

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN SCIENCES DE LA MER

OPTION : AMENAGEMENT DU LITTORAL

Thème :

**Etude des élévations soudaines du niveau
de la mer**

Cas d'El Djamila et Ibiza(Espagne)

Présenté par:

- BOULDJA Samira
- RAMI Nabila

Soutenu le 07/07/2011 devant le jury suivant :

Mr.GUERFIL.M	Maître de conférences (ENSSMAL)	Président
Mr.HEMDANE.Y	Maître de conférences (ENSSMAL)	Promoteur
Mr.HELLAL.M	Maître de conférences (ENSSMAL)	Examineur
Mr.BOUAICHA.F	Maître assistant (ENSSMAL)	Examineur

Promotion : 2010-2011

Remerciements

Nous remercions Allah tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement nos parents pour leur soutien moral et financier

Nous exprimons toute notre gratitude à notre encadreur, Mr Hemdane. Y pour la confiance qu'il nous a accordée, et de nous avoir soutenu tout au long de notre projet ainsi que pour ses précieux conseils et encouragements.

Mr. GURFI.M, nous le remercions pour avoir accepté de présider le jury et de nous avoir honorés de leur présence.

Mr. BOUAICHA.F, nous le remercions pour faire partie de notre jury et d'examiner notre travail.

Mr.HELLEL.M, nous le remercions pour faire partie de notre jury et d'examiner notre travail.

Enfin nos vifs remerciements, à toutes les personnes qui nous ont aidés du près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Merci

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A à ma très chère mère qui m'a entouré de son amour, son soutien et qui est toujours à mes côtés que Allah la garde Pour moi.

A mon très cher père qui m'a soutenue et encouragé et qui a tout fait pour mon bien que Allah le garde pour moi.

Merci mes parents

A mon adorable frère : Khaled

A mon adorable sœur : Amel

A Mohammed Radja mon plus chère ami

A ma grand-mère et mon -grand père et mes tantes Malika et Rania

A mon amie wassila wiwiya

A mes spéciales cousines : Zahra et Kenza

A mes cousines : Lynda, Fairouz, Nassima, Kawtar Soussou, Amina, Wassila, Zahiya, Karima, Afa, Yasmina, chahra, Farida, Houria, Rachida, Souad, Zazi.

A mes amies : Bahiya, Khadija, Samira, Amina, Wisam, Samah.

Nabila

Sommaire :

Introduction.....1

Chapitre I : Niveau de la mer :

1. Définition du niveau de la mer.....	4
2. Histoire de l'élévation du niveau de la mer.....	4
3. Les variations du niveau de la mer à long terme selon l'échelle géologique.....	5
• 3.1 Variations affectent le volume de l'eau.....	6
• 3.2 Variation affectant la structure de contenant.....	6
4. Changement à court terme et périodique du niveau de la mer.....	7
5. L'élévation soudaine du niveau de la mer.....	13
• 5.1 Définition des surcotes marines	13
• 5.2 Différentes approches des surcotes marines.....	14
• 5.3 Phénomènes liés aux surcotes.....	14
➤ 5.3.1 Surcotes liées à la marée de tempête ou storm surges.....	14
➤ 5.3.2 Surcotes liées à la pression atmosphérique.....	15
➤ 5.3.3 Surcote liée au wind set up.....	15
➤ 5.3.4 Surcote liée au wave set up.....	16
6. Mesure du niveau de la mer	16
• 6.1. Marégraphe :.....	16
➤ 6.1.1 Définition.....	16
➤ 6.1.2 Les types de marégraphe :.....	17
→ 6.1.2 A- Les observations ponctuelles.....	17
A.1. Échelles de marée.....	17
A.2. Le décamètre ruban.....	17

→ 6.1.2 B-L' observation en continu.....	17
B.1. Les marégraphes à flotteur ou analogiques.....	17
B.2. Marégraphe numérique côtier.....	18
B.3. Marégraphes de pression de fond.....	19
B.4 Les observations à l'aide de récepteurs GPS.....	20
• 6.2. Altimétrie satellitaire.....	20
➤ Principe de l'altimétrie radar par satellite.....	21

Chapitre II : Matériels et méthodes

1. L'analyse spectrale.....	22
• 1.1 Analyse spectrale avec la transformée de Fourier rapide (FFT).....	23
• 1.2 Les paramètres de la FFT.....	24
• 1.3 Efficacité de l'algorithme de la FFT.....	25
2. Estimation de l'énergie spectrale par la méthode de PWELCH utilisé dans le logiciel Matlab.....	25
• 2.1 La densité spectrale d'énergie.....	25
• 2.2 Définition de Pwelch (périodogramme de welch).....	25
• 2.3 Estimateur de WELCH.....	26
3. Le logiciel Matlab.....	29
• 3.1 Définition et utilité.....	29
• 3.2 Espace de travail dans Matlab.....	30

- 3.3 Méthodologie utilisée dans notre étude.....33
 - 3.3.1 Analyse d'un exemple d'un signal du niveau de la mer issue du réseau de sea level facility.....33
 - 3.3.2 La procédure utilisée dans Matlab.....38

- 4. Filtrage du signal avec OriginPro8.....43
 - 4.1 Filtrage.....43
 - 4.3 Les différents filtres existent dans originPro8.....43

CHAPITRE III : Résultats et discussion

- 1.Niveau de la mer brut à Ibiza entre le 6/11/2010 et 30/11/2010 de la station Ibiza2(Espagne).....47
 - 1.1 Densité spectrale d'énergie appliquée au signal temporel (entre 06/11/2010 et 30/11/2010).....48

 - 1.2 Résultats de l'application des filtres band- pass sur le signal brut temporel du marégraphe (entre le 06/11/2010 et 27/11/2010).....50
 - 1.2.1 Application du filtre pour la période entre le 06/11/2010 et 15/11/2010.....
 - 1.2.2. Application du filtre pour la période entre le 14/11/2010 et 27/11/2010.....52

- Conclusion.....55**

Liste des abréviations :

NMLM :	Niveau Moyen Local de la Mer.
mm:	millimètre
cm:	centimètre
brgm:	Géoscience pour une terre durable
giec:	Groupe Intergouvernemental sur le Changement Climatique
S :	Seconde
min :	minute
T :	Période
F :	Fréquence
Hz :	Hertz.
KHz:	Kilohertz
L:	longueur du bassin
n_i:	nombre de vague
g:	gravité
H:	profondeur du bassin
Gloss:	Global Sea Level observation system
Shom:	Service hydrographique et océanographique de la Marine
h:	heurs
Km:	kilomètre
Usgs:	United States of geophysics science

Z:	variation du Niveau de la mer
P:	pression atmosphérique
Swl:	point de déferlement
n_s:	wave set up
β:	Pente régulière d'une plage
MCN:	Marégraphe numérique côtier
GPS:	Global Positioning System
Sonel:	Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales
Cnes:	Centre national d'étude en France
COI :	Comité Intergouvernementale océanographique
t :	temp d'échantillonnage
FFT :	La transformée de Fourier rapide
FFT :	Nombre de point de la transformée de Fourier rapide
Fe :	Fréquence d'échantillonnage
Fmax :	Fréquence maximale
TFD :	La transformée de Fourier discret
PWELCH :	Périodogramme de Welch
Pxx:	C'est le spectre de PWelch
PSD :	La densité spectrale de puissance
ESD :	La densité spectrale d'énergie
d :	décalage

- W :** La fenêtre de pondération.
- X :** C'est la longueur de vecteur utilisée
- n :** Nombre d'échantillons
- K :** Nombre de tranche
- SLSMF:** Sea Level Station Monitoring Facility

Liste des figures :

Figure 1 : Variation du niveau de la mer selon l'échelle géologique.....	5
Figure 2 : Variations du niveau de la mer global au cours des temps géologiques.....	5
Figure 3 : La formation et la destruction des calottes glaciaires.....	6
Figure 4 : La variation du volume des bassins océaniques due aux variations du taux d'accrétion des dorsales.....	7
Figure 5 : Le spectre des ondes marines.....	8
Figure 6 : Les caractéristiques des houles et des vagues	9
Figure 7 : Formation des vagues	9
Figure 8 : Les différents types de marée	11
Figure 9 : Les différentes étapes de la formation d'un Tsunami.....	12
Figure 10 : Schéma simplifié d'une surcote.....	13
Figure 11 : Surcote de pleine mer et surcote instantanée.....	14
Figure 12 : Phénomène de Wind set up.....	15
Figure 13 : Wave set up.....	16
Figure 14 : Marégraphe à flotteur ou analogique.....	18
Figure 15 : Marégraphes numériques.....	19
Figure 16 : Marégraphe de pression.....	16
Figure 17 : Principe de la mesure altimétrique.....	21
Figure 18 : L'estimation de la densité spectrale de puissance.....	27
Figure 19 : Représentation du traitement effectué pour l'obtention d'un périodogramme.....	27
Figure 20 : Traitement du signal en utilisant la méthode de Welch.....	28
Figure 21 : Présentation de fenêtre de commande (commandes window).....	30

Figure 22 : Présentation de fenêtre d'Editor (Edit Window).....	31
Figure 23 : Présentation de fenêtre d'Editor avec la commande Plot.....	32
Figure 24 : Présentation de fenêtre des figures (Figure Window).....	32
Figure 25 : Photo du port d'El Djamila le 09 Novembre 2010 lors de l'élévation soudaine du niveau de la mer.....	33
Figure 26 :Photo des petites embarcations renversées au niveau du port d'El Djamila après l'élévation du niveau de la mer.....	34
Figure 27 : Présentation du site SLSMF.....	35
Figure 28 : Présentation de la station d'Ibiza2.....	35
Figure 29 : Présentation de signal global au niveau du site SLSMF.....	36
Figure 30 : Présentation des données numériques (niveau de la mer) sous forme d'un fichier Excel.....	37
Figure 31 : Présentation de la version R2009a du logiciel MATLAB.....	38
Figure 32 : Présentation l'emplacement des fichiers de MATLAB.....	38
Figure 33 : Présentation du code dans la fenêtre d'Editor.....	41
Figure 34 : Présentation du code dans la fenêtre de commande.....	42
Figure 35 : Présentation des données numériques dans le logiciel OriginPro 8.....	44
Figure 36 : Importation des données vers OriginPro 8.....	45
Figure 37 : Présentation du signal au niveau d'OriginPro 8.....	45
Figure 38 : Signal brut temporel du marégraphe prélevé entre le 6/11/2010 et 31/11/2010 de la station Ibiza2.....	47
Figure 39 : La densité spectrale d'énergie des fréquences du spectre globale.....	49
Figure 40 : Détaille de la densité spectrale d'énergie du spectre des oscillations de haute fréquence relative au Météo Tsunami (période entre 1min et 3h).....	49

Figure 41: Signal brut temporel du marégraphe prélevé entre le 6/11/2010 et 27/11/2010 de la station Ibiza2 découpé en deux parties.....	50
Figure 42: Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre 6/11/2010 et 15/11/2010 ; isolation de la marée (trait violé).....	51
Figure 43: Résultats du filtre band pass entre 1min et 3h de la période entre 6/11/2010 et 15/11/2010 ; isolation de la marée (trait violé).....	52
Figure 44: Résultats du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre 14/11/2010 et 27/11/2010 ; isolation de la marée (trait violé).....	53
Figure 45: Résultats du filtre band pass entre 1min et 3h de la période entre 14/11/2010 et 27/11/2010 ; isolation de la marée (trait violé).....	54

Liste des tableaux :

Tableau n°1 : les différentes causes de la variation du niveau de la mer à court terme

Introduction

Introduction

L'élévation soudaine du niveau de la mer est un phénomène qui se distingue de l'élévation contemporaine du niveau de la mer qui est induite par le réchauffement planétaire. 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.

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 contraintes météorologiques et sismiques que par la force des astres qui environnent notre planète.

