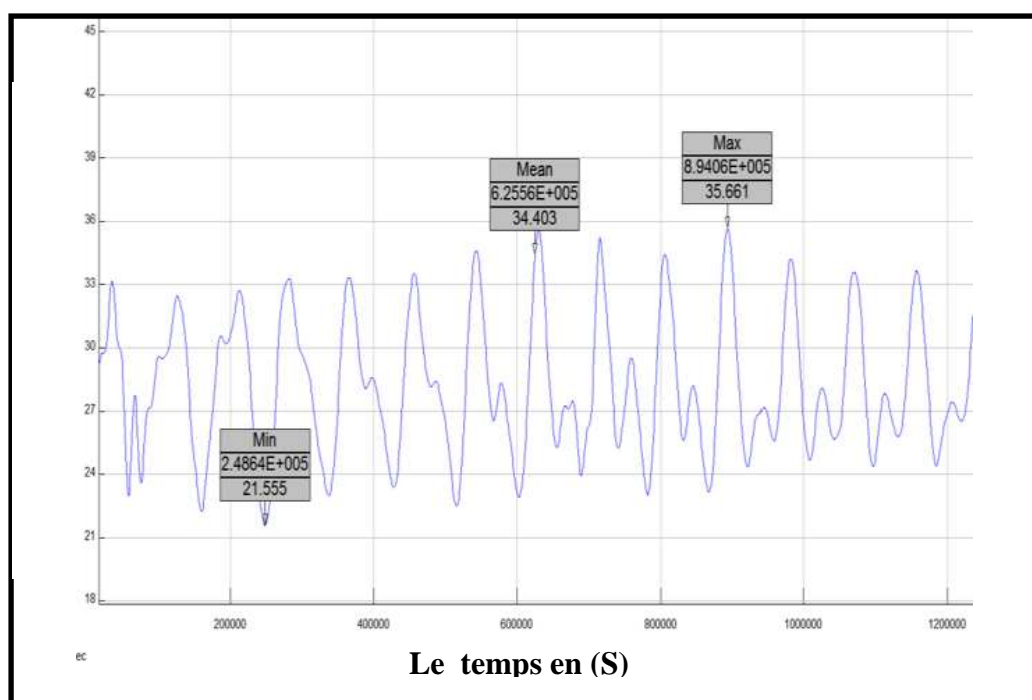
Sur la figure n°34, représentant le résultat du filtre bande passante entre 2 min et 3h opéré sur le signal temporel, on remarque la présence des ondes stationnaires dont l'amplitude fluctue entre 17.9 cm et 40 cm, ces ondes de basses fréquences provoquent des élévations soudaines du niveau de la mer qui pourraient être la cause de la hausse du niveau de la mer observé sur le signal brut et qui dépasse 60cm. Ces ondes sont relatives aux densités spectrales des énergies illustrées sur la figure n°33 qui ont été observées dans les fréquences suivantes : 0.0005499 Hz soit (30.30 min), 0.0008281 Hz soit (20.12min), 0.00515 Hz soit (3.23min) ; toutes ces fréquences sont propres aux tsunamis et météotsunamis. Notamment en absence d'aucun séisme susceptible de générer un tsunami pendant cette période, ces ondes pourraient être imputées aux perturbations atmosphériques.

## b. Filtre band pass entre 4h et 24h



**Figure 35.** Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h pour la période entre le 14/02/2012 et 10/04/2012.

La figure n°35, représente le résultat du filtre band pass entre 4h et 24h opéré sur le signal global, le spectre montre clairement que la marée est de type mixte (succession de la marée diurne et semi diurne), pour mieux détailler le type de la marée, sa période ainsi le marnage, nous allons effectuer un zoom sur un segment de la marée, la figure ci-dessous illustre mieux la marée caractérisant notre région pendant la période de mesure retenue.



**Figure 36.** Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h pour la période entre le 14/02/2012 et 10/04/2012.

La figure n° 36, ci-dessus, confirme que la marée de notre région est de type mixte, avec des amplitudes qui varient entre 21.55 cm et 35.66 ce qui donne en sorte un marnage d'ordre de 10 cm, avec une amplitude moyenne de 34.4 cm.

### VI.3. Signal brut temporel du niveau de la mer durant la période entre le 01/03/2012 et 30/04/2012

La figure n°37, illustre les fluctuations du niveau de la mer prélevées sur la période comprise entre le 01/03/2012 et 30/04/2012. D'une façon générale la hauteur du niveau de la mer fluctue entre 20 cm et 80 cm avec une moyenne de 47.2 cm. La valeur minimale (7.3 cm) a été enregistrée dans la deuxième semaine du mois de Mars où le niveau la mer a généralement baissé (inférieur à 20 cm), en revanche le niveau de la mer atteint ces valeurs maximales vers la troisième semaine du mois d'Avril en dépassant 80 cm. aussi on remarque l'apparition de quelques pics isolés peuvent être générées par le bruit affectant l'enregistrement marégraphique. Dans le but d'essayer de comprendre les facteurs qui avaient induit la hausse significative du niveau de la mer observé sur le signal temporel pendant le mois d'Avril, ainsi déterminer la contribution des différentes composantes du niveau de la mer nous allons appliquer la méthode de Welch et le filtre *band pass* sur le signal global.

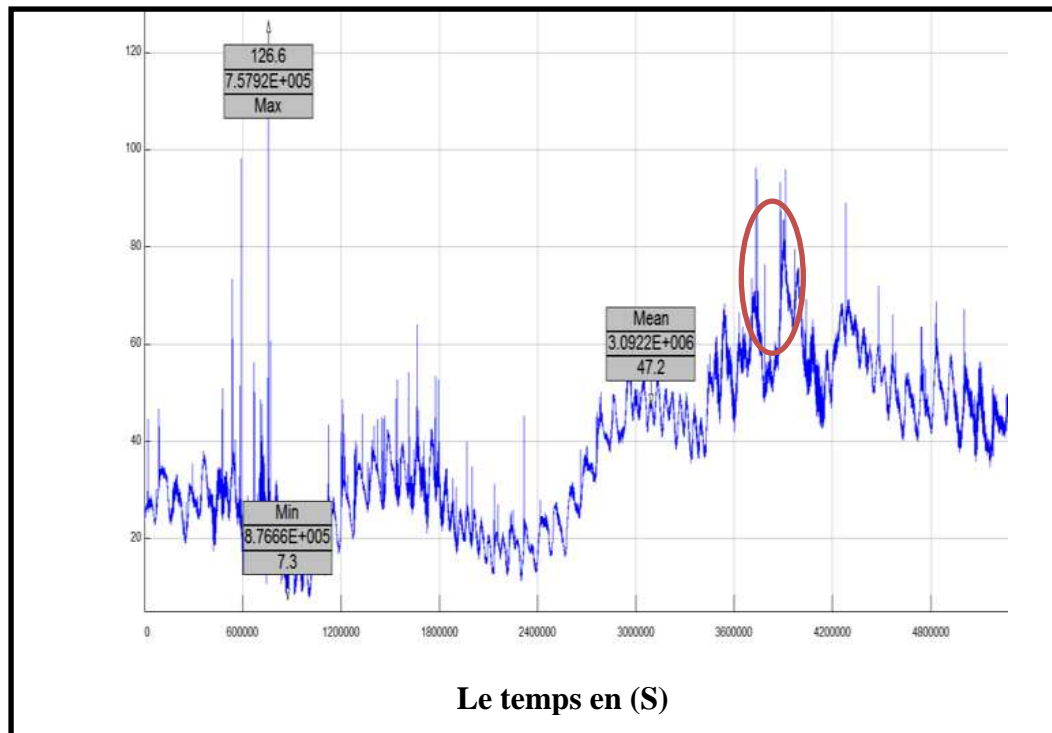


Figure 37. Signal temporel du niveau de la mer entre le 01/03/2012 et 30/04/2012.

**VI.3.1. Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global entre le 01/03/2012 à 30/04/2012**

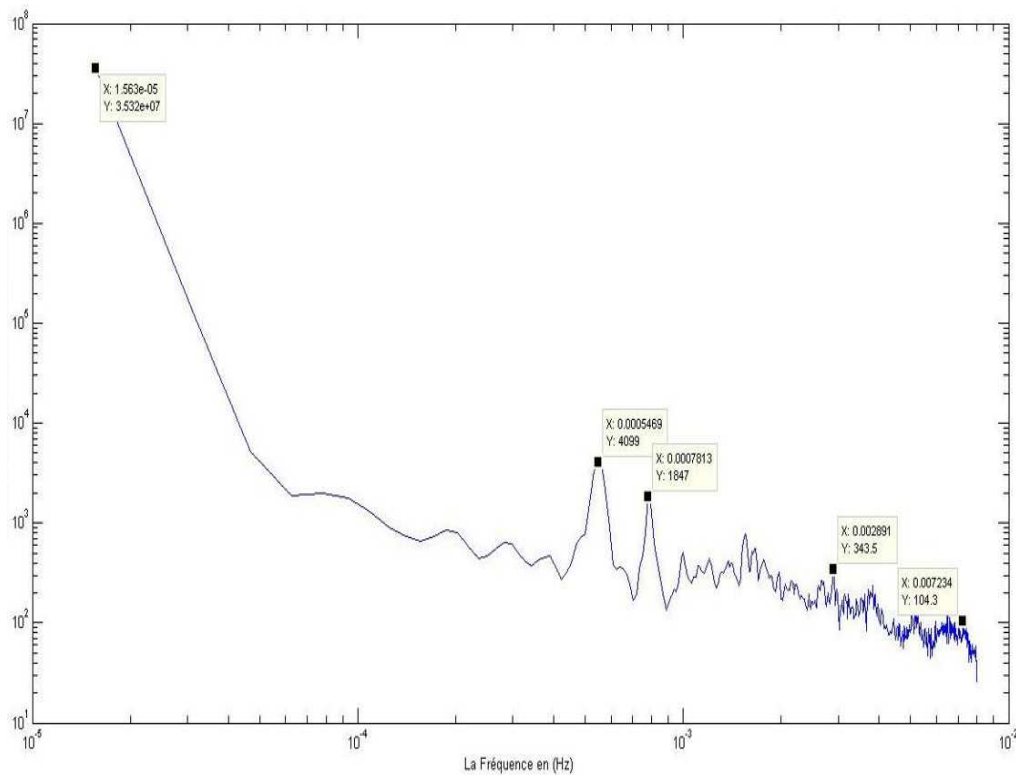
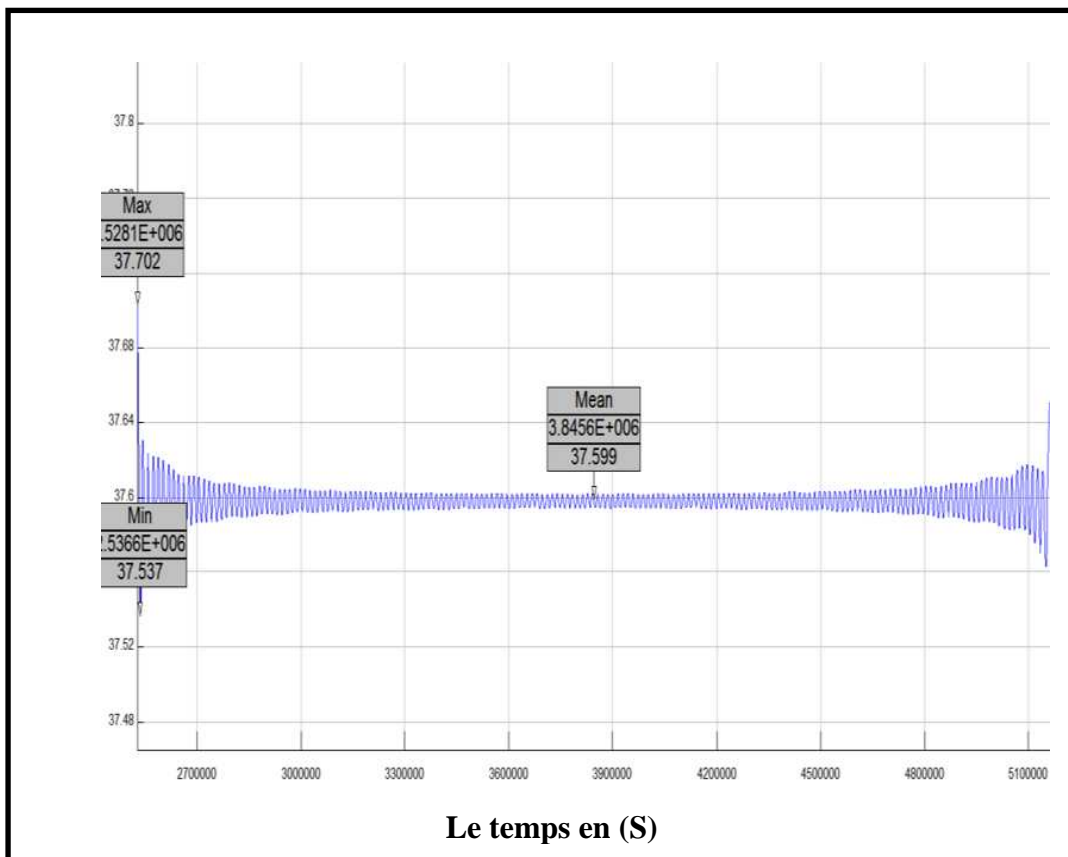


Figure 38. La densité spectrale de puissance des fréquences entre le 01/03/2012 et 30/04/2013.

On remarque sur la figure n°38, la présence de trois pics dans les basses fréquences : Les deux premiers pics représentent successivement les fréquences 0.0007813 soit une période de 1972 s (21.33 min) et 0.0005469 Hz soit une période de 30.47 min ce qui correspond aux périodes des météotsunamis et tsunamis qui oscillent généralement entre quelques minutes et 2 à 3h (Marrifield, 2005 ; Gouriou, 2012). Celles-ci pourraient être à l'origine de la hausse significative du niveau de la mer pendant la deuxième et la troisième semaine du mois d'Avril. Le troisième pic correspond à une fréquence de 0.00001156 soit à une période de presque 24h ce qui correspond à la marée journalière (diurne). On constate aussi la présence des ondes de hautes fréquences représentées par une fréquence de 0.007234 Hz soit une période de 2.3 min appartenant à la gamme fréquentielle des ondes infragravitaires.

### VI.3.2. Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel entre le 01/03/2012 et 30/04/2013

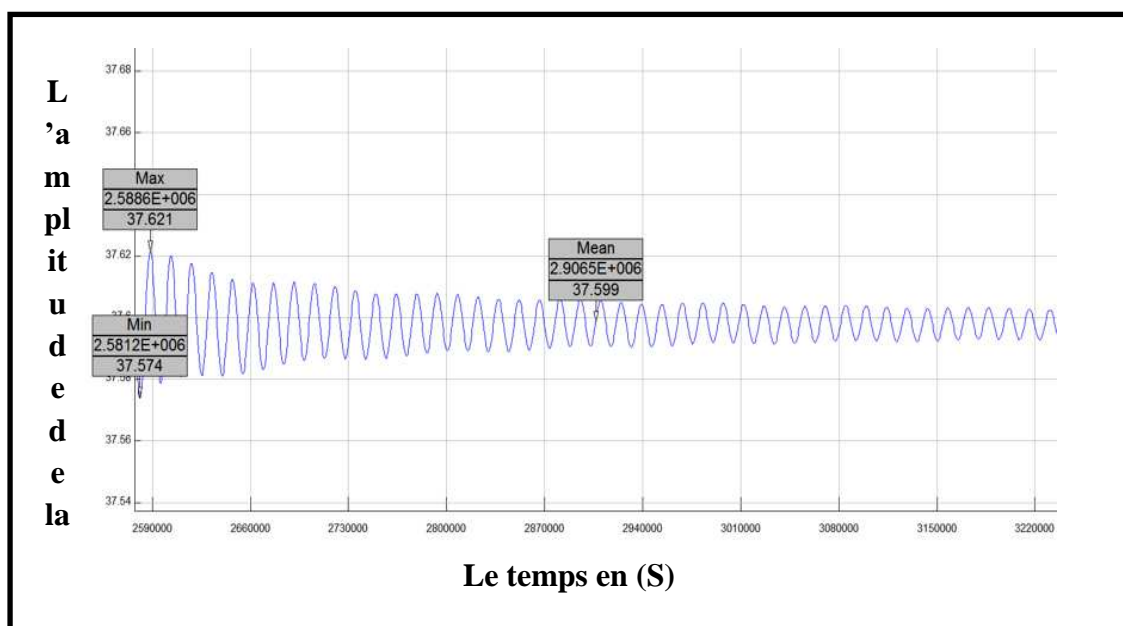
#### a. Filtre band pass entre 4h et 24h



**Figure 39.** Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre le 01/03/2012 et 30/04/2012.

La figure n°39, montre les résultats du signal du niveau de la mer (baie d'Alger) filtré par *band pass* entre 4h et 24h et ce, pour la période qui s'étale du 01/03/2012 au 30/04/2012. Généralement l'amplitude de la marée varie légèrement autour d'une valeur moyenne de 37.6 cm. afin de mieux caractériser le type de marée ainsi estimer le marnage maximal atteint durant cette période nous examinerons le zoom que nous

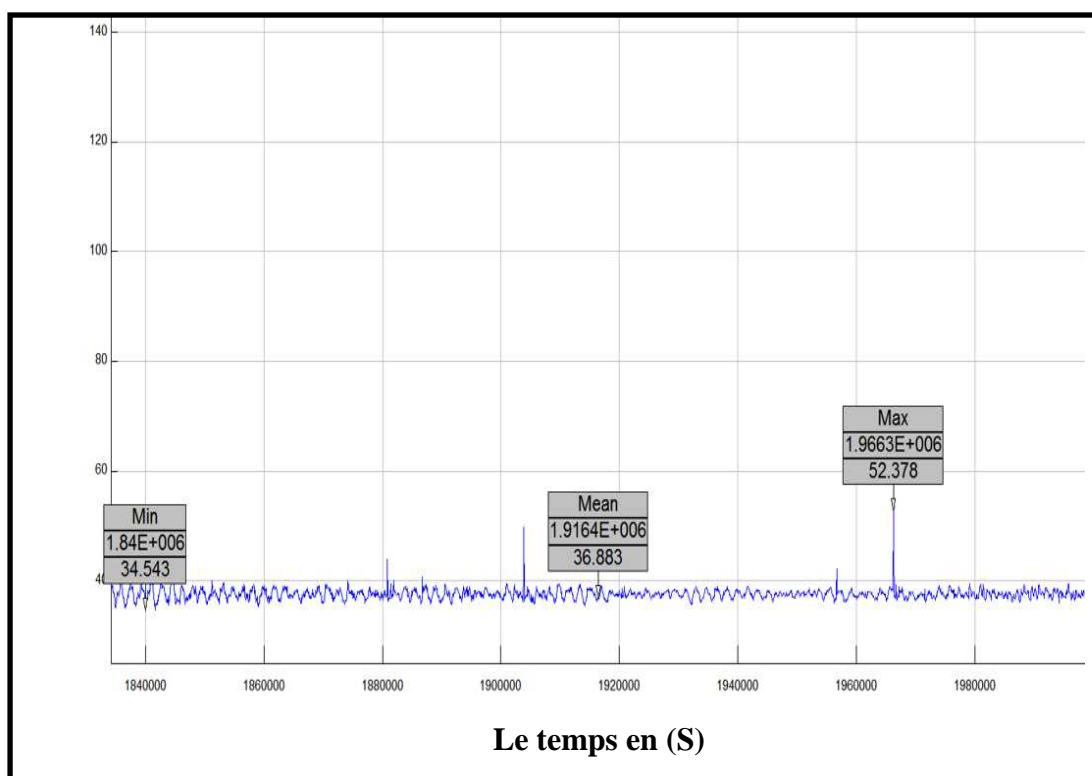
avons effectué sur un segment du signal après filtrage. La figure n°40, illustre les détails de la marée durant cette période.



**Figure 40.** Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre le 01/03/2012 et 30/04/2012.

L'observation du spectre (figure n°40), montre que la marée dominant notre région pour la période comprise entre le 01/03/2012 et le 30/04/2012 est de type semi diurne avec une période presque de 4h, et une amplitude qui varie très légèrement. Ce qui signifie que le marnage est très faible et n'atteint pas 1 cm.