En effet, même quand elle semble stable, la mer est en réalité en perpétuel mouvement. Et en raison de la basse fréquence ($f < \text{min}^{-1}$) de certaines oscillations de la mer, il est souvent très difficile d'observer certains battements de la mer comme la marée et les seiches, sauf si l'observateur reste concentré fixement sur le niveau de la mer au rivage, pendant des minutes voire des heures. Cependant, d'autres ondulations de haute fréquence ($f > \text{min}^{-1}$) comme les vagues et la houle sont facilement décelables 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 l'élévation soudaine du niveau de la mer est minimisé par la quasi-absence des oscillations tidales. Cependant, plusieurs études et observations ont montré que les côtes Méditerranéennes sont un des endroits où l'élévation soudaine du niveau de la mer est fréquemment observée (**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 (durée entre deux crêtes successives de quelques minutes à 2-3 h). 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 (notamment ceux qui sont mal dimensionnés), ces ondes marines peuvent rentrer en résonance avec la résonance propre des baies et des ports pour générer des seiches (ondes très dangereuses à l'intérieur des ports). Par conséquent, les ports et les baies sont des facteurs pouvant amplifier les météotsunamis. Et c'est possiblement ce qui a été remarqué lors des inondations observées au niveau du Port d'El Djamila le 09 novembre 2010, où une hausse soudaine très importante du niveau de la mer avait été observée, tandis qu'au niveau des autres ports limitrophes, aucune hausse significative n'avait été observée.

Il est aussi très important de rappeler qu'à la côte, notamment sur les côtes basses (littorales à pentes faibles), ces ondes de basse fréquence peuvent amplifier l'effet du *run up* (propagation horizontale du déferlement des vagues sur la côte).

L'objectif de notre travail est d'essayer de comprendre ce qui s'est réellement produit au port d'EL Djamila, lors de la nuit du 09 novembre 2010. Cependant, en l'absence d'un marégraphe numérique sur la côte algérienne, nous avons ausculté les signaux du niveau de la mer mesurés par un des marégraphes numériques du réseau de la COI (Commission *Océanographique* Intergouvernementale), localisé à Ibiza (Iles Baléares, Espagne).

Dans cette étude, nous privilégions une approche méthodologique basée sur le traitement du signal hydrodynamique (niveau de la mer) en utilisant deux logiciels de programmations (*Matlab et OriginLab*).

Le travail regroupe trois parties:

- **Partie I** : cette partie est consacrée à la définition des oscillations que peut comprendre le niveau brut de la mer ;
- **Partie II** : celle-ci est réservée à la méthodologie appliquée pour l'auscultation du niveau de la mer mesuré par un des marégraphes numériques du réseau de la COI (Commission *Océanographique* Intergouvernementale), localisé à Ibiza (Iles Baléares, Espagne).

- **Partie III** : elle comprend les résultats 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 : Niveau de la mer

1. Définition du niveau de la mer :

Le niveau de la mer est la hauteur moyenne de la surface de la mer, par rapport à un niveau de référence. C'est aussi le profil de la mer après l'extraction de toutes les ondes de hautes et de basses fréquences.

Le Niveau Moyen Local de la Mer (NMLM) est défini comme étant la hauteur de la mer par rapport à un point de référence sur terre, et en moyenne, sur une période de temps suffisamment longue (un mois à une année) pour que la valeur soit indépendante des fluctuations causées par les vagues, les houles, la marée et les ondes générées par les perturbations atmosphériques.

En effet la surface de la mer n'est pas plane elle est en perpétuel mouvement parce qu'elle subit continûment des perturbations de haute et de basse fréquence (de quelques secondes à quelques jours), sous l'effet des vagues, de la houle, de la marée, et de la pression atmosphérique.

2. Histoire de l'élévation du niveau de la mer :

L'élévation du niveau de la mer est une conséquence du changement du niveau de la mer à court terme et à long terme. Depuis la naissance de la Terre, il y a toujours eu des changements du niveau de la mer.

Depuis le pic de la dernière glaciation, le niveau de la mer s'est élevé d'environ 120 mètres. Alors que depuis 3000 ans avant aujourd'hui et jusqu'au début du 19^{ème} siècle le niveau de la mer n'a pratiquement pas bougé (il a augmenté d'environ 0,1 mm à 0,2 mm par an). (science.gouv.fr).

En ce qui concerne le niveau de la mer en méditerranée, celui-ci a augmenté de 2,5 à 10 mm par an depuis les années 1900 et si la tendance se poursuit, il pourrait augmenter de 12,5 à 50 cm dans les 50 prochaines années (**Zemmour et Limam 2010**).

3. Les variations du niveau de la mer à long terme selon l'échelle géologique :

Elle jalonne l'histoire géologique de la planète qui a connu des périodes glaciaires et des périodes post-glaciaires (dépendant du climat).

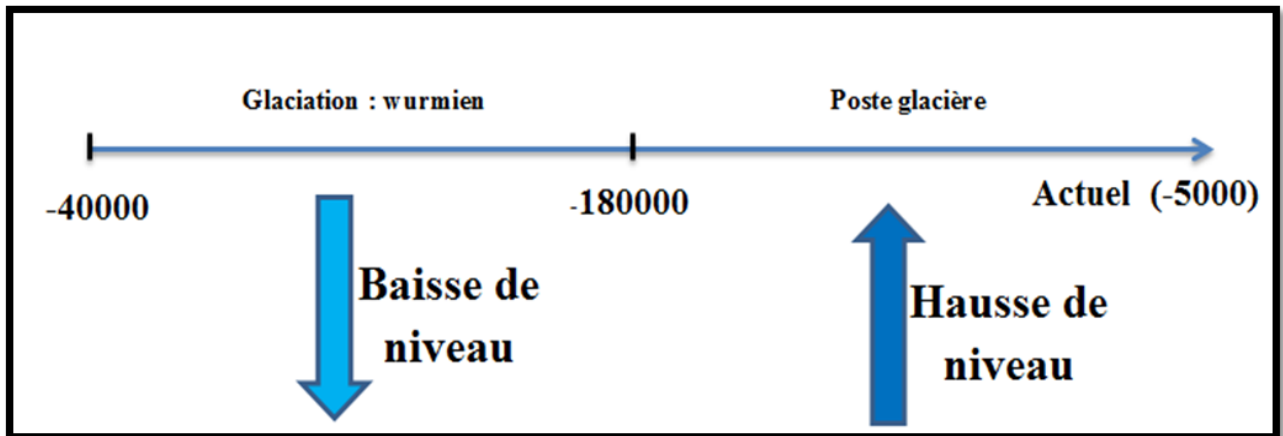
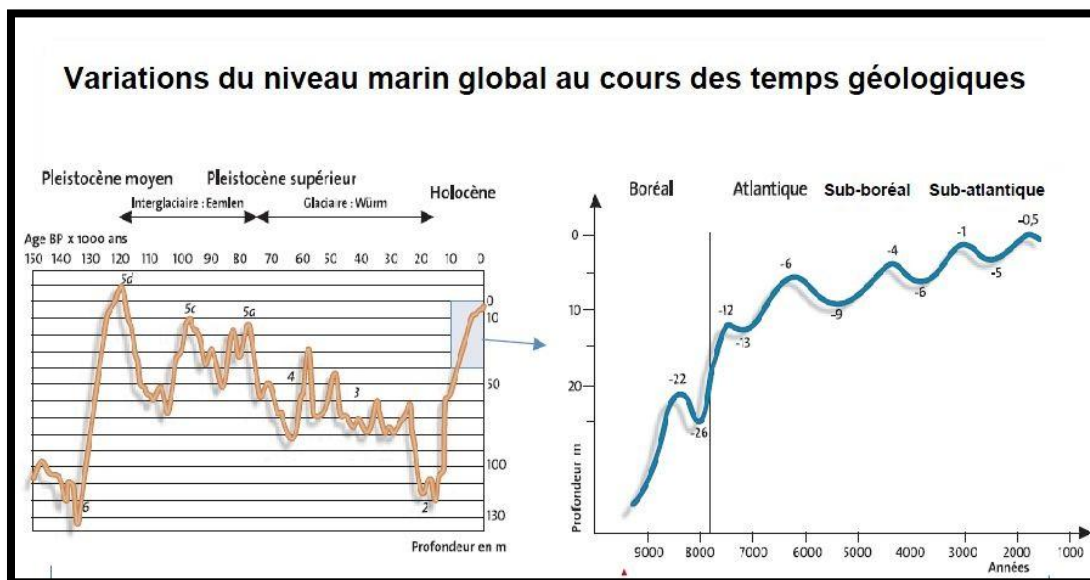


Figure 1 : Variation du niveau de la mer selon l'échelle géologique



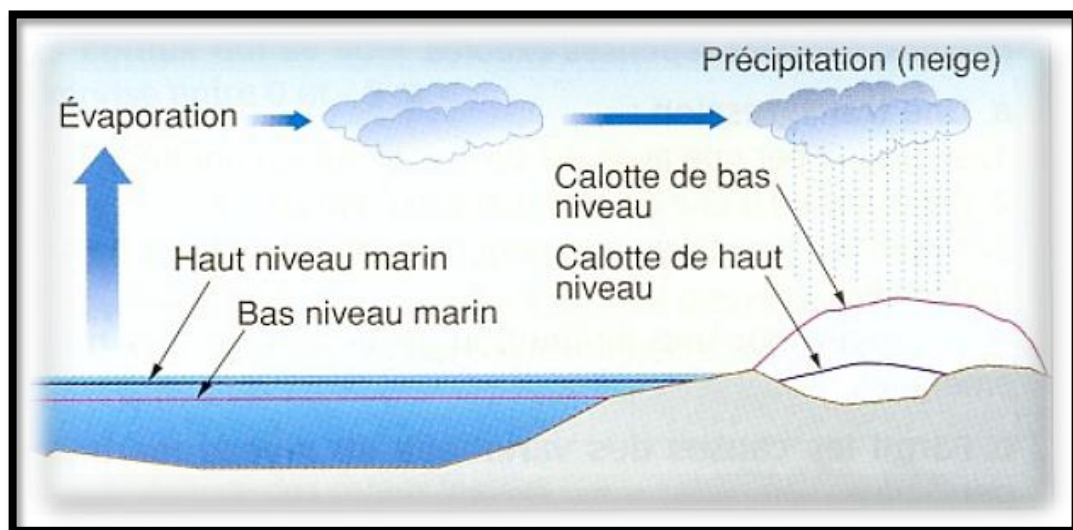
Source : Brgm

Figure 2 : Variations du niveau de la mer global au cours des temps géologiques

3.1. Variations affectant le volume de l'eau :

→ La formation et la destruction des calottes polaires : Cela se produit lorsque la température varie suffisamment pour permettre une modification des échanges entre l'eau liquide et la glace.

→ La dilatation thermique de l'eau : En se réchauffant l'eau se dilate; les molécules d'eau s'agitent davantage ce qui provoque une augmentation relative du volume qu'elles occupent. Ainsi, à l'échelle planétaire, suite à l'augmentation de la température atmosphérique, l'eau superficielle des océans se réchauffe ce qui peut rendre compte de 10 cm d'élévation au cours du siècle dernier (Giec ,2007).