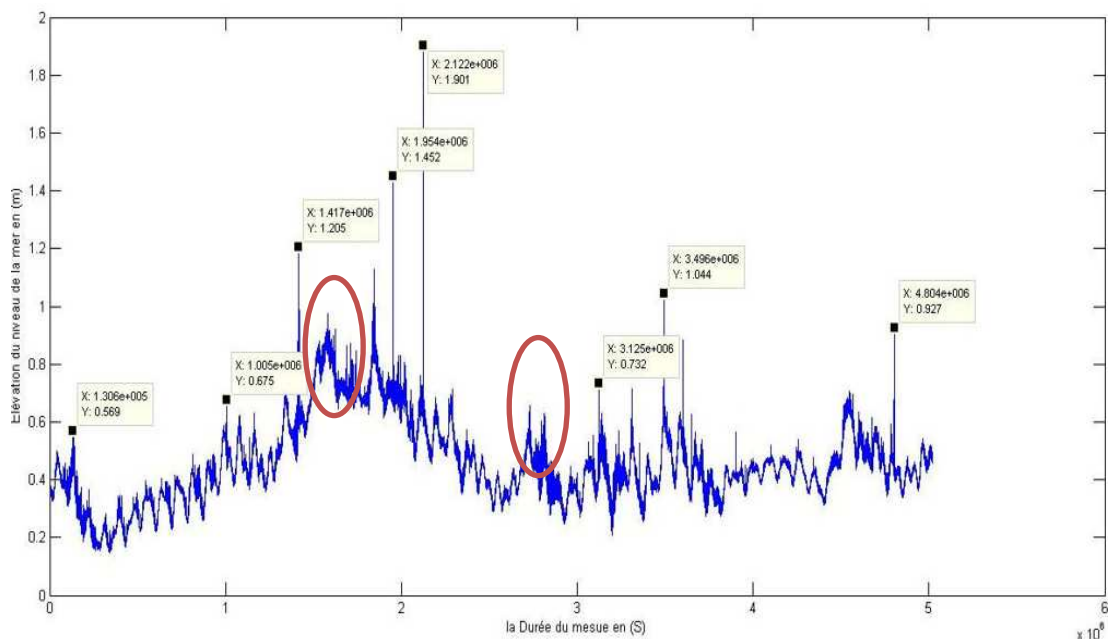
## b. Filtre band pass entre 2min et 3h



**Figure 41.** Résultats du filtre band pass entre 2min et 3h de la période entre le 01/03/2012 et 30/04/2012.

La figure n°41, exprime les résultats du filtre band pass appliqué aux données brutes du niveau de la mer durant la période allant du 01/03/2012 au 30/04/2012, ces résultats révèlent la présence des ondes stationnaires avec des amplitudes qui varient très légèrement autour d'une valeur moyenne de 36.9 cm. ces ondes surement avaient été derrière la hausse significative du niveau de la mer enregistré vers la deuxième et troisième semaine du d'Avril et qui avait dépassé 80 cm.

#### VI.4. Signal brut temporel du niveau de la mer durant la période entre le 01/01/2013 à 28/02/2013

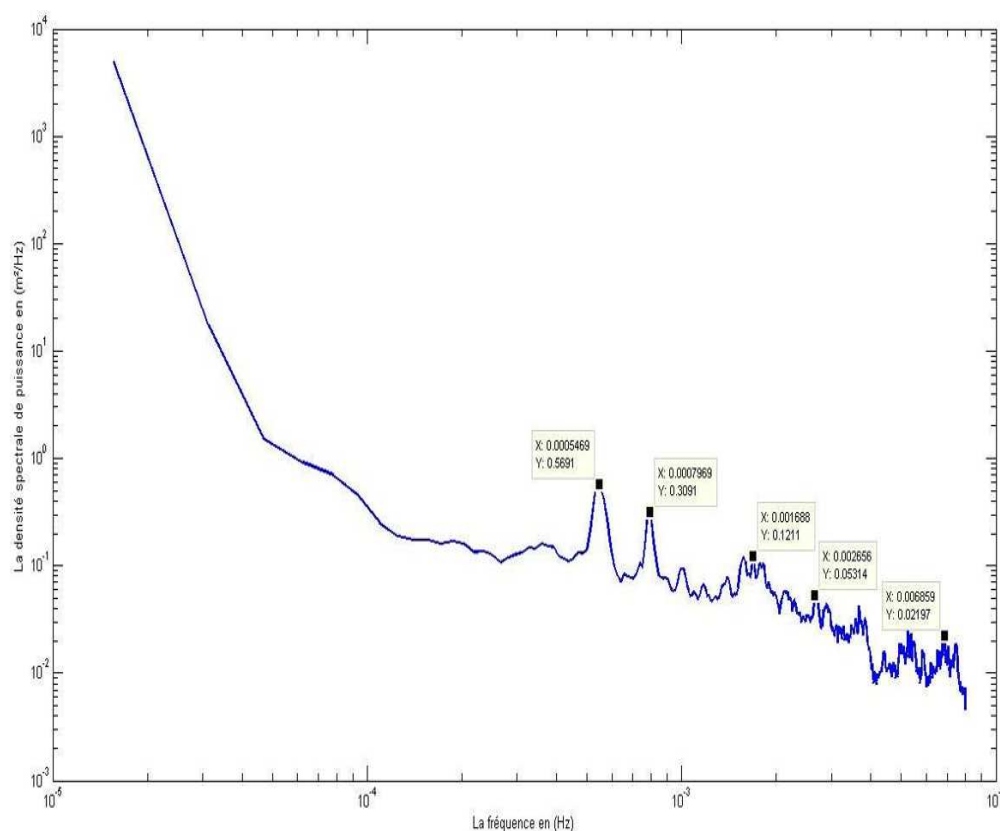


**Figure 42.** Signal temporel brut entre le 01/1/2013 et 28/02/2013 au niveau de la baie d'Alger.

La figure n°42, le signal du niveau de la mer observé par le marégraphe à capteur ultrasons installé au port d'Alger durant la période qui s'étale du 01/1/2013 à (22h06) jusqu'au 28/02/2013 à (00h00), le niveau moyen de la mer varie entre 20cm et 80cm, avec toujours l'apparition de quelques pics isolés dont les amplitudes dépassent largement 1m considérées comme des mesures bruitées.

Donc dans l'objectif de contribuer à déterminer les différentes composantes constituant le niveau de la mer pendant cette période et à l'aide du logiciel du Matlab, nous allons estimer la densité spectrale d'énergie des différentes fréquences appartient au signal global.

### VI.4.1. Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global (entre le 01/1/2013 et 28/2/2013)

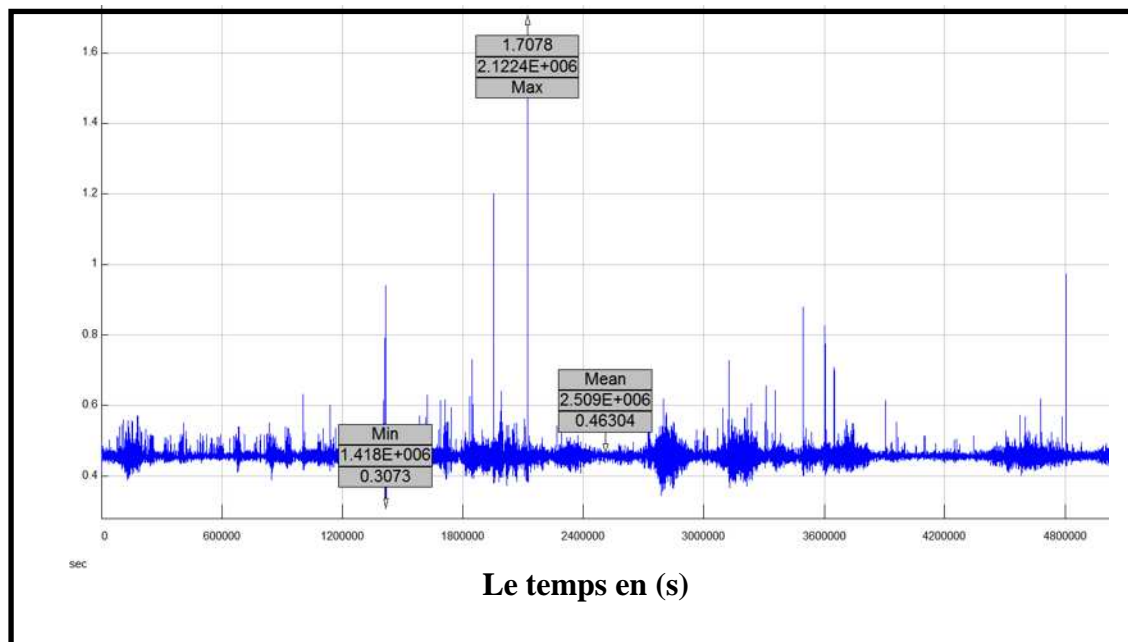


**Figure 43.** La densité spectrale de puissance des fréquences entre le 01/01/2013 et 28/02/2013.

La figure n°43, illustre les résultats de la densité spectrale de puissance des fréquences estimée sur le signal pendant la période de mesure indiquée ci-dessus, ces résultats font état d'un pic spectral qui environne 0.00002 Hz. Cette dernière est imputable à l'action tidale (marée). La figure montre aussi des pics qui apparaissent exactement dans les fréquences suivantes 0.0005469 (30.47 min), 0.0007969 Hz (20.91 min), 0.002656 Hz (6.27 min). toutes ces fréquences sont propres aux tsunamis et aux météotsunamis. Et étant donné que pendant ce moment aucun séisme susceptible de générer un tsunami n'avait pas enregistré dans la région, ces ondes peuvent être engendrées par des perturbations atmosphériques. Ainsi on remarque l'apparition d'un pic ayant une fréquence de 0.006859 Hz soit une période de 2.42 min correspond aux ondes infragravitaires. Afin de déterminer l'origine des différentes ondulations observées sur le signal temporel et de déterminer le type de la marée caractérisant notre région, on procède à appliquer un filtre *pass band* pour isoler ces oscillations.

### VI.4.2. Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel entre le 01/01/2013 et 28/02/2013

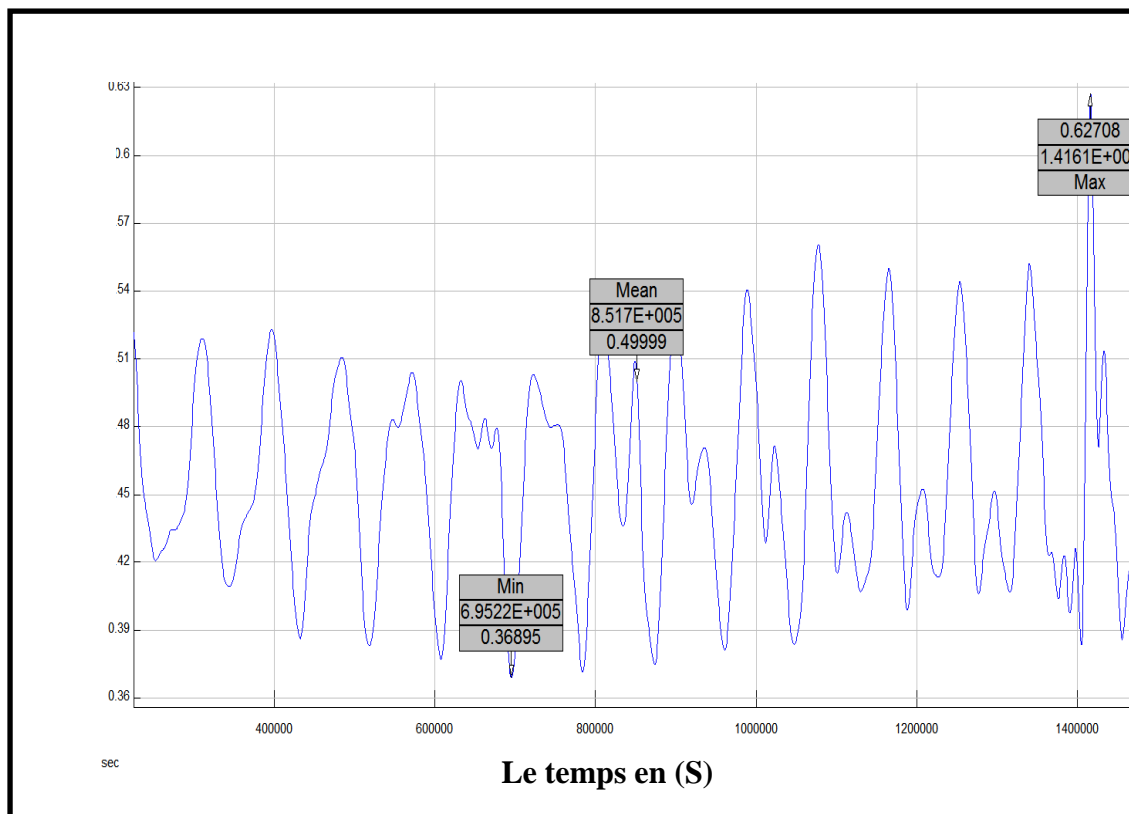
#### a. Filtre band pass entre 2min et 3h



**Figure 44.** Résultats du filtre band pass entre 2 min et 3h pour la période entre le 01/01/2013 et 28/02/2013.

Après avoir éliminé la marée astronomique, et d'après la figure n°44, nous pouvons constater la présence des ondes stationnaires ont des amplitudes qui peuvent atteindre 60 cm, celles-ci varient légèrement autour d'une valeur moyenne de 46.3 cm. ces ondes de basses fréquences appartenant à la gamme fréquentielle des météotsunamis pourraient être derrière les élévations significatives du niveau de la mer observées sur le signal global et qui dépassent 80 cm. Ces ondes sont relatives aux densités spectrales des énergies illustrées sur la figure n°43 qui ont été observées dans les fréquences suivantes : 0.0005469 (30.47 min), 0.0007969 Hz (20.91 min), 0.002656 Hz (6.27 min).

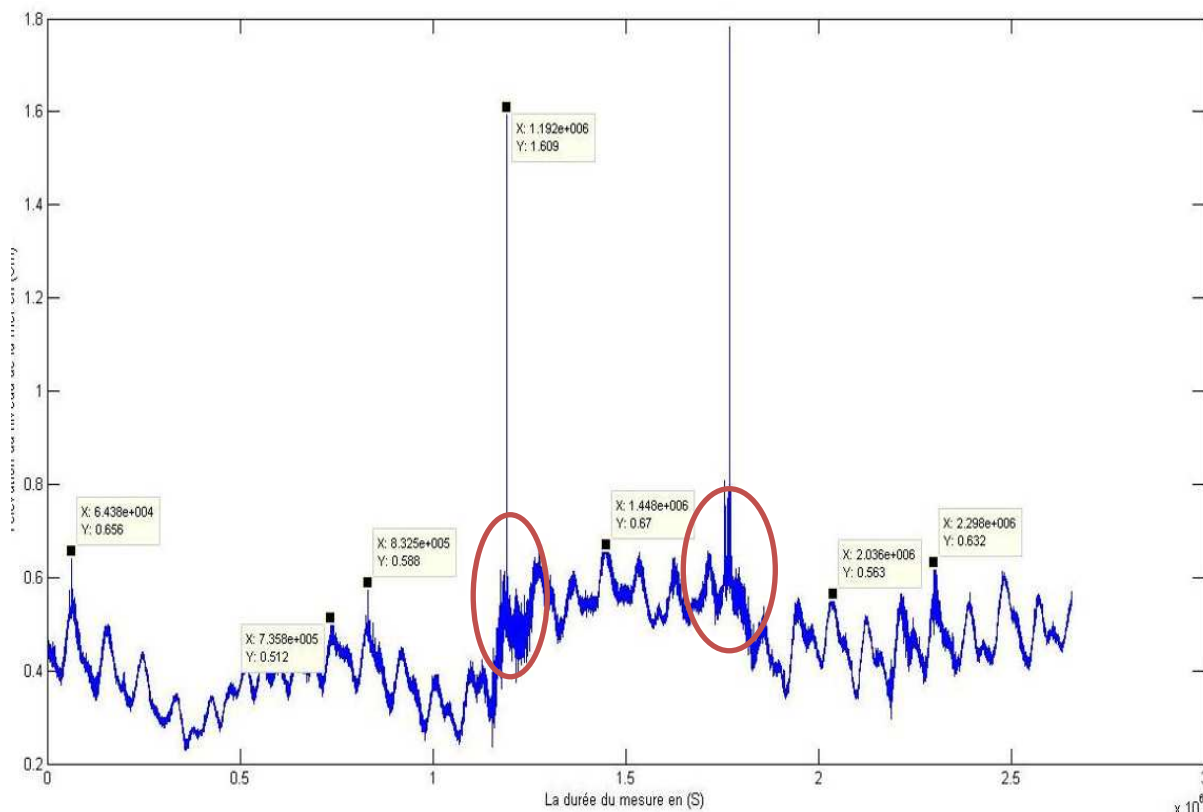
## b. Filtre band pass entre 4h et 24h



**Figure 45.** Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre le 01/01/2013 et 28/02/2013.

La figure n°45, montre le résultat du filtre band pass appliqué au signal global, d'après ce spectre, nous pouvons conclure que la marée caractérisant notre région durant la période allant du 01/01/2013 au 28/02/2013 est de type mixte. En effet les amplitudes de la marée s'échelonnent entre une valeur minimale de 36.9 cm et une valeur maximale de 62.7 cm ce qui donne un marnage maximal de 25.8 cm. d'après ce spectre on peut constater aussi que les valeurs maximales de la marée ont été enregistrées durant le mois de Février avec des amplitudes qui dépassent 54 cm. ainsi nous avons pu déterminer les périodes propres des marées caractérisées notre zone d'étude, celles-ci est de l'ordre de 4h pour la marée semi diurne et 11h pour la marée diurne.

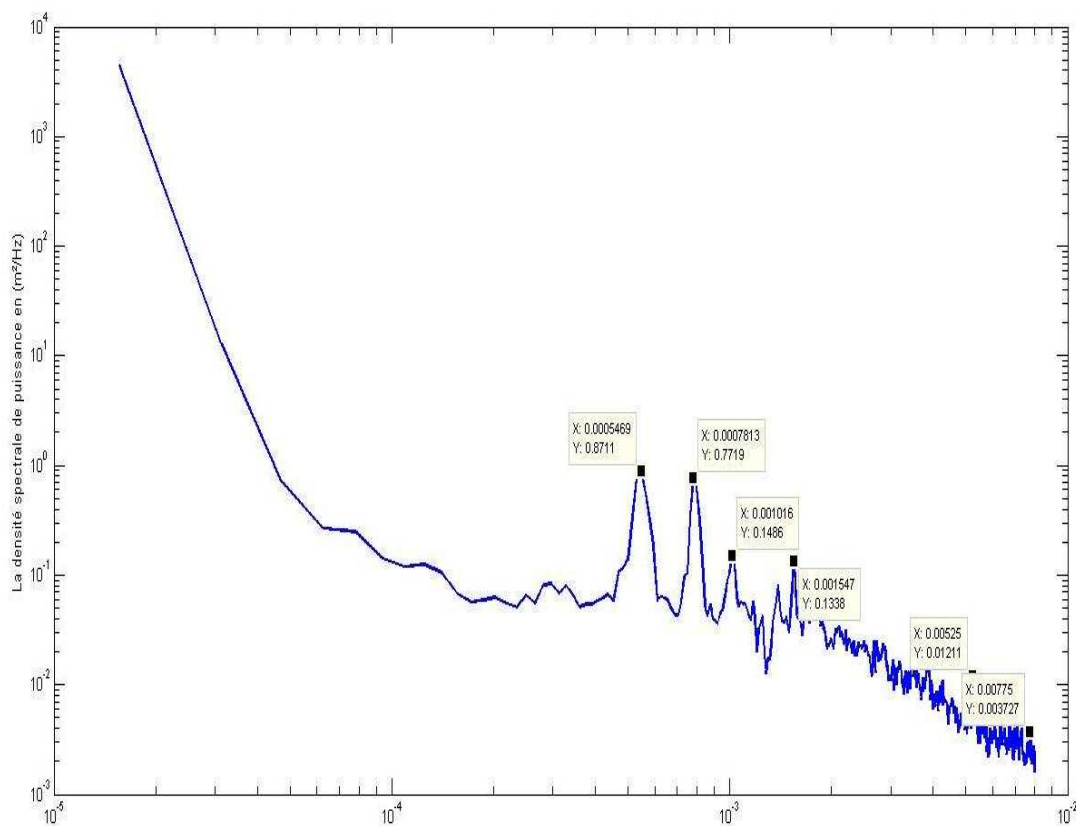
### VI.5. Signal brut temporel entre 01/05/2013 et 31/05/2013 au niveau de la baie d'Alger



**Figure 46.** Signal brut temporel entre 01/05/2013 et 31/05/2013 au niveau de la baie d'Alger.

La figure n° 46, ci-dessus montre la variation de l'amplitude du niveau de la mer pendant le mois de Mai 2013. En effet, le niveau de la mer fluctue entre 20 cm et à 60 cm. Avec l'apparition de quelques pics atteignant 1,8 m considérés comme des mesures bruitées. On peut aussi remarquer que le niveau de la mer atteint ses valeurs maximales entre le 12 et le 17 Mai avec l'occurrence des ondes extratidales peuvent être à l'origine de cette hausse remarquable. En revanche les amplitudes les plus faibles ont été enregistrées vers la quatrième journée du mois de Mai. En effet, les résultats de la densité spectrale d'énergie ainsi les filtres opérés sur le signal temporel vont nous aider à déterminer l'origine de ces ondes extratidales ainsi de caractériser le type de marée dominée notre région durant cette période.