Source : Giec 2007

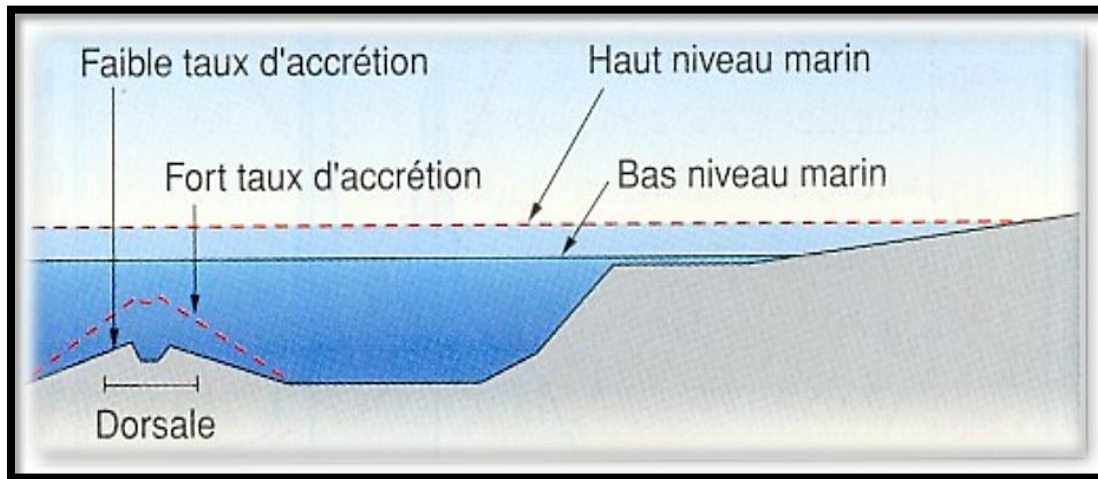
Figure 3 : La formation et la destruction des calottes glaciaires

3.2. Variation affectant la structure du contenant :

Elles sont provoquées par différents phénomènes tels que la géodynamique des fonds, la formation des rides et des dorsales océaniques, et apparition des failles.

La variation du volume des bassins océaniques est contrôlée essentiellement par les variations du taux d'accrétion des dorsales, lié à leur activité :

→ Lorsque le taux d'accrétion est élevé, le volume de la dorsale augmente et cela entraîne une élévation du niveau marin qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres (Giec,2007).



Giec 2007

Figure 4 : La variation du volume des bassins océaniques due aux variations du taux d'accrétion des dorsales

Sur le plus long terme, le Groupe Intergouvernemental sur le Changement Climatique a conclu que, sur la base des informations existantes, le niveau de la mer a monté globalement de 10-25 cm environ au cours du siècle passé, et pourrait s'élever de typiquement 50 cm au cours du prochain siècle (Gloss ,2009).

4. Changement à court terme et périodique du niveau de la mer :

La surface des océans et des mers connaît des modifications périodiques ou aléatoires, dans le temps et dans l'espace, qui la font monter ou descendre au gré des mouvements des marées, des vagues, de la houle, des courants et des changements de la pression atmosphérique.

Par conséquent la mer est en permanence soumise à des forces diverses. Et celles qui affectent le plus le niveau de la mer est l'action astronomique des astres (ce qu'on appelle la marée astronomique) et aussi les effets de la pression atmosphérique qui sont loin d'être négligeables.

La réponse de la mer à l'action de l'atmosphère est diverse. Cela va du simple clapotement (petites vagues) au train de houles résiduelles qui arrive sur nos côtes à partir d'une perturbation lointaine. Ces ondes de faible période (2 à 20 secondes) sont générées par les vents qui soufflent en surface.

Plusieurs facteurs peuvent être générateurs d'ondes marines, qui sont comprises dans un spectre allant de quelques secondes jusqu'à quelques jours :

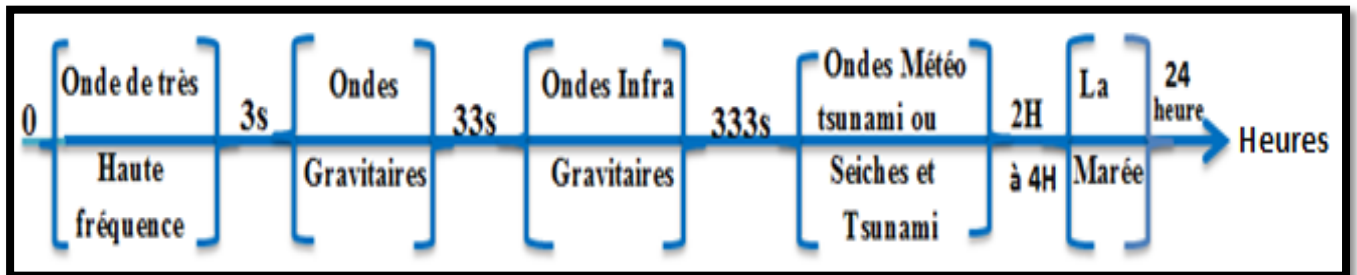


Figure 5 : Le spectre des ondes marines

- **Types d'ondes :**

- ❖ Les ondes de très hautes fréquences (de capillarité) : Ce sont des petites rides générées par un faible vent, d'une période inférieure à 3 secondes, qui se dissipent rapidement par frottement interne à la masse d'eau ;

- ❖ Les ondes de hautes fréquences (gravitaire) : Ce sont des vagues générant une énergie importante, qui sont caractérisés par une gamme fréquentielle comprise entre 3 et 33 secondes. Les ondes de gravités regroupant la houle et la mer du vent. Et leur principale source d'amortissement est la pesanteur ;

- ◆ Houle :

- La houle à la surface de la mer présente généralement une suite indéfinie d'ondulations générées au large, dans la zone du Fetch. En se propageant vers la côte, celle-ci, en l'absence du vent, devient de plus en plus « belle », presque mathématique et est souvent un effet de transport d'énergie offshore-on shore.

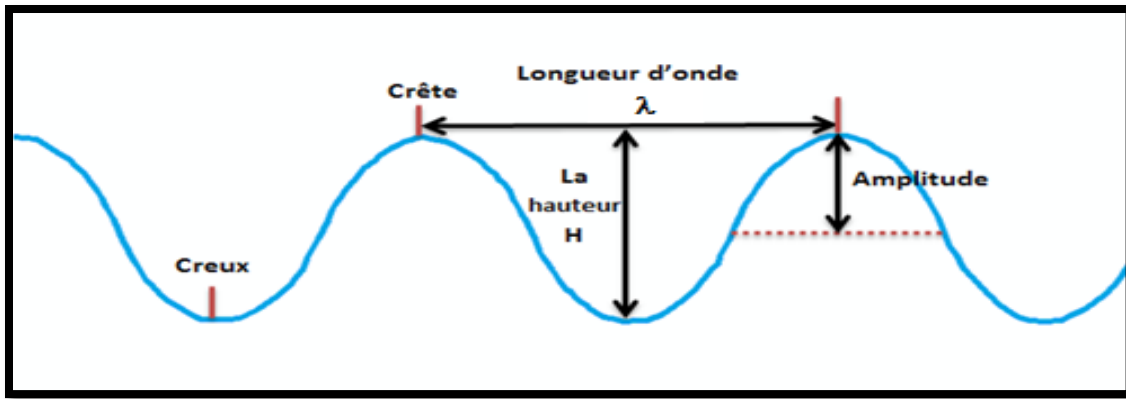


Figure 6 : Les caractéristiques des houles et des vagues

◆ Mer du vent (sea waves) :

La "mer du vent" désigne l'ensemble des vagues générées par un vent local. Ce sont des ondulations qui progressent et évoluent en présence du vent. Ce dernier, agissant sur leur profil, les rend de plus en plus irrégulières et réelles.

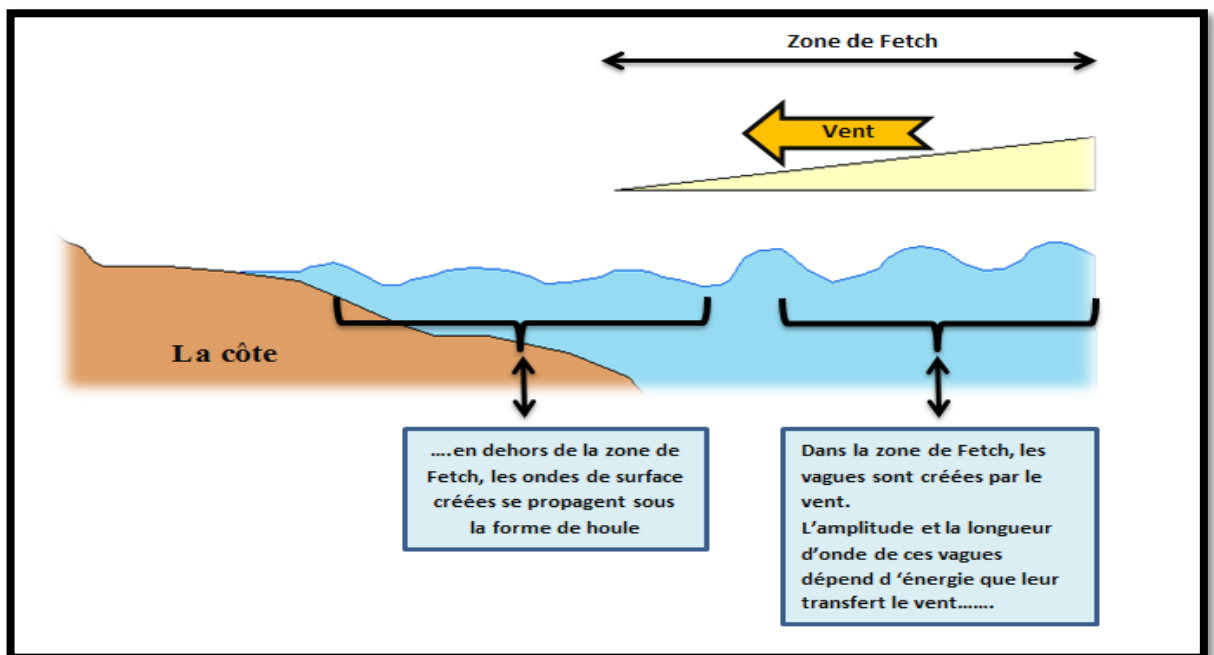


Figure 7 : Formation des vagues

❖ Les ondes infra-gravitaires :

Ce sont des ondes qui ont une fréquence comprise entre 0,003Hz et 0,03Hz respectivement pour des périodes de 333 s et 33 s, qui pourraient être générées, entre autres, par le battement du point de déferlement des vagues et les oscillations dues aux trains d'ondes (**Hemdane, 2006**). La hauteur de ces vagues infra-gravitaires est relativement faible; elle est souvent comprise entre 20 cm et moins d'un mètre .Cependant, ces vagues n'étant pas hautes, peuvent être à l'origine d'un run up sur la côte, notamment sur des cotes à faible relief.

❖ Les seiches (ou Météo Tsunami) :

Les seiches sont des oscillations stationnaires générées par des perturbations externes comme les vagues piégées dans des zones plus ou moins confinées. Ces ondes sont souvent observées dans des zones semi-fermées telles que les baies, les estuaires ou les ports. Elles ont une période propre dépendante de la géographie et de la bathymétrie des zones, souvent comprise entre 10 minutes et quelques heures, et plus faible dans les ports (30 s à 10 min). Et leur est purement météorologique (**Haslett et al ,2009**) ;

A l'intérieur des baies, des ports la période propre de ces bassins peut rentrer en résonance avec des ondes longues issues des perturbations externes (pressions atmosphériques, vents, séismes). Cette période pourrait être estimée par la formule de Merian (**Raichlen, 1966; Rabinovich, 1993**) qui, pour un bassin rectangulaire, est :

$$T_n = \frac{2L}{n_i \sqrt{gH}} \dots\dots\dots (1-I)$$

Avec

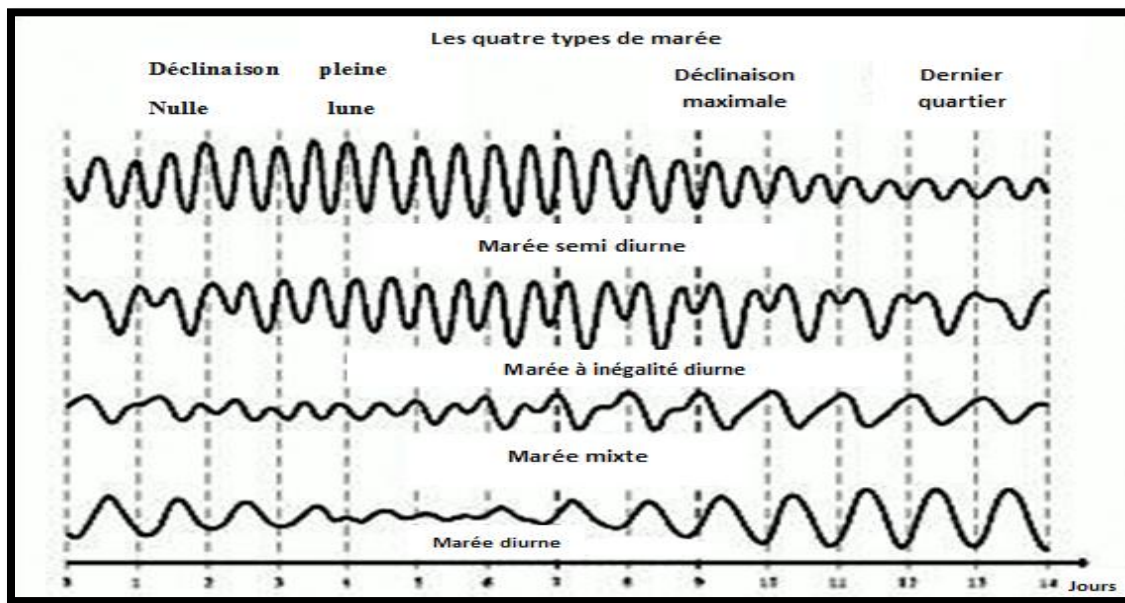
T_n : période estimée en seconde , n_i (nombre de vague) = 1, 2, 3,...