### VI.5.1. Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal global (durant le mois de Mai 2013)

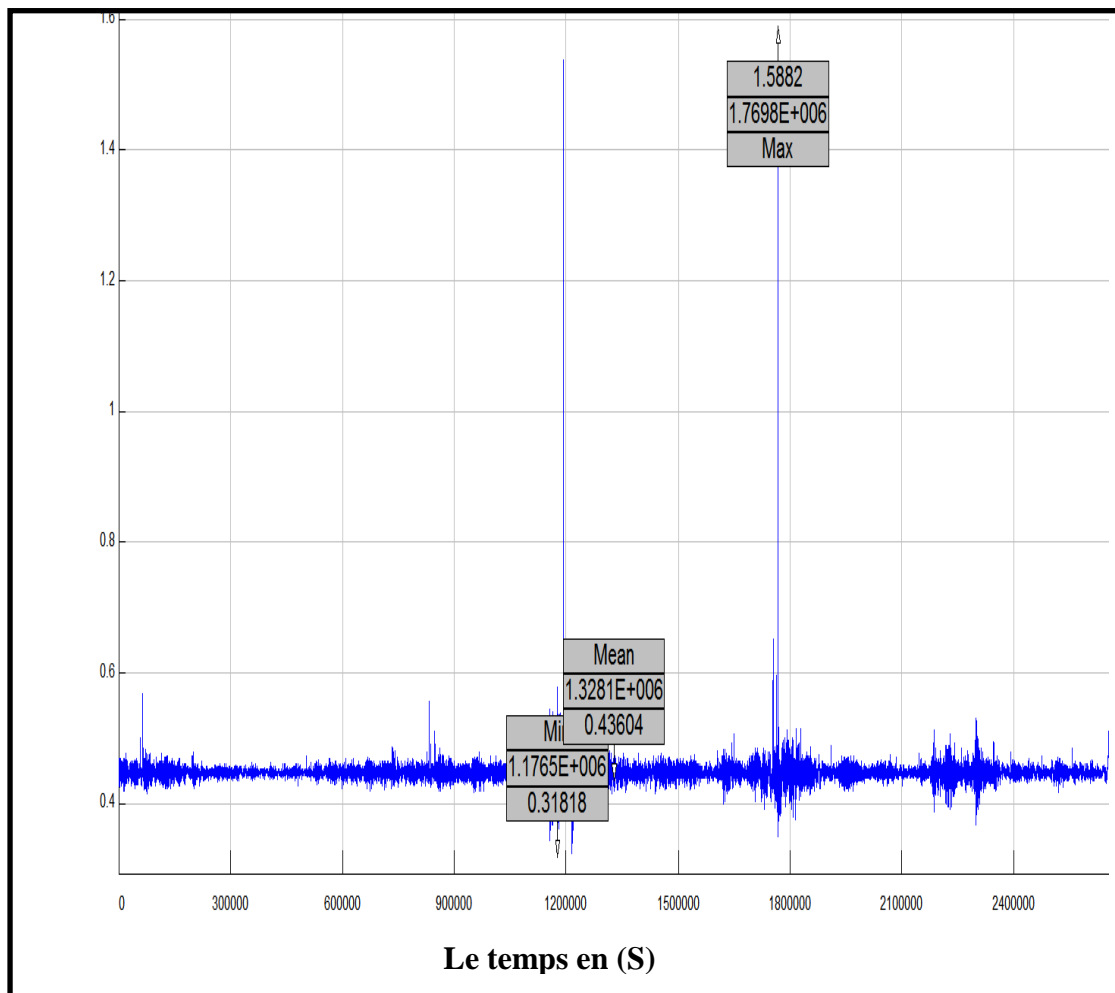


**Figure 47.** La densité spectrale de puissance des fréquences entre le 01/05/2013 et 31/05/2013.

La figure n°47, représente les résultats de la densité spectrale de puissance des fréquences estimée sur le signal pendant le mois Mai 2013. Ces résultats révèlent la présence des pics ont des fréquences comprises ente 0.00055 Hz et 0.0025 Hz correspond aux périodes (30.30 min) et (6.66 min), peuvent être expliquée par l'action des phénomènes d'origines atmosphériques. Pour mieux comprendre la cause de l'élévation remarquable du niveau de la mer, nous avons appliqué un filtre band pass entre 2 min et 3h.

### VI.5.2. Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel allant du 01/05/2013 et 31/05/2013

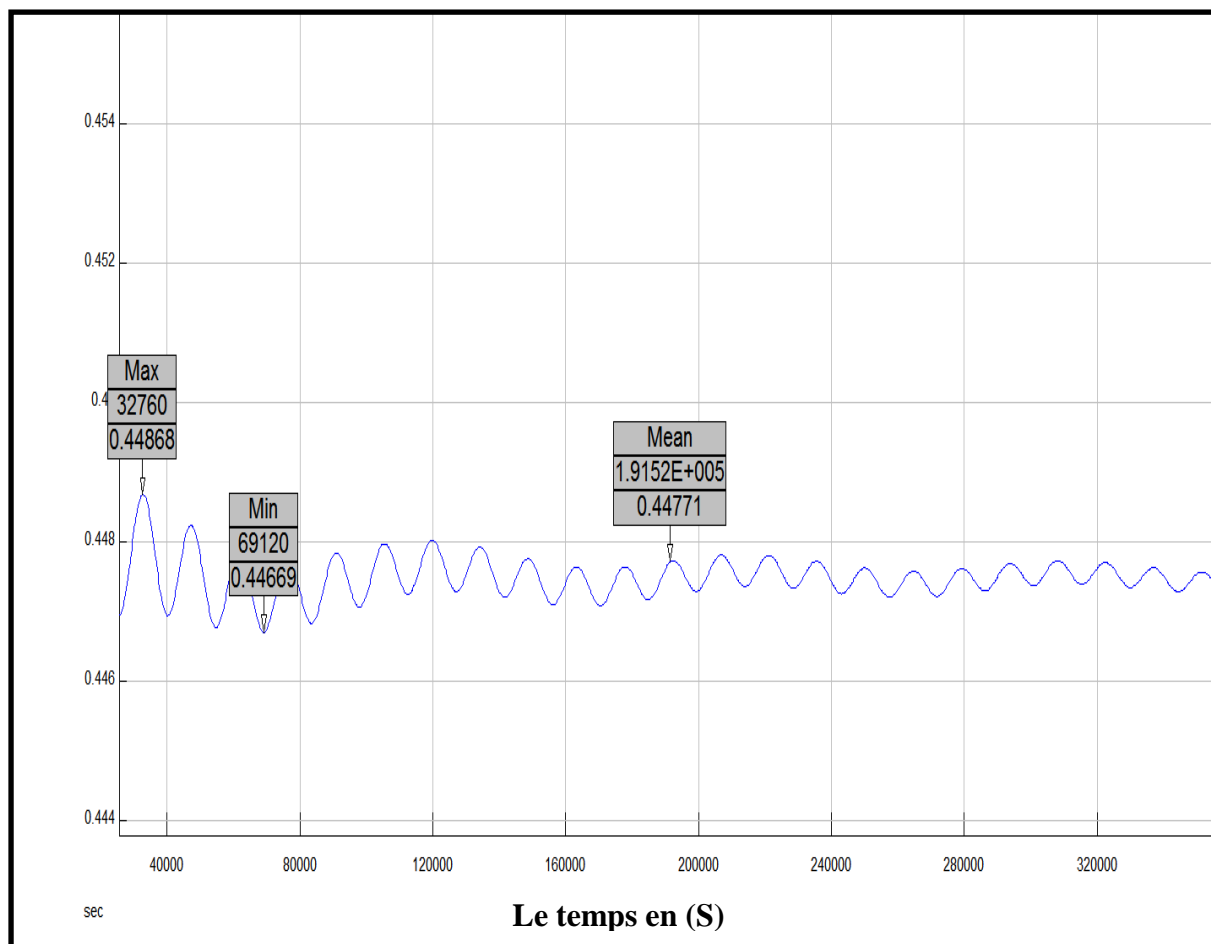
#### a. Résultat du filtre opéré entre 2 min et 3h



**Figure 48** .Résultats du filtre band pass entre 2min et 3h pour la période entre le 01/05/2013 et 31/05/2013.

Les résultats de ce filtre (représentés sur la figure n° 48), révèlent la présence des ondes stationnaires dont l'amplitude est d'ordre de 43 cm, en effet durant la semaine où le niveau de la mer a été significativement élevé, nous observons des ondes ayant des hauteurs atteignant 45 cm, appartenant à la gamme fréquentielle des météotsunamis font amplifier le niveau de la mer. Ces ondes sont relatives aux densités spectrales des énergies illustrées sur la figure n° 48.

## b. Résultat du filtre opéré entre 4h et 24h



**Figure 49.** Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h pour la période entre le 01/105/2013 et 31/05/2013.

Sur la figure n° 49, représentant le résultat du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre le 01/05/2013 et 31/05/2013, nous avons pu déterminer la période de la marée caractérisant notre région pendant ce moment qui est d'ordre de 3.7 h ce qui correspond à la marée semi diurne, cette dernière varie très légèrement autour une amplitude moyenne de 44.77 cm.

# **Conclusion**

## Conclusion

---

Ce travail est une contribution pour comprendre le phénomène de la hausse soudaine du niveau ainsi essayé de déterminer les différentes oscillations contenues dans le signal brut du niveau de la mer, alors pour une meilleure compréhension de ces phénomènes. Nous avons cherché à déterminer les caractéristiques de ces ondulations marines (amplitude et période) en tant que phénomène oscillatoire. La disponibilité des données marégraphiques issues du marégraphe numérique de type acoustique de l'Institut National de Cartographie et de Télédétection installé au niveau du port d'Alger nous a permis d'ausculter les différentes ondes comprises dans le signal du niveau de la mer mesuré par ce marégraphe au niveau du port d'Alger, durant la période comprise entre 2011 et 2013. Ainsi, nous avons appliqué deux méthodes ; la densité spectrale de puissance et les filtres qui ont permis, respectivement, d'étudier les différentes fréquences énergétiques contenu dans le signal brut et de séparer les différentes ondes marines contenues dans le signal brut du niveau de la mer.

Les résultats des densités spectrales des puissances ont mis en évidence la présence de pics fréquentiels qui appartiennent aux ondes des tsunamis et des météotsunamis avec des fréquences de 0,00055 Hz (30,30 min), 0,0008057 Hz (20,83 min), 0,0007969 Hz (20,91 min), 0,0012 Hz (13,88 min), 0,002656 Hz (6,27 min). Cependant, parce que pendant cette période aucun séisme n'avait été enregistré, ces ondes pourraient être imputées aux perturbations atmosphériques, capables de générer de telles ondes.

Ces résultats font état d'un pic spectral dans la gamme fréquentielle qui environne 0.000025 Hz soit une période presque de 11h ce qui correspond à la marée journalière (diurne).

En outre, nous avons constaté la présence des ondes ayant des fréquences de l'ordre de 0.006859 Hz soit une période de 2.42 min correspondant aux ondes infragravitaires. Celles-ci peuvent être induites par le déferlement des vagues à la cote. Ainsi, Par ailleurs, les filtres opérés sur notre signal nous ont permis de caractériser le type de la marée de notre région : ces résultats révèlent la présence de deux types de marée. La marée mixte (diurne et semi diurne), qui domine généralement durant la période hivernale avec un des amplitudes qui dépassent 60 cm et un marnage d'ordre de 25 cm. la marée semi diurne qui domine les périodes comprenant Mars et Avril de l'année 2012, ainsi le mois de Mai 2013, celle-ci se caractérise par des amplitudes qui varient entre 35cm et 45cm, et des périodes de

## Conclusion

---

l'ordre de 4h. Les résultats des filtres que nous avons appliqués au signal temporel brut ont permis aussi de constater la présence des ondes stationnaires ont des amplitudes qui peuvent atteindre 60 cm, ces ondes de basses fréquences appartenant à la gamme fréquentielle des tsunamis et météotsunamis peuvent être à l'origine des élévations significatives observées sur le signal temporel brut du niveau de la mer. Notamment en absence d'aucun séisme susceptible de générer un tsunami pendant les différentes périodes de mesure retenues, ces ondes pourraient être purement générées par des perturbations atmosphériques.

De plus, cette étude vise à montrer l'intérêt des marégraphes numériques, afin d'étudier et de comprendre certains risques côtiers comme les tsunamis, météotsunamis, surcote, etc. Ceci va certainement aider à la décision concernant l'implantation des infrastructures portuaires en particulier et la gestion du risque côtier en général.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

---

**Adnet C., 1990.** Unification des méthodes d'analyse spectrale en vue de la réalisation d'un système expert d'aide à l'analyse. Thèse de Doctorat de l'INPG.

**Allen J.B., 1997.** Short-Time Spectral Analysis, Synthesis, and Modification by Discrete Fourier Transform. IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vol. 25, p. 235-238. Juin 1997

**Bachari. N.I., Abdellaoui A., Houma F., 2011.** Modélisation des données multisources pour l'étude de la pollution de la baie d'Alger à base d'un système d'information géographique. *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime. EDITION 2, TANGER, MAROC (2011).*

**Bartlett M.S., 1948.** Smoothing Periodograms from Times Series with Continuous Spectra. Nature, London. Vol. 161.

**Belkessa R., 2005.** Les ports d'Alger : ensablement, pollution et dragage des sédiments ; thèse de doctorat .Université de Constantine. 412p.

**Benzohra M., 1993.** Les structures hydrodynamiques le long des côtes Algériennes. Centre d'Océanologie de Marseille, 33 p.

**Bouligand R., Pirazzoli PA., 1999.** Les surcotes et les décotes marines à Brest, étude statistique et évolution. *Oceanologica Acta* **22**:153–166.

**Bouligand R., Tabeaud M., 2000.** Les surcotes à Brest depuis un siècle: analyse des paramètres météorologiques influents à l'échelle locale. *Norwis* **47**: 201–217.

**Bruzzi C., 1996.** Impact morpho-sédimentaire des tempêtes sur les côtes de Provence. PhD thesis, University of Aix-Marseille I, Aix en Provence.

**Camuffo D., 1993.** Analysis of sea surges at Venice from A.D. 782 to 1990. *Theoretical and Applied Climatology* **47**: 1–4. **Cartwright. D.E., 1999.** *Tides: a scientific history*, Cambridge Univ. Press, 292p. **Castelle B., 2004.** Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au-dessus des barres sableuses soumises à l'action de la houle : application à la côte aquitaine. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1.

**Chappell J., Polach H., 1991.** Post-glacial sea-level rise from a coral record at Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Nature* **349**(6305), pp. 147-149.

**Carre J.C., Roullier F., 1975.** Fenêtres temporelles et fenêtres spectrales. Rapport interne SEN/020 du Service d'Etudes Nucléaires du CEA.

**Cazenave A., Liovel W., 2010.** Contemporary Sea Level Rise. *Annual Review of Marine Science* **2**(1), pp.145-173.

**Cazenave A., Lombard A., Liovel W., 2000.** Present-day sea level rise: A synthesis. *Comptes Rendus Geoscience* **340**(11), pp. 761-770.

**Cazenave A., Nerem. R.S., 2004.** Present-day sea level change: Observations and causes. *Reviews of Geophysics* **42**(RG3001), 20p.

## Références bibliographiques

---

- Chazallon R., 1839.** Annuaire des marées des côtes de France. Publié au Dépôt de la Marine, Paris. *Archives du SHOM*.
- Clark M.P., Mullis C.T., 1993.** Quadratic Estimation of the Power Spectrum Using Orthogonal Time-Division Multiple Windows. *IEEE Transactions on Signal Processing*. Vol. 41, no. 1, p.222-231.
- Clergeot S.M., 1984.** Choix entre les différentes méthodes quadratiques d'estimation du spectre de puissance. *Annales des Télécommunication*. Vol. 39, n° 3-4.
- Church.J.A.,white.N.J., 2006.** A 20 th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* **33**(L01602), 4p.
- Church.J.A., White.N.J., 2011.** Sea-Level Rise from the late 19th to the early 21st Century. *Surveys in Geophysics* **32**(4-5), pp. 585-602.
- Church. J.A., White. N.J., Aarup T., Wilson.W.S., Woodworth. P.L., Domingues, C.M., Hunter, J.R. Lambeck K., 2008.** Understanding global sea levels: past, present and future. *Sustainability Science* **3**(1), pp. 9-22.
- Church.J.A., White, N.J., Coleman, R., Lambeck, K. & Mitrovica, J.X. 2004.** Estimates of the regional distribution of Sea Level Rise over the 1950–2000 Period. *Journal of Climate* **17**(13), pp. 2609-2625.
- Courteau R., 2007.** L'évaluation et la prévention du risque de tsunami sur les côtes françaises en métropole et outre-mer., Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 4p.
- Defant A., 1961.** Physical Oceanography, Vol.2, Peramon Press, Oxford, uk.
- Demerliac A., 1973.** Le niveau moyen de la mer, calcul du niveau moyen journalier, Rapport du SHOM.
- Doodson. A.T., 1921.** The Harmonic Development of the Tide-Generating Potential. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* **100**(704), pp. 305-329.
- Douglas.B.C., 1991.** Global sea level rise. *Journal of Geophysical Research* **96**(C4), pp. 6981–6992.
- Douglas. B.C., 1992.** Global Sea Level Acceleration. *Journal of Geophysical Research* **97**(C8), pp. 12699-12706.
- Douglas, B.C., 1997.** Global sea rise: a redetermination. *Surveys in Geophysics* **18**(2-3), pp. 279-292.
- Douglas.B.C., 2001.** Sea Level Change in the Era of the Recording Tide Gauge. Dans *Sea Level Rise: History and Consequences*, pp. 37-64. International Geophysics, San Diego: Academic Press Inc.

## Références bibliographiques

---

**Douglas, B.C., Kearney, M.S., Leatherman, S.P., 2001.** *Sea Level Rise: History and Consequences*, San Diego: Academic Press Inc, 232p.

**Durnerin M., 1999.** Les méthodes de Fourier. No. METH 2V1, juin 1997.

**Durnerin M., 1999.** Une stratégie pour l'interprétation en analyse spectrale. Détection et caractérisation des composantes d'un spectre. Thèse de Doctorat. L'Institut National Polytechnique de Grenoble. 277p.

**Downs, L.L., Nicholls, R.J., Leatherman, S.P., Hautzenroder, J., 1994.** Historic evolution of a marsh island :Bloodsworth Island, Maryland, *Journal of Coastal Research*, Vol. 10, 1031-1044.

**Drago A., 2009.** Sea level variability and the 'Mighuba' seiche oscillation in the northern coast of Matlta, Centarl Mediterranean. *Physics and chemistry of the Earth* 34 (2009) 948-970p.

**Fleming K., 2000.** Glacial Rebound and Sea-level Change Constraints on the Greenland Ice Sheet. Thèse de doctorat. Australian National University.

**Fleming K., Johnston, P., Zwartz, D., Yokoyama, Y., Lambeck, K., Chappell, J. (1998).** Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites. *Earth and Planetary Science Letters* 163(1-4), pp. 327-342.

**Fleury G., 2001.** Analyse spectrale. Méthode non-paramétrique et paramétrique. Edition ellipses. 22-34 p.

**Friedrichs. C.T., Aubrey, D.G., 1988.** Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 27(5), pp. 521-545.

**Friedrichs. C.T., Aubrey, D.G., 1994.** Tidal propagation in strongly convergent channels. *Journal of Geophysical Research* 99(C2), pp. 3321-3336.