L: longueur du bassin , H : étant la profondeur du bassin et g:gravité

❖ La Marée (onde tidale) :

La marée astronomique est l'évolution périodique du niveau de la mer sous l'effet des mouvements du soleil, de la lune et à moindre effet d'autres corps célestes. Le niveau de la mer est mesuré à l'aide d'instruments appelés marégraphes ou grâce à des altimètres radar embarqués sur des satellites. La force génératrice de la marée prend la forme d'une onde générée de manière diffuse à travers les océans. Cette onde se propage avec une vitesse

dépendant de la profondeur, se réfléchit sur les talus continentaux (remontée des fonds marins au large des côtes), générant des interférences qui peuvent renforcer ou au contraire atténuer certaines fréquences. C'est ainsi que certains bassins océaniques privilégient les composantes semi-diurnes (deux marées hautes par jour) tandis que d'autres privilégient les composantes diurnes (une marée haute par jour) (**Shom.fr**).

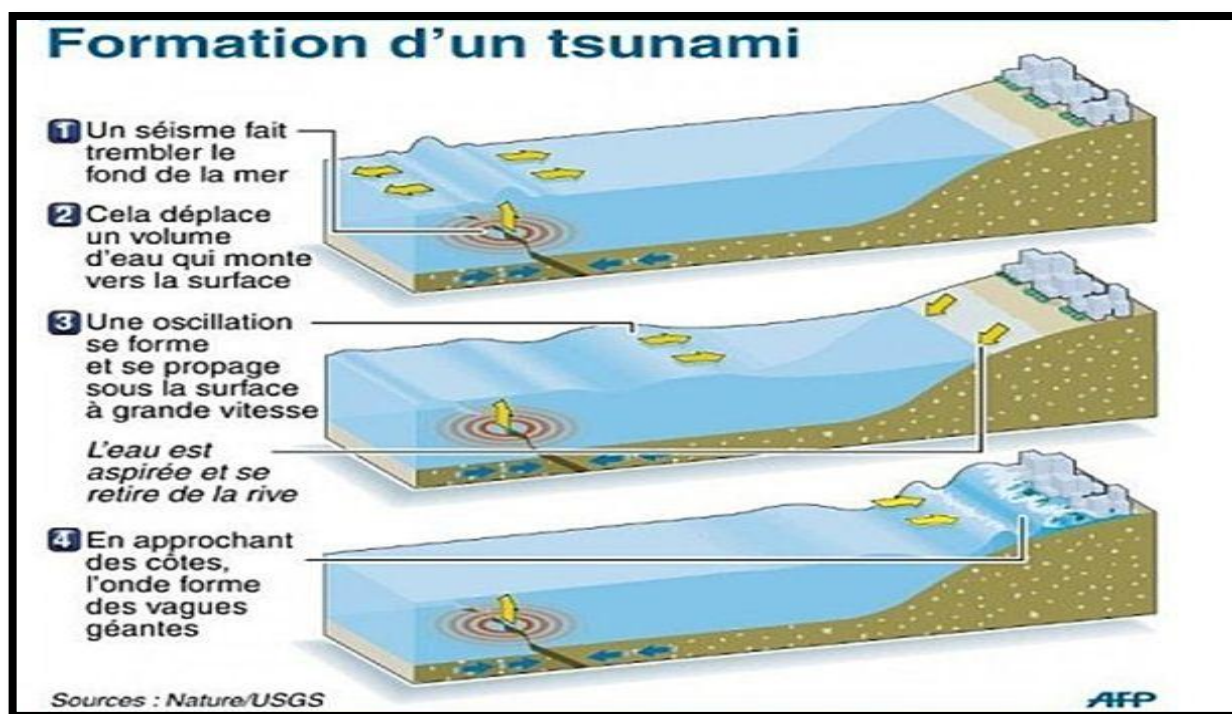


Source : Shom.fr

Figure 8: Les différents types de marées

❖ Tsunami:

Les tsunamis sont provoqués par un mouvement géologique brutal (séisme, glissement de terrain, chute d'astéroïde, les explosions volcaniques ,etc.) et se manifestent sous la forme d'une onde océanique de longueur généralement supérieure à la centaine de kilomètres (distance entre deux crêtes successives), se propageant très rapidement (jusqu'à 800 km/h). Dans les eaux profondes, la hauteur de ces vagues est faible (quelques dizaines de centimètres). Cependant, au fur et à mesure que ces vagues se rapprochent de la côte, elles commencent à subir l'effet du fond (*Shaoling*) et leurs hauteurs augmentent sensiblement et pouvant dépasser 10 m (hauteur). La plupart des tsunamis prennent naissance à proximité des zones fortement sismiques. S'amortissant lentement, l'onde peut traverser tout l'océan. Ainsi, plus le volume d'eau déplacé est grand, plus la distance parcourue par les tsunamis sera longue, plus le nombre de pays concernés sera élevé et plus les dégâts risquent d'être important (**Pattiaratchi et Wijeratne, 2009**). Les périodes des vagues de tsunamis peuvent aller de quelques petites minutes à 2 - 3 h.



Source : Usgs

Figure 9 : Les différentes étapes de la formation d'un Tsunami

Cause à court terme	Échelle de temps	Effet vertical
Changement périodique du niveau de la mer		
Marée astronomique (diurnes et semi-diurnes)	12h à 24h	0,2 à 1,6 mètre
Marée à longue période	>14jours	<0,01 mètre
Fluctuation météorologique et océanographique		
Pression atmosphérique	Quelques heures à quelques mois	-0,7 à 1,3 mètre
Vent (onde de tempête)	1 à 5jours	<8 mètre
Seiches		
Seiches (vagues stagnantes)	Quelque minute à quelque heure	Jusqu'à 2 mètres
Séismes		
Tsunami (vague à longue période et catastrophique)	Quelques minutes à une heure	Jusqu'à 10mètres (inondation)

Source : Shom.fr

Tableau n°1 : les différentes causes de la variation du niveau de la mer à court terme

5. L'élévation soudaine du niveau de la mer :

L'élévation soudaine du niveau de la mer est un phénomène qui se distingue de l'élévation contemporaine du niveau de la mer qui est induite par le réchauffement planétaire. 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.

5.1. Définition des surcotes marines

Les « surcotes » désignent les variations généralement petites (de l'ordre de grandeur d'un à cinq mètres) du niveau de la mer qui s'ajoute aux élévations supérieures du niveau de la mer dues aux marées, aux tsunamis ou aux seiches.

Les surcotes marines sont des élévations exceptionnelles du niveau de la mer qui durent quelques heures et peuvent atteindre plusieurs mètres au-dessus de son niveau habituel, sont liées principalement à des ondes ou crues de tempête, elles-mêmes dues à des facteurs météorologiques (**Simon, 1994**). On peut aussi définir la surcote marine comme étant la différence positive entre le niveau marin observé (filtré des oscillations rapides comme les vagues) et le niveau de la marée astronomique. La surcote a une origine essentiellement météorologique. Elle résulte des effets combinés du vent (force et direction) et de la pression atmosphérique (**Paskoff, 2001**). Un vent soufflant du large accumule l'eau à la côte engendrant ainsi un effet de surcote. Cet effet est considérablement amplifié par faible profondeur ou avec une côte en forme d'entonnoir (estuaire, baie...). Ces deux effets, vent et pression, sont généralement associés lors d'épisodes tempétueux ou de cyclones tropicaux. Outre le vent et la pression, le déferlement des vagues à la côte contribue, dans une moindre part, à l'effet de surcote (**shom.fr**).

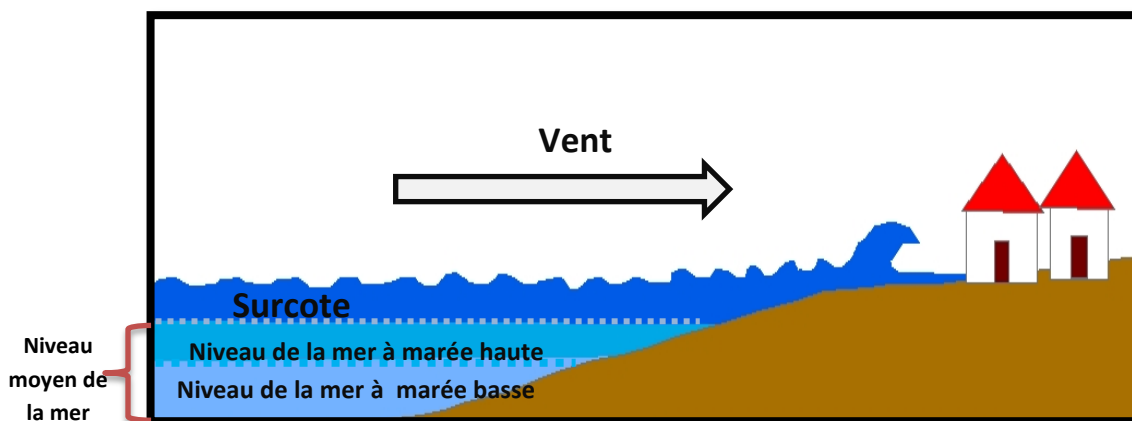


Figure 10: Schéma simplifié d'une surcote

5.2. Différentes approches des surcotes marines :

Les surcotes marines sont définies comme la différence positive entre le niveau marin réel et le niveau théorique de la marée astronomique. Cependant il faut bien différencier surcote de pleine mer et surcote instantanée.

La surcote de pleine mer est la différence entre le niveau marin maximum observé et le niveau de pleine mer astronomique alors que la surcote instantanée est la différence à tout instant entre les deux niveaux(**Shom.fr**).

Les différentes méthodes d'évaluation des surcotes s'appuient en effet tantôt sur la surcote de pleine mer, tantôt sur la surcote instantanée.