**FU, L.L., Cazenave, A., 2001.** Satellite altimetry and Earth sciences, A Handbook of techniques and applications., San Diego: Academic Press, 463p.

**Gasquet, C., Witomski P., 1990.** Analyse de Fourier et applications filtrage, calcul numérique et ondellette. Edition Dunod. 6-61-71p

**Gaumer G., 1981.** Evolution annuelle des communautés microplanctoniques de la baie d'Alger. Variations de la composition spécifiques liées à la nature du facteur nutritionnel limitant de labiomasse algale. Thèse de doctorat, spécialité : Océanographie biologique, Université Pierre et Marie Curie, France, 91 P.

**Godin G., 1992.** Possibility of rapid changes in the tide of the Bay of Fundy, based on a scrutiny of the records from Saint John. *Continental Shelf Research* 12(2-3), pp. 327-338.

**Gouriou T., 2012.** Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18<sup>e</sup> siècle en Charente-Maritime. Thèse de doctorat. Université de la Rochelle, 579p.

## Références bibliographiques

---

- Gouriou, T., Tiphaneau, P., 2010a.** Campagne de nivellement et d'observations GPS au fort Boyard (Charente-Maritime). Juillet-Août 2009, Rapport de mission n°003/09, UMR 6250 LIENSs, 31p.
- Gouriou, T., Tiphaneau, P., 2010b.** Campagne de nivellement et d'observations GPS au fort Enet (Charente-Maritime). Juillet-Août 2009., Rapport de mission n°002/09, UMR 6250 LIENSs, 37p.
- Gouriou, T., Wöppelmann, G., 2010.** A joint analysis of sea-level and meteorological data over the past 19th and 20th century on the Charente-Maritime French Atlantic coast. Présentation orale, Assemblée générale de l'EGU (European Geosciences Union), Vienne, Autriche, 05 mai 2010.
- Gouriou, T., Gravelle, M., Letetrel, C., Karpytchev, M., 2011.** Campagne de nivellement au fort Boyard (Charente-Maritime). 20 avril 2011. Rapport de mission n°001/11, UMR 6250 LIENSs, 19p.
- Gouriou, T., Le Pajolec, S., Tiphaneau, P., Gravelle, M., 2010.** Campagne de nivellement au Vieux port de La Rochelle (Charente-Maritime), Juin 2010, Rapport de mission n°002/10, UMR 6250 LIENSs, 44p.
- Gouriou, T., Pouvreau, N., Wöppelmann, G., 2008.** Mesures du niveau de la mer en France : un patrimoine historique a fort potentiel scientifique. L'exemple du littoral charentais. *Géologues* **158**, pp. 83-89.
- Grasso F., 2009.** Modélisation physique de la dynamique hydro-sédimentaire des plages. Thèse de doctorat. Université de Joseph Fourier. Grenoble I. 171p.
- Grasso F., Michallet, H., Barthélemy, E., Certain, R., 2009.** Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology : transients and equilibrium states. *J. Geophys. Res.*, 114 :C09001.
- Grasso, F., Michallet, H., Barthélemy, E., 2007.** Infragravity waves in mobile-bed laboratory experiments. In *Coastal Sediment 07*, ASCE, pages 235\_247, New Orleans, Louisiana, USA, 2007.
- Hadad M., 2006.** Détermination du niveau moyen des mers à partir des données marégraphiques. *Bulletin des sciences géographiques de INCT n° 16 – ISSN- 1112-3745*, Octobre, 2006.
- HARRIS F.J., 1978.** On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, n° 1 - janvier 1978.
- Holgate, S.J., & Woodworth, P.L., 2004.** Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s. *Geophysical Research Letters* **31**(L07305), 4p.
- Holgate, S.J., 2007.** On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophysical Research Letters* **34**(L01602), 4p.

## Références bibliographiques

---

**Hemdane Y., 2006.** Dynamique hydrosédimentaire de l'avant-cote d'un environnement macrotidal. Exemple du littoral du Nord-Pas-de-Calais.Mer du Nord. Thèse Doctorat. Université du Littoral. 207p.

**JOHNSON P.E., LONG D.G., 1999.** The Probability Density of Spectral Estimates Based on Modified Periodogram Averages. *IEEE Transactions on Signal Processing*.Vol. 47, n°5.

**Lambeck, K., Bard, E., 2000.** Sea level change along the French Mediterranean coast since the time of the last Glacial Maximum, *Earth Planetary Science Letters*, 175,203-222

**Lambeck, K., Chappell, J., 2001.** Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle.*Science* **292**(5517), pp.679 -686.

**Lambeck, K., 1997.** Sea-level change along the French Atlantic and Channel coasts since the time of the Last Glacial Maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology***129**, pp. 1-22.

**Lambeck, K., Anzidei, M., Antonioli, F., Benini, A., Esposito, A., 2004.** Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for recent change.*Earth and Planetary Science Letters* **224**(3-4), pp. 563-575.

**Lambeck, K., Yokoyama, Y., Purcell, T., 2002.** Into and out of the Last Glacial Maximum: sea-level change during Oxygen Isotope Stages 3 and 2. *Quaternary Science Reviews***21**(1-3), pp. 343-360.

**Leclaire L., 1972.** La sédimentation holocène sur le versant Méridional du bassin Algéro-Baléares (Précontinent Algérien). *Tome XXIV. Edition de Muséum, Paris, France*, 391 p.

**Lefevre F., 2000.** Modélisation des marées océaniques à l'échelle globale : assimilation de données in situ et altimétriques. Thèse de doctorat de l'université Toulouse III –PAUL SABATIER, septembre 2000.

**Le Hir, P., Roberts, W., Cazaillet, O., Christie, M., Bassoullet, P., Bacher, C., 2000.** Characterization of intertidal flat hydrodynamics.*Continental Shelf Research* **20**(12-13), pp. 1433-1459.

**Lefebvre 1880.** Note sur les variations de la marée à Rochefort, à Enet et au fort Boyard, 15 mai 1880. *Archives,du SHD Marine*, Rochefort, cote 2D45y, 17p.*Management* **31**: 105–132.

**LEM, 1996.** Etude de protection des sablettes et de bordj-El-Kiffan, *Mission 1*, p1-26.

**LEM., 1998.** Laboratoire d'Etudes Maritime, Etude de délimitation d'une zone d'extraction de sable en baie d'Alger.

**Lombard A., 2005.** Les variations actuelles du niveau de la mer :Observations et causes thèse de doctorat. Université Paul Sabatier - Toulouse III.160p.

**Marcos, M., Wöppelmann, G., Bosch, W., Savcenko, R., 2007.** Decadal sea level trends in the Bay of Biscay from tide gauges, GPS and TOPEX. *Journal of Marine Systems* **68**(3-4), pp. 529-536.

**Marple S.L., 1987.,** Digital Spectral Analysis With Applications. Prentice-Hall Signal Processing Series, A.V. Oppenheim Editor.

## Références bibliographiques

---

**Mathews V.J., YOUN D.H., 1984.** Spectral Leakage Suppression Properties of Linear and Quadratic Windowing. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Vol. 32, n°5.

**MAX J., 1981.** Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Tome 1. Masson.

**Max J., Lacoume J.L., 1996.** Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Masson .

**Menendez, M., Woodworth, P.L., 2010.** Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tidegauge data set. *Journal of Geophysical Research* **115**(C10011).

**Miller, L., Douglas, B.C., 2004.** Mass and volume contributions to twentieth-century global sea level rise. *Nature* **428** (6981), pp. 406-409.

**Millot C., 1987.** Circulation in the western Mediterranean sea. *Oceanologica Acte*. Vol 10; .n°2, p: 143- 149.

**Millot C., 1989.** La circulation générale en Méditerranée occidentale : aperçu de nos connaissances et projets d'études. *Annales de géographie*, n° 459, XXVIIIe.

**Monserrat S., Vilibic I., Rabinovich., 2006.** Meteotsunamis : atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunamis frequency band, *Nat Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 1035-1051p.

**Mokhtari M., Marie M., 1998.** Applications de Matlab R5 et Simulink R2. Edition Springer. 477p.

**Mokhtari M., 2000.** Matlab 5.2 et 5.3 et Simulink 2 ET 3 pour ingénieurs. Edition Springer. 246p.

**Moron V, Plaut G., 2003.** The impact of El Niño–southern oscillation upon weather regimes over Europe and the North Atlantic during boreal winter. *International Journal of Climatology* **23**: 363–379.

**Nicholls RJ, Hoozemans FMJ. 1996.** The Mediterranean vulnerability to coastal implications of climate change. *Ocean and Coastal*

**Nicholls, R.J., Cazenave, A., 2010.** Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science* **328**(5985), pp. 1517-1520.

**Nicholls, R.J., Leatherman, S.P., 1994.** The implications of accelerated sea-levelrise and developing countries : a discussion, *J. Coastal Res.*, Special Issue no 14.

**Nicolle A., Karpytchev, M., 2007.** Evidence for spatially variable friction from tidal amplification and asymmetry in the Pertuis Breton (France). *Continental Shelf Research* **27**(18), pp. 2346-2356.

**Nuttal A.H., 1971.** Spectral Estimation by Means of Overlapped FFT Processing of Windowed Data. NUSC Report n° 4169.

## Références bibliographiques

---

**Parker, B.B., 1991.** The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (review). Dans *Tidal Hydrodynamics*, pp. 237-268. New York: John Wiley & Sons.

**Paskoff R., 1993.** Côtes en Danger. Pratiques de la Géographie. Masson: Paris.

**Peltier, W.R., 2001.** Global glacial isostatic adjustment and modern instrumental records of relative sea-level history, in *Sea Level Rise, History and Consequences*, edited by Douglas, B.C., Kearney, M.S., Leatherman, S.P., 37-64, Academic, San Diego, Calif..

**Pirazzoli P.A., 2000.** Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France. *Oceanologica Acta***23**: 643–661

**Pirazzoli, P.A., Tomasin, A., 2007.** Estimation of return periods for extreme sea levels: a simplified empirical correction of the joint probabilities method with examples from the French Atlantic coast and three ports in the southwest of the UK. *Ocean Dynamics* **57**(2), pp. 91-107

**Pirazzoli, P.A., 1986.** Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide-gauge records. *Journal of Coastal Research* **SI**(1), pp. 1-26.