Le schéma suivant représente à un endroit donné le niveau de la mer en fonction du temps :

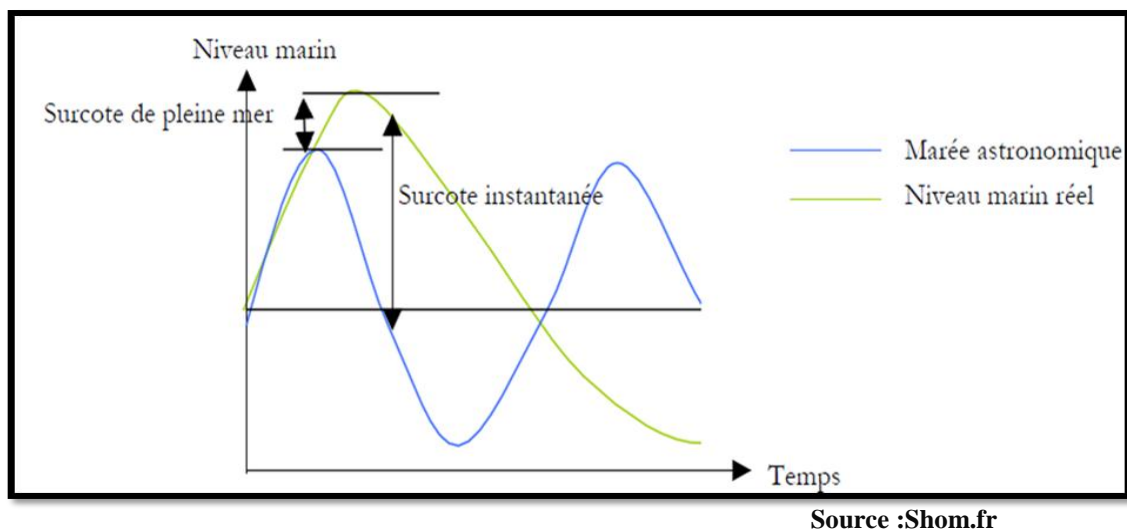


Figure11: Surcote de pleine mer et surcote instantanée

5.3 Phénomènes liés aux surcotes :

La propagation des surcotes est différente suivant les conditions locales telles que la profondeur des eaux.

5.3.1 Surcotes liées à la marée de tempête ou storm surges :

Les surcotes engendrées sont d'origine météorologique. Lors de passages dépressionnaires, les champs de pression atmosphérique et de vent induisent des modifications de la surface de la mer. Le vent est engendré par les forces de pression, il est en relation directe avec la

position des dépressions et des anticyclones. La vitesse du vent augmente avec l'intensité des variations de pressions. La marée de tempête, phénomène régulier d'une échelle de temps de quelques heures à une journée, génère des vagues longues d'approximativement la largeur du centre de la dépression soit entre 150 et 800 km (Schwartz, 2005).

5.3.2 Surcotes liées à la pression atmosphérique :

Effet barométrique inverse :

Les faibles pressions provoquent une surcote. A l'inverse, les hautes pressions provoquent une décote. Ce phénomène est appelé effet barométrique inverse.

La variation du niveau de la mer liée à la pression atmosphérique est estimée par :

$$Z = 0.01 (1013-p) \dots\dots\dots (2 - I)$$

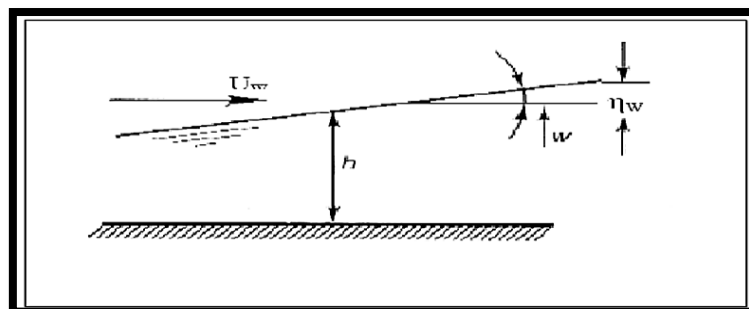
Où z est la variation du niveau de la mer en Cm, p est la pression atmosphérique en hectopascal, 1013 hPa étant la pression dans des conditions normales (Shom.fr).

Ainsi une baisse de pression d'un hectopascal élève le niveau marin d'environ un centimètre (Deanet et Dalrymple, 2001).

5.3.3 Surcote liée au wind set up :

Lorsque le vent souffle vers la cote , il peut générer une élévation du niveau de la mer et donc un potentiel.

La contrainte exercée par le vent à la surface de la mer peut provoquer une surcote η_w . Les caractéristiques des champs de vent (direction, vitesse et durée d'action) permettent d'évaluer ce wind set up (Ciria,1991).

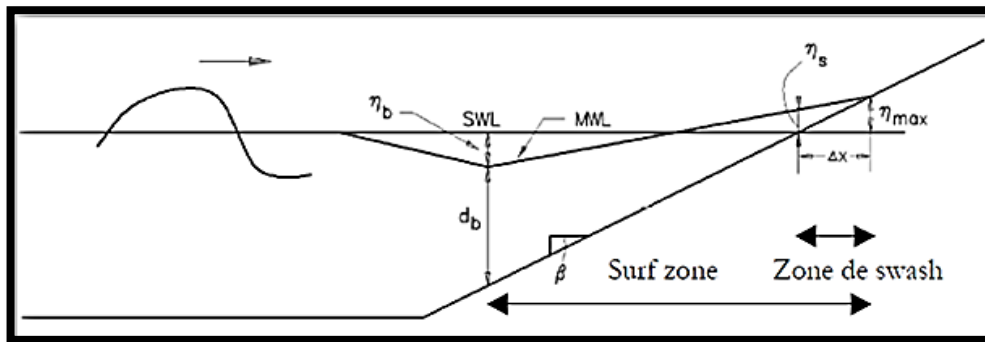


Source : Ciria 1991

Figure 12: Phénomène de Wind set up

5.3.4 Surcote liée au wave set up : (appelé aussi η_s)

C'est l'élévation du niveau de la mer sur le trait de côte liée à l'action des vagues. Cette surcote intervient donc uniquement à proximité de la côte puisqu'elle est provoquée par la dissipation d'énergie due au déferlement des vagues arrivant à la côte.



Source : Coastal engineering manual 2002

Figure 13 : Wave set up

Swl : point de déferlement ;

η_s : wave set up

Sur une plage de pente régulière β , le wave set up η_s augmente linéairement à partir du point de déferlement, noté SWL sur la figure.

6. Mesure du niveau de la mer :

6. 1. Marégraphe :

Les mesures des marégraphes représentent les premières observations directes du niveau de la mer effectuées de manière continue et automatique par l'Homme. L'analyse des données marégraphiques nous permet de mieux appréhender les mécanismes physiques qui sont à l'origine de la variabilité de cette grandeur.

6. 1. 1 Définition :

Un marégraphe est un instrument qui permet de mesurer le niveau de la mer à un endroit donné, son principe est simple, on le situe dans un emplacement précisément identifié, le marégraphe enregistre le niveau de la mer au cours du temps.

6.1.2 Les types de marégraphes :

Il existe deux types de marégraphe selon leur principe d'observation.

A- Les observations ponctuelles :

A.1. Échelles de marée :

Ce système de mesure est intéressant par sa simplicité : C'est une mire graduée en bois ou en plastique placée verticalement ; la graduation est formée de deux bandes de carreaux de dix centimètres de côté, alternativement rouges et noirs (**Pouvreau, 2008**).

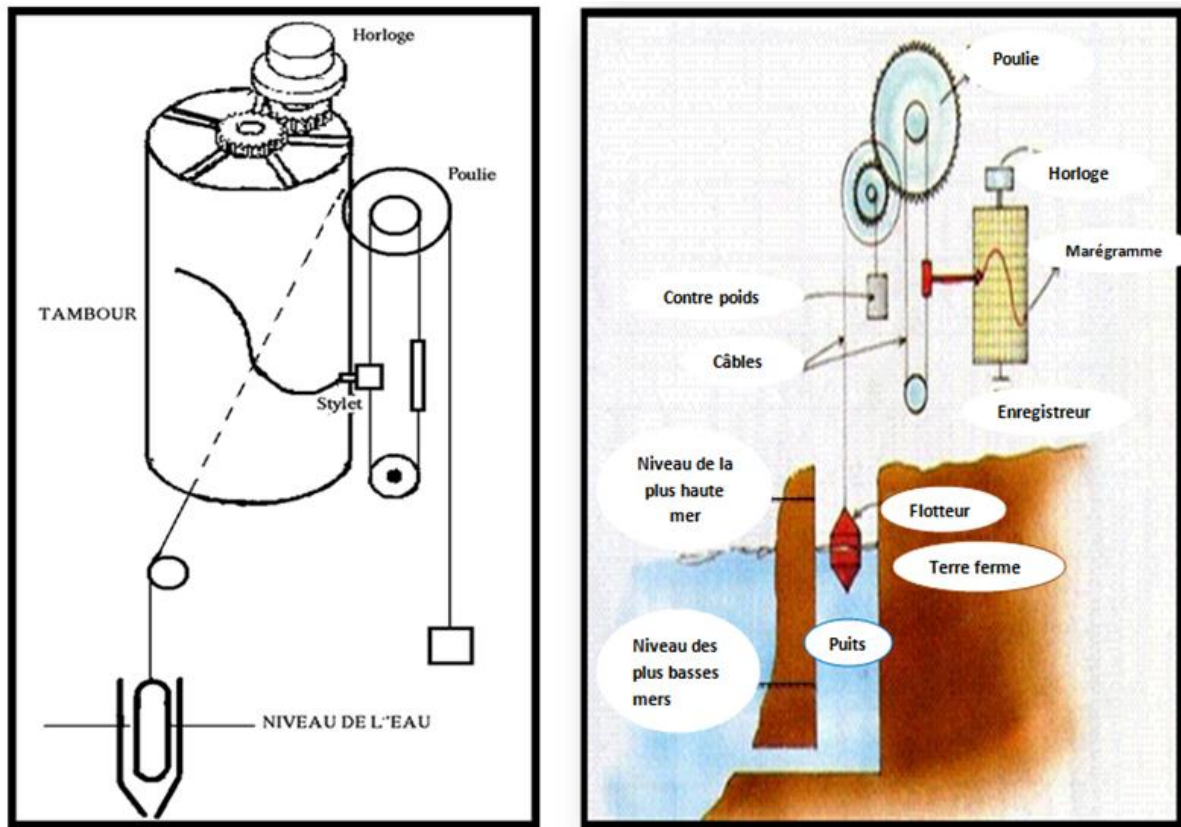
A.2. Le décamètre ruban :

C'est un simple décamètre ruban au bout duquel est quelquefois fixée une sonde. Ce ruban est enroulé sur un touret. Le ruban est déroulé le long du quai. Lorsque la sonde est en contact avec l'eau, une ampoule s'allume sur le touret. On lit alors la graduation sur le ruban (**Shom.fr**).

B-L' observation en continu :

B.1. Les marégraphes à flotteur ou analogiques :

Le déplacement vertical d'un flotteur est réduit d'un facteur d'échelle donné, et transmis à un style inscripteur par un ensemble plus ou moins compliqué de fils, de poulies, de contrepoids et d'engrenages démultiplicateurs, le style marque un papier, calé autour d'un cylindre qui est animé d'un mouvement de rotation uniforme, de vitesse connue, en général un tour par jour. On obtient ainsi un enregistrement analogique sous forme de rouleau de papier, appelé marégramme, dont il est rapporté à un axe horizontal des abscisses graduées en heures et un axe vertical des ordonnées graduées en mètres.

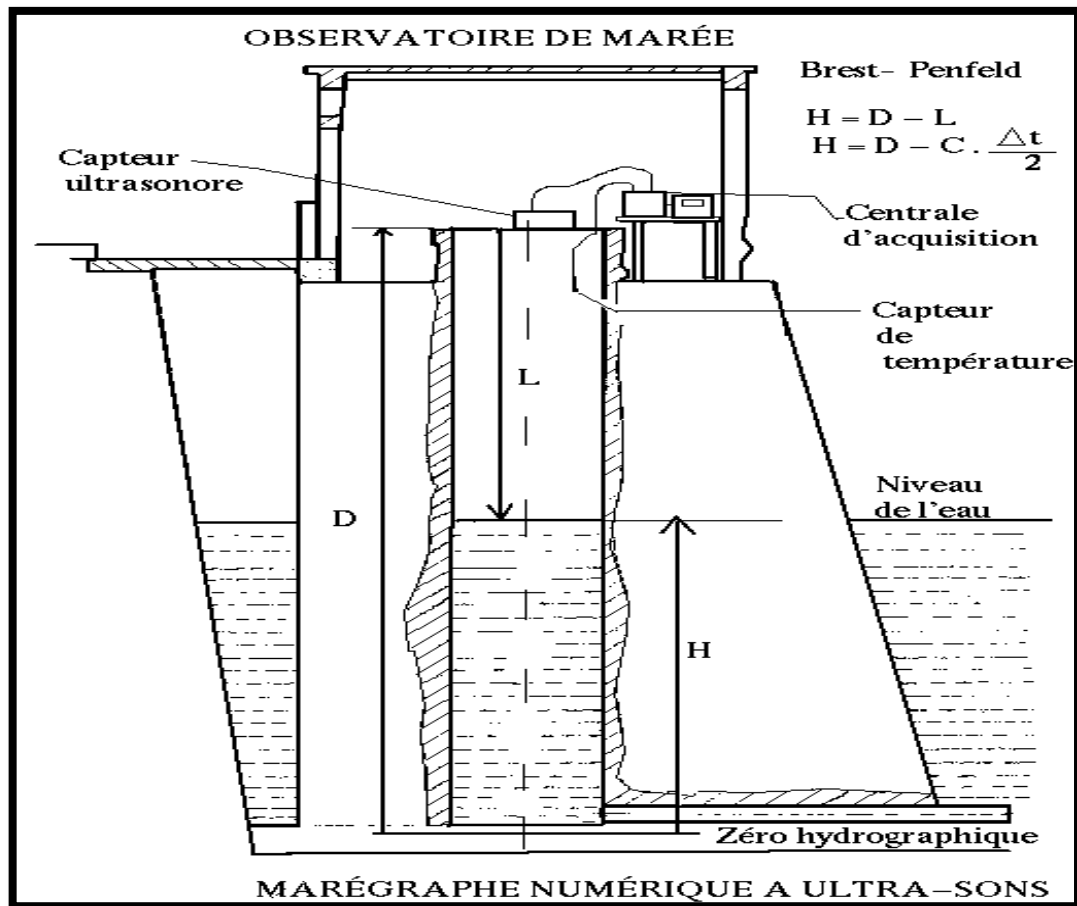


Source : Shom.fr

Figure 14 : Marégraphe à flotteur ou analogique

B.2 Marégraphe numérique côtier : (MCN)

Les marégraphe numériques côtiers fonctionnent par un principe d'émission-réception d'ondes acoustiques (40-50 kHz). 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 (Pouvreau, 2008).



Source : Shom.fr

Figure 15: Marégraphes numériques

B.3 Marégraphes de pression de fond :

Les marégraphes à capteur de pression sont placés au fond de l'eau, ils mesurent la pression environnante. Cette pression est caractéristique de la hauteur de la colonne d'eau et de la pression atmosphérique en surface. Les marégraphes à pression sont particulièrement adaptés aux sites dépourvus d'infrastructures importantes, ou encore, aux observatoires qui sont soumis à des conditions environnementales (**Shom.fr**).

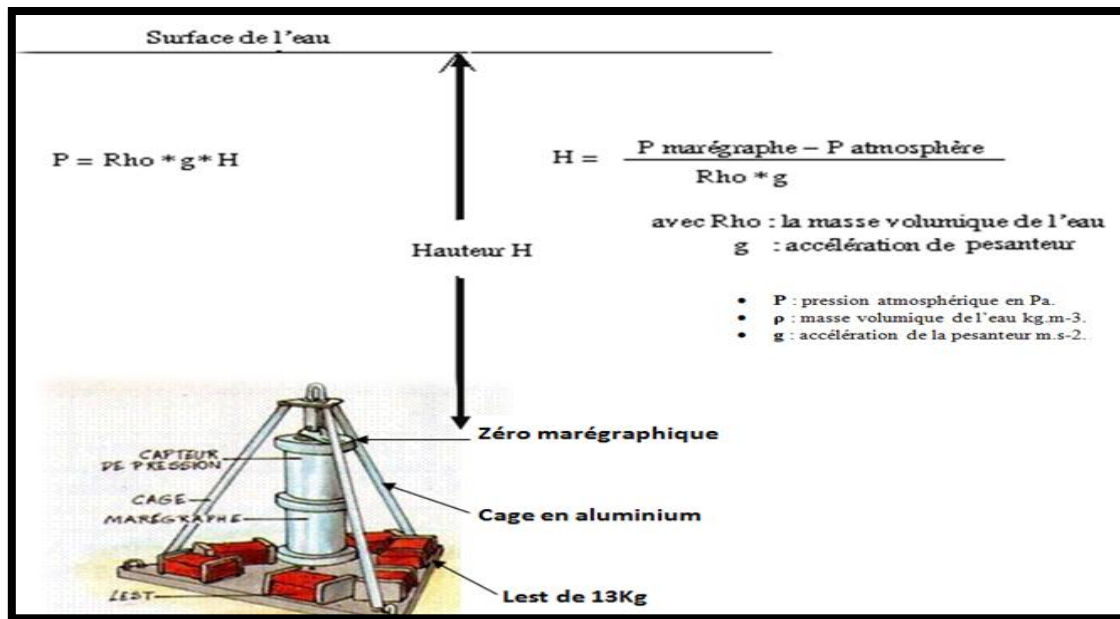


Figure 16: Marégraphe de pression

B.4 Les observations à l'aide de récepteurs GPS :

L'observation du niveau de la mer comme application possible du GPS est en cours d'étude au SHOM.

Deux récepteurs GPS sont nécessaires. Le premier est placé en un lieu connu et sert de point de référence, le deuxième est placé sur une bouée ou sur un navire. La marée est alors obtenue par traitement en mode cinématique des données GPS. La précision obtenue sur la composante d'altitude est normalement suffisante pour pouvoir reconstituer le signal de marée (Shom.fr).

6.2. Altimétrie satellitaire :

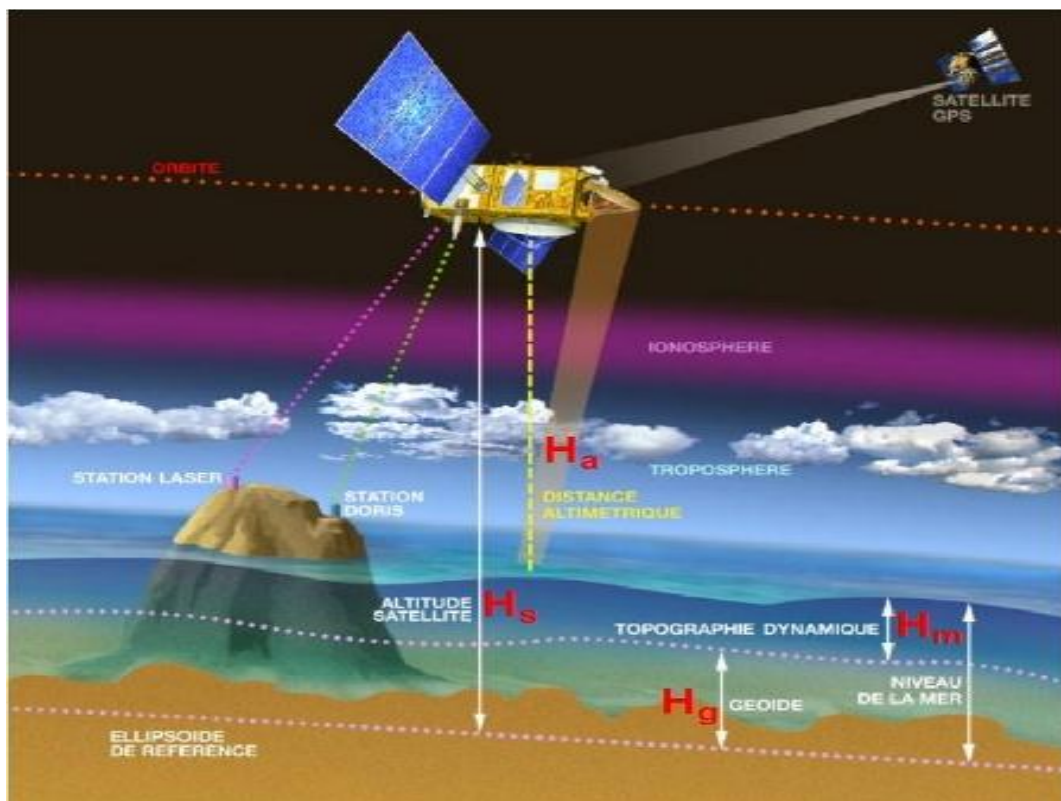
L'absence d'une référence verticale stable a interdit jusqu'à présent d'évaluer avec précision la composante eustatique dans les changements constatés du niveau relatif de la mer. La situation vient de changer avec le développement de l'altimétrie spatiale. Celle-ci est apparue dès la fin des années 70, marquées par les missions de GEOS-3, de Seasat et de Geosat.

L'intérêt de l'altimétrie spatiale est de permettre le calcul du niveau marin, non pas en points déterminés, mais en faisant une moyenne qui concerne toute la surface océanique de la

terre. Dans les études de l'altimétrie satellitaire, les valeurs obtenues sont perturbées par un grand nombre de phénomènes, et qui sont essentiellement liées à l'erreur d'orbite (surtout pour les erreurs à grande échelle), à la présence dans l'air de vapeur d'eau (correction troposphérique humide) et aux marées océaniques (surtout près des côtes) (Urgelli, 2003).

- **Principe de l'altimétrie radar par satellite :**

Un radar altimètre embarqué à bord d'un satellite émet un signal à très haute fréquence (plus de 1700 impulsions par seconde) à la verticale de celui-ci en direction du sol et reçoit en retour l'écho réfléchi par la surface de la mer. L'analyse de l'écho permet d'extraire une mesure très précise du temps de trajet aller-retour entre le satellite et la surface de la mer, mais aussi de la hauteur des vagues et de la vitesse du vent. Ce temps est ensuite transformé en distance par simple multiplication avec la vitesse de la lumière, vitesse à laquelle se propagent les ondes électromagnétiques émises. En moyennant sur une seconde les distances estimées, on obtient une mesure très précise de la distance satellite-océan (Holthuijsen, 2007).



Source : Cnes

Figure 17 : Principe de la mesure altimétrique

Chapitre II : Matériels et méthodes

Dans ce chapitre, nous allons détailler la méthodologie utilisée dans notre travail, laquelle se base essentiellement sur le traitement du signal temporel du niveau de la mer. Ce dernier est issu de l'un des marégraphes numériques du réseau de la COI (Commission *Océanographique* Intergouvernementale), localisé à Ibiza (Iles Baléares, Espagne).

Parmi les paramètres caractérisant un signal on peut citer :

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

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

- ✓ 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 2 signaux sinusoïdaux entre eux.

Dans notre travail, nous allons nous intéresser, entre autres, aux spectres que l'on peut observer avec un analyseur de spectre (**Leonhart, 2010**).

1. L'analyse spectrale :

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 (méthode spectrale) 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 l'une des méthodes qui décrivent la forme d'un signal temporel comme une superposition de composantes de formes simples. C'est une méthode utilisée 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'élévation de

niveau de la mer. Cette analyse permet d'identifier chaque composante, amplitude, période et phase et permet ainsi de séparer les différents types d'oscillations que comprend un signal brut du niveau de la mer (**Fleury, 2001**).

1.1 Analyse spectrale avec la transformée de Fourier rapide (FFT) :

La transformée de Fourier est un outil mathématique qui permet de décrire un signal par son spectre de fréquence. La transformée de Fourier est une méthode (la plus utilisée aujourd'hui) 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 le spectre d'un signal périodique (sinusoïdal ou cosinusoïdal).

Série de Fourier :

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin(2 \pi t / T) + A_2 \sin(4 \pi t / T) + \dots + A_n \sin(2n \pi t / T) \quad \dots (2-II)$$

Avec :

f : La fréquence.

T : La période.

t : Le temps d'échantillonnage.

A_0, \dots, A_n : Sont les coefficients de la série de Fourier à la fréquence $F_n = n/T$.