**Pirazzoli, P.A., 1989.** Present and near-future global sea-level changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology***75**(4), pp. 241-258.

**Pirazzoli, P.A., 1996.** *Sea-level changes: the last 20,000 years*, Chichester: John Wiley & Sons, 211p.

**Pirazzoli, P.A., 2000.** Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France. *Oceanologica Acta***23**(6), pp. 643-661.

**Pirazzoli, P.A., Costa, S., Dornbusch, U., Tomasin, A., 2006.** Recent evolution of surge-related events and assessment of coastal flooding risk on the eastern coasts of the English Channel. *Ocean Dynamics* **56** (5-6), pp. 498-512.

**Phillips O.M., 1977.** *The Dynamics of the Upper Ocean*, 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge University Press.

**Pouvreau N., 2008.** Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 474p.

**Pouvreau, N., Martin Miguez, B., Simon, B., Wöppelmann, G., 2006.** Evolution de l'onde semi-diurne M2 de la marée à Brest de 1846 à 2005. *Comptes Rendus Geosciences* **338**(11), pp. 802-808.

**Prandi, P., Cazenave, A., Becker, M. 2009.** Is coastal mean sea level rising faster than the global mean? A comparison between tide gauges and satellite altimetry over 1993–2007. *Geophysical Research Letters***36**(L05602), 5p.

**Pugh, D.T., Maul, G.A., 1999.** Coastal sea level prediction for climate change. *Coastal and Estuarine Studies***56**, pp. 377-404.

## Références bibliographiques

---

- Pugh, D.T., 1987.** Tides, Surges and Mean Sea Level, John Wiley & Sons., Chichester, 472p.
- Pugh, D.T., 2004.** *Changing Sea Levels: Effects Of Tides, Weather, And Climate*, Cambridge University Press, 280p.
- Kinsman B., 1965.** Wind waves, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Rabinovich A.B., 2009.** Handbook of Coastal and Ocean Engineering.
- Sabatier F., 2001.** Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône. PhD thesis, University of Aix-Marseille III, Aix en Provence.
- Sepic J., Vilibic I., Monserrat S., 2009.** Teleconnections between the Adriatic and the Balearic meteoceanic systems. *Physics and Chemistry of the Earth* 34 (2009) 928-937p.
- Symonds, G., Huntley, D.A., Bowen, A., 1982.** Two-dimensional surf beat long wave generation by a time-varying breakpoint. *J. Geophys. Res.*, 87 :492-499.
- Thornton E.B., Dalrymple, R.A., Drake, T., Gallagher, E., Guza, R.T., Hay, A., Holman, R.A., Kaihatu, J., Lippmann, T.C., Ozkan-Haller, T., 2000.** State of near-shore processes research : II. Technical report NPS-OC-00-001, Naval Postgraduate School, Monterey, 2000.
- Ullman A., 2008.** Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques : variabilité contemporaine et future (1905-2100). Thèse de Doctorat. Aix-Marseille I. 250p.
- Vail, P.R., R.M. Mitchum, and S. Thompson, 1977.** Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 4/ Global cycles of relative changes in sea level. In *Seismic stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration* (Memoir 26), C.E. Payton (ed.), Am. Assoc. Petrol. Geol., 83-97
- Welch, P.D., June (1967).** The use of the fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time-averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15: 70-73.
- Woppelman, G., 1997.** Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de Paris.

# **Annexes**

### **I. Définition :**

Le marégraphe est un instrument qui permet de déterminer les fluctuations du niveau de la mer. Initialement, il était destiné à mesurer les oscillations de la marée. Cependant, il peut détecter toutes les oscillations de basses fréquences non-tidales comme les tsunamis, les seiches etc.

### **II : Types de marégraphes :**

Nous présentons ci-après une synthèse des différents types de marégraphes utilisés pour mesurer le niveau de la mer.

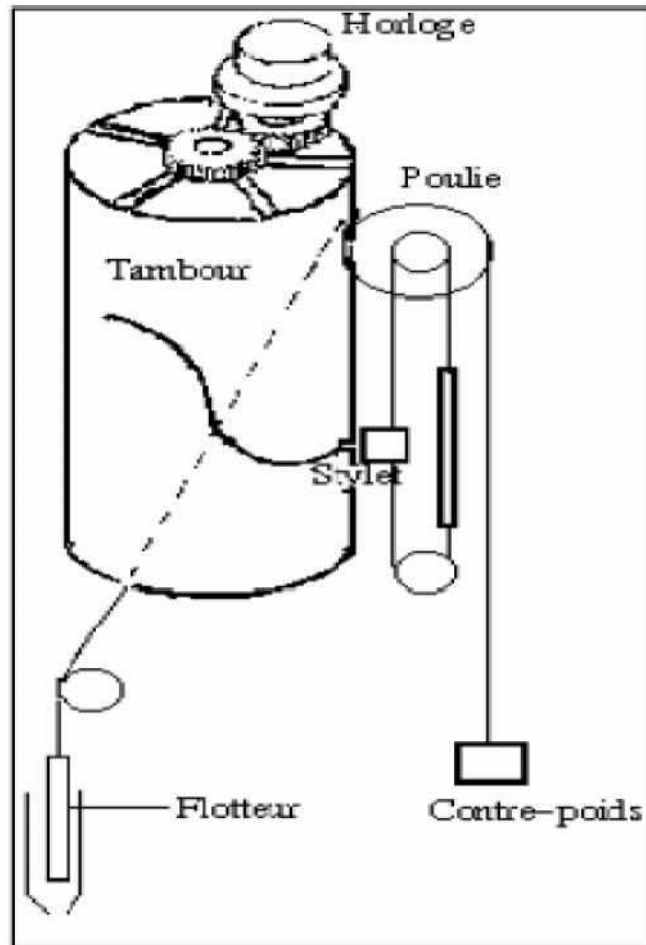
#### **II.1. Les marégraphes analogiques :**

Ce sont essentiellement des marégraphes à flotteur. On utilise le marégramme comme méthode d'enregistrement qui est un graphe de la hauteur en fonction du temps.

Le marégraphe à flotteur est constitué :

- d'un stylet sur un marégramme enroulé sur un tambour tournant entraîné par un système d'horlogerie qui fait un tour en un jour ou un tour en une semaine.
- d'un flotteur suspendu par un fil d'acier souple qui passe sur une grande poulie et il est équilibré par un contrepoids.

Quand le flotteur subit les variations de hauteur, celles-ci sont transmises via le système de poulie qui excite le stylet qui marque la hauteur sur le marégramme. Ce dernier est donc rapporté sur un axe horizontal gradué en heures et un axe vertical gradué en mètres (Fig. n°1).



**Figure.1. Principe d'un marégraphe à flotteur.**

**Les marégraphes numériques :**

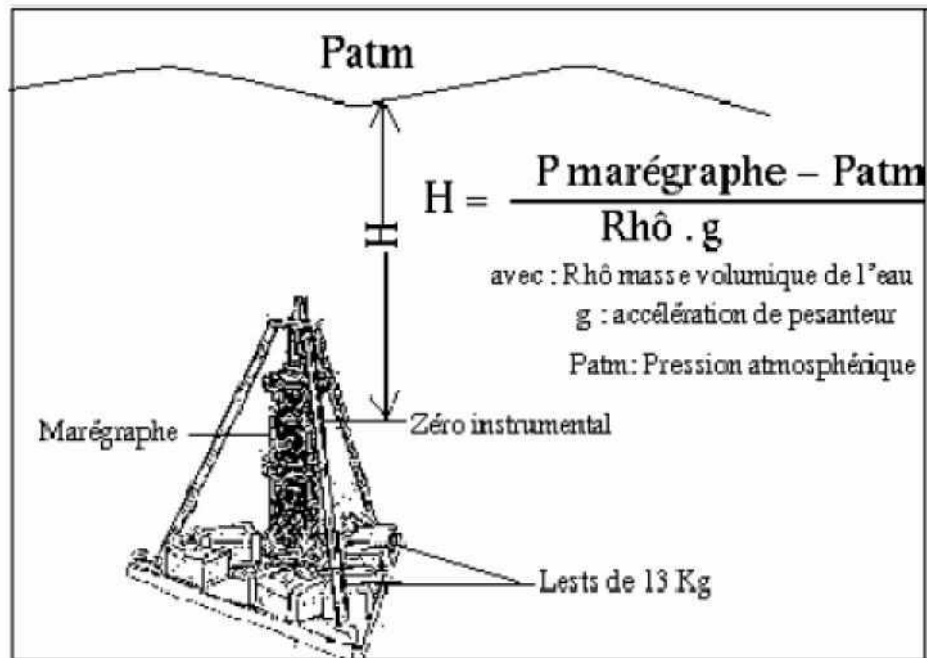
**Les marégraphes à capteur de pression**

Le marégraphe à capteur de pression est un appareil immergé placé au fond de l'eau dans une cage lestée. Le capteur de pression est constitué par un quartz qui fonctionne par effet piézo-électrique, dont la fréquence varie en fonction de la pression et de la température interne du marégraphe.

La pression mesurée par le capteur est la somme de la pression atmosphérique et de la pression due au poids de la colonne d'eau (Fig. n°2).

La variation de la colonne d'eau correspond à la marée observée. La valeur de fréquence émise par le quartz est traduite en une valeur de pression selon un procédé classique en électronique.

En éliminant alors la pression atmosphérique et en reliant la pression restante à la hauteur de la colonne d'eau on aura la valeur de la variation du niveau de la mer (Fig. n°2).



**Figure.2. Principe de mesure d'un marégraphe à capteur de pression**

Les marégraphes à capteur de pression présentent un avantage qui est d'éviter d'importantes infrastructures et de réaliser des mesures au large.

### **Les marégraphes côtiers numériques : (MCN)**

Les marégraphes numériques côtiers fonctionnent par un principe d'émission-réception d'ondes acoustiques (40-50 kHz ou radar (> 1 GHz)). Un transducteur est placé au-dessus de la surface de l'eau, il émet une impulsion et capte le signal réfléchi. Le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal est traduit en hauteur de la colonne d'eau. Le transducteur effectue plusieurs mesures périodiquement puis les mesures sont moyennées afin de limiter les effets de la houle ou du clapot (Fig. n°3).

**Figure.3. Principe de mesure d'un marégraphe numérique côtier**