Concrètement, cela veut dire que l'on peut décomposer notre fonction comme une somme de sinus (ou cosinus) de périodes multiples de la période de base de notre fonction. Les coefficients représentent alors le niveau "énergétique de chacune des fréquences élémentaires".

L'analyse d'un signal périodique conduit à un spectre : C'était l'objet de la décomposition en série de Fourier (**Moreau, 2011**).

1.2 Les paramètres de la FFT :

→ **Fréquence d'échantillonnage** : f_e .

Exprimée en Hertz [Hz]. Celle-ci est la cadence à laquelle le signal est regardé par l'analyseur.

→ **Règle d'échantillonnage de Shannon** :

Seuls les signaux dont le contenu fréquentiel est strictement inférieur à la fréquence d'échantillonnage peuvent être analysés correctement.

Le choix de la fréquence d'échantillonnage pour un signal donné est une étape très importante dans notre étude. En effet, l'opération d'échantillonnage ne doit pas amener une perte d'informations. Autrement dit l'opération d'échantillonnage doit être réversible et on doit pouvoir repasser du signal échantillonné au signal initial. On voit facilement que ceci n'est possible que si la fréquence f_e est suffisamment élevée, d'où le résultat fondamental :

En vue d'éviter la perte d'information, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit au moins égale au double de la fréquence maximale f_{max} contenu dans le signal.

$$f_s \geq 2f_{max} \dots\dots\dots (3-II)$$

→ **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 (exprimée en Hz).

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 transformée 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 rapide peut être 100 fois plus petit que le calcul utilisant la formule de définition de la TFD (Transformée de Fourier Discrète).

L'application principale de l'analyse FFT est donc la mise en évidence des périodicités du signal et le calcul de "l'énergie" contenue dans le signal pour chacune des fréquences (**Dumas et Bennevault, 2001**).

2. Estimation de l'énergie spectrale par la méthode de PWELCH utilisé dans le programme Matlab :

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 de puissance (PSD) montre la force des variations (énergie) en fonction de la fréquence. En d'autres termes, elle montre à quelles fréquences les variations sont fortes et où les variations sont faibles. Pour notre cas, nous utilisons la méthode de pwelch pour calculer la densité spectrale de puissance du signal d'entrée.

2.2 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 $[0, n-1]$ (**Hall, 1975**). Et afin d'améliorer les performances du périodogramme, **Welch (1967)** a proposé la variante que nous détaillerons ci-après.

2.3 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**).

Noverlap :

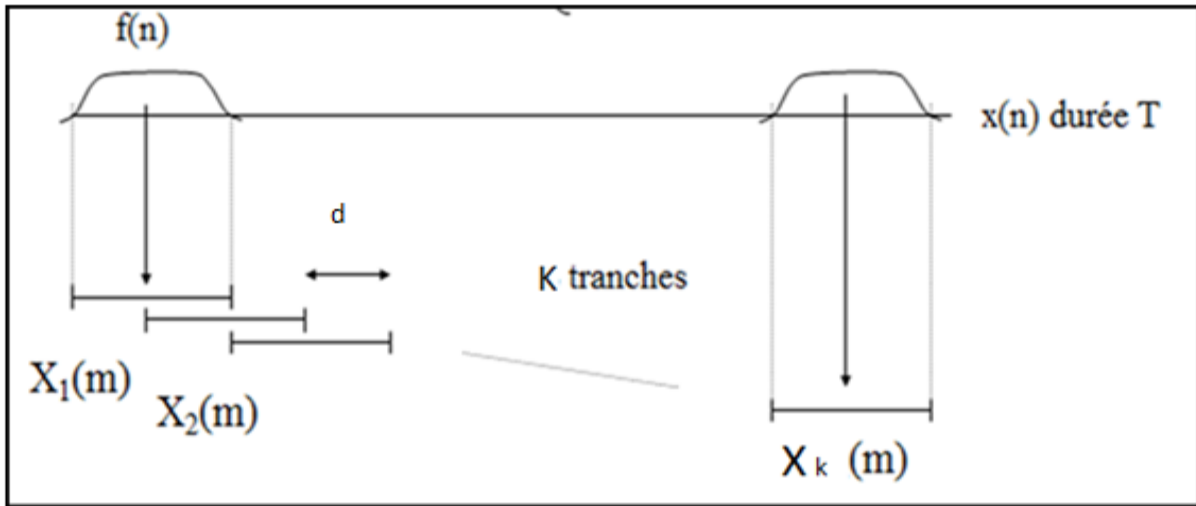
Indique le nombre d'éléments de données qui se chevauchent entre les segments adjacents de données. La valeur par défaut est la longueur qui se traduit par un chevauchement de la moitié des éléments de données entre les segments adjacents (

Le périodogramme de Welch nécessite:

- Une longueur de fenêtre qui ne dépasse pas la longueur de la FFT
- NOVERLAP doit être strictement inférieure à la longueur de la fenêtre.
- Les valeurs doivent être entières positives pour n_{FFT} et NOVERLAP.

→ La fenêtre Hamming :

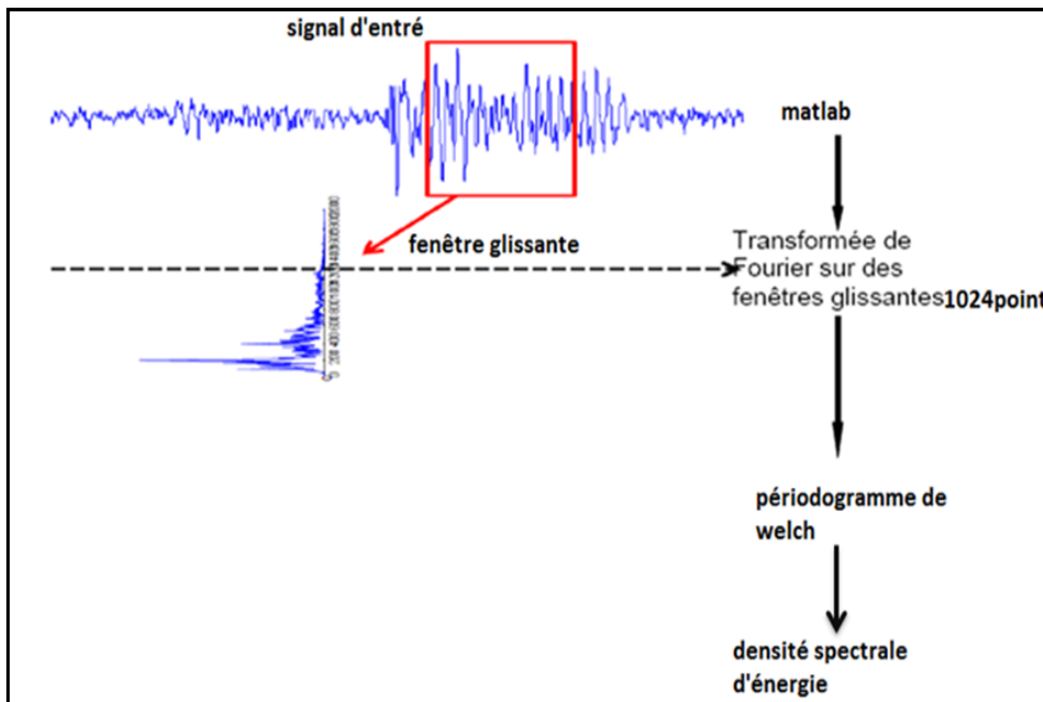
La fenêtre de *Hamming* est une fenêtre moyenne entre un pic principal étroit et un amortissement modéré des pics secondaires. On distingue dans cette fenêtre le pic principal et les pics secondaires. On peut atténuer l'amplitude de ces dernières en utilisant une fenêtre de pondération telle que la fenêtre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



Source : Ravier ,2000-2001

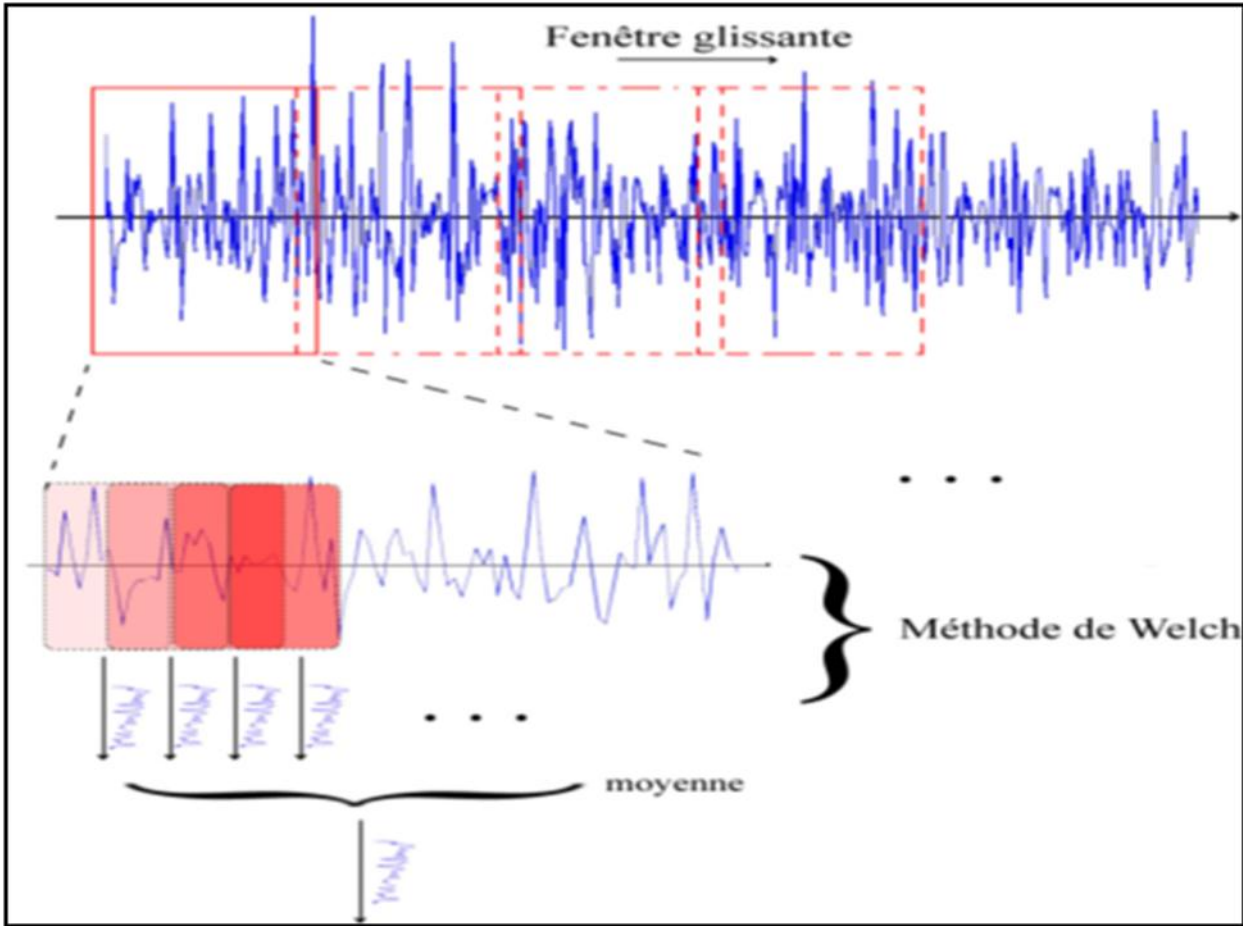
Figure 18: L'estimation de la densité spectrale de puissance

Avec : Noverlap = 50 %, moyennage sur K tranches, fenêtre de pondération $f(n)$, tranches de n échantillons, décalages de d échantillons.



Source : Kraus *et al*

Figure 19: Représentation du traitement effectué pour l'obtention d'un périodogramme



Source : Kraus et al

Figure 20 : Traitement du signal en utilisant la méthode de Pwelch

3. Le logiciel Matlab :

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

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, 1998**). 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*),
- La logique floue (*fuzzy logic toolbox*),
- Le calcul symbolique (*symbolic math toolbox*),
- ...etc.

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. Ces dernières, 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 types de fenêtre les plus importants sont :

➤ **Command Window**, où toutes les commandes sont entrées :

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 exécuté.

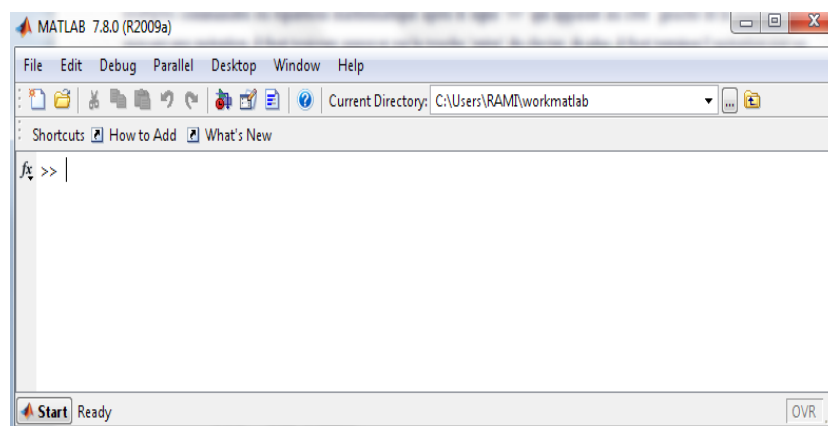


Figure 21 : Présentation de fenêtre de commande (commandes Window)

➤ **Edit Window :**

Au lieu de taper les commandes individuellement et directement dans la fenêtre de commande, il est possible de créer un fichier appelé '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

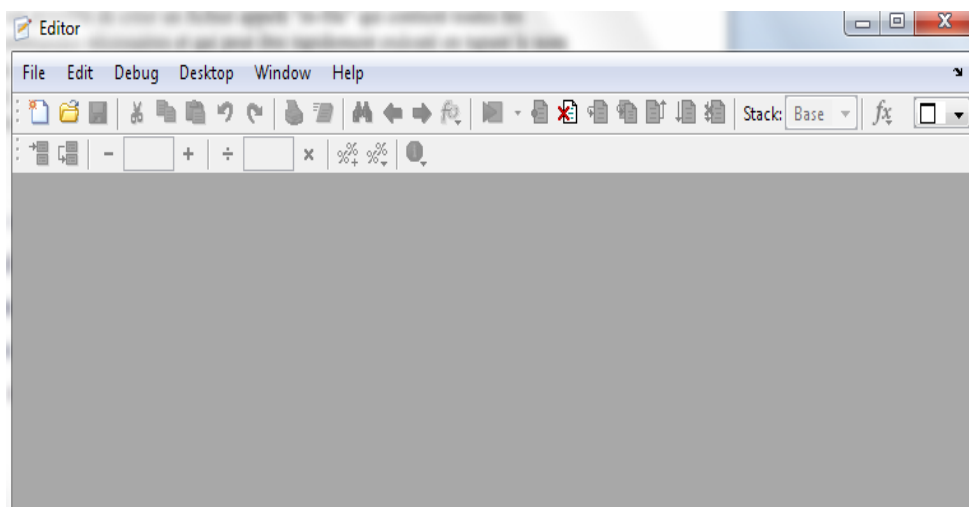


Figure 22 : Présentation de fenêtre d'Editor (*Edit Window*)

La fenêtre Edit Window peut être vue comme un éditeur de texte.

➤ **Fenêtre 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 :

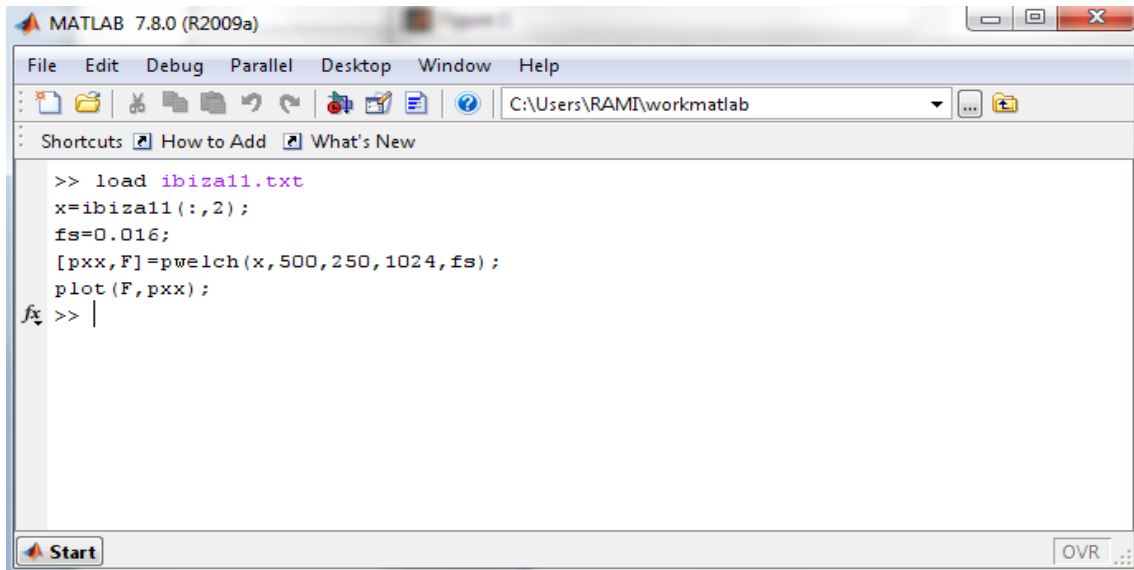


Figure 23 : Présentation de fenêtre d'Editor avec la commande Plot

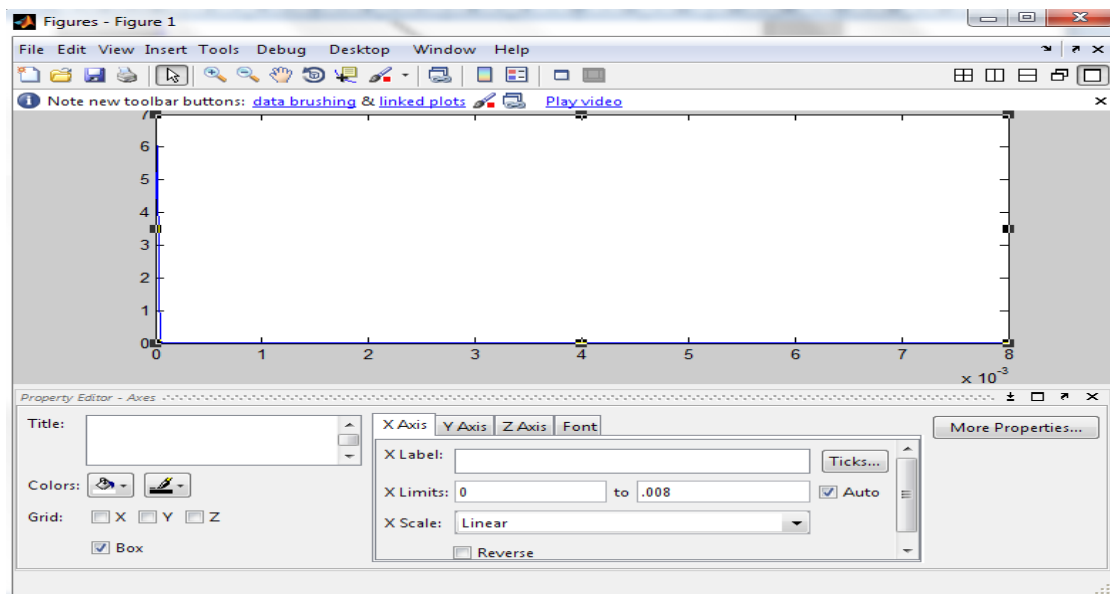


Figure 24 : Présentation d'un plot (Figure Window)

3.3. Méthodologie utilisée dans notre étude :

3.3.1 Analyse d'un exemple d'un signal du niveau de la mer :

→ Choix de la station et de la période de mesure :

Parce que l'objectif de notre travail est d'essayer de comprendre ce qui s'est réellement produit au port d'El Djamila, lors de la nuit du 09 novembre 2010 où le niveau de la mer avait, d'après des témoignages oculaires, connu une hausse d'environ 2 m.



Source : Envoyés spéciaux Algériens

Figure 25 : Photo du port d'EL Djamila le 09 Novembre 2010 lors de l'élévation soudaine du niveau de la mer



Source : Envoyés spéciaux Algériens

Figure26 : Photo des petites embarcations renversées au niveau du port d'El Djamila après l'élévation du niveau de la mer

Cependant, en l'absence d'un marégraphe numérique sur la côte algérienne, nous avons ausculté les signaux du niveau de la mer mesurés par un des marégraphe numériques du réseau de la COI (Commission *Océanographique* Intergouvernementale), localisé à Ibiza (Iles Baléares, Espagne).

→ **Source des données *Sea Level Facility* de la COI :**

C'est un service qui a été développé à partir d'une collaboration entre l'institut marin de la Flanders (VLIZ), les Etats Unis d'Amérique et le projet d'ODINAFRICA d'IODE. Au début, le service a été conçu pour la surveillance opérationnelle des stations de mesure de niveau de la mer en Afrique. Par la suite, il s'est transformé en une station globale, surveillant le niveau de la mer global.



Figure 27 : Présentation du site utilisé

→ La station Ibiza 2 de l'Espagne :

Latitude: 38°58'48"N

Longitude : 1°25'48"E

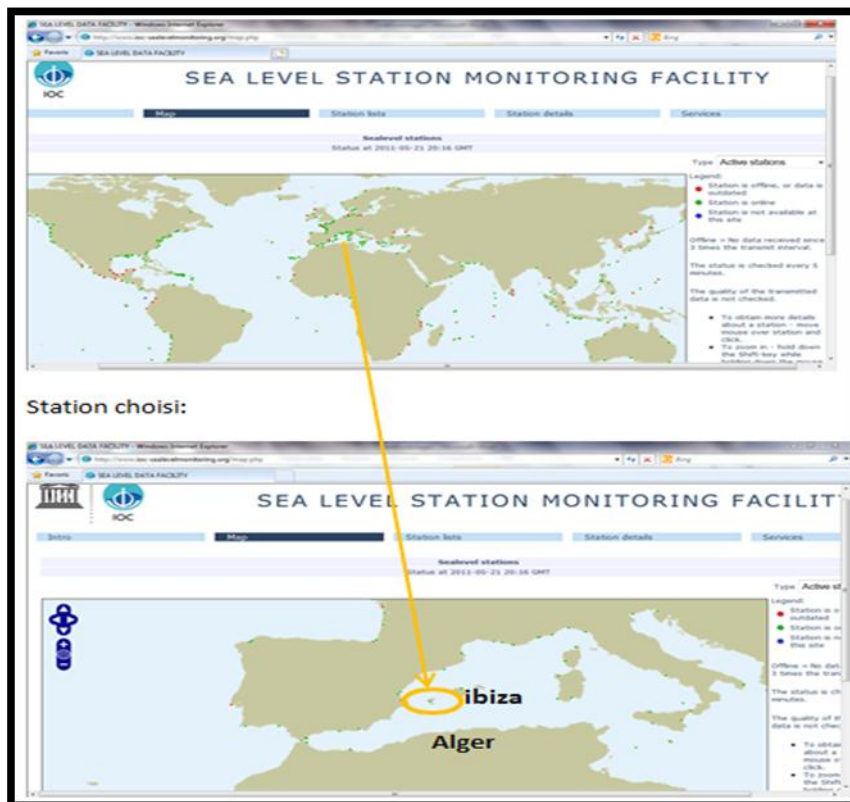


Figure 28 : Présentation de la station d'Ibiza 2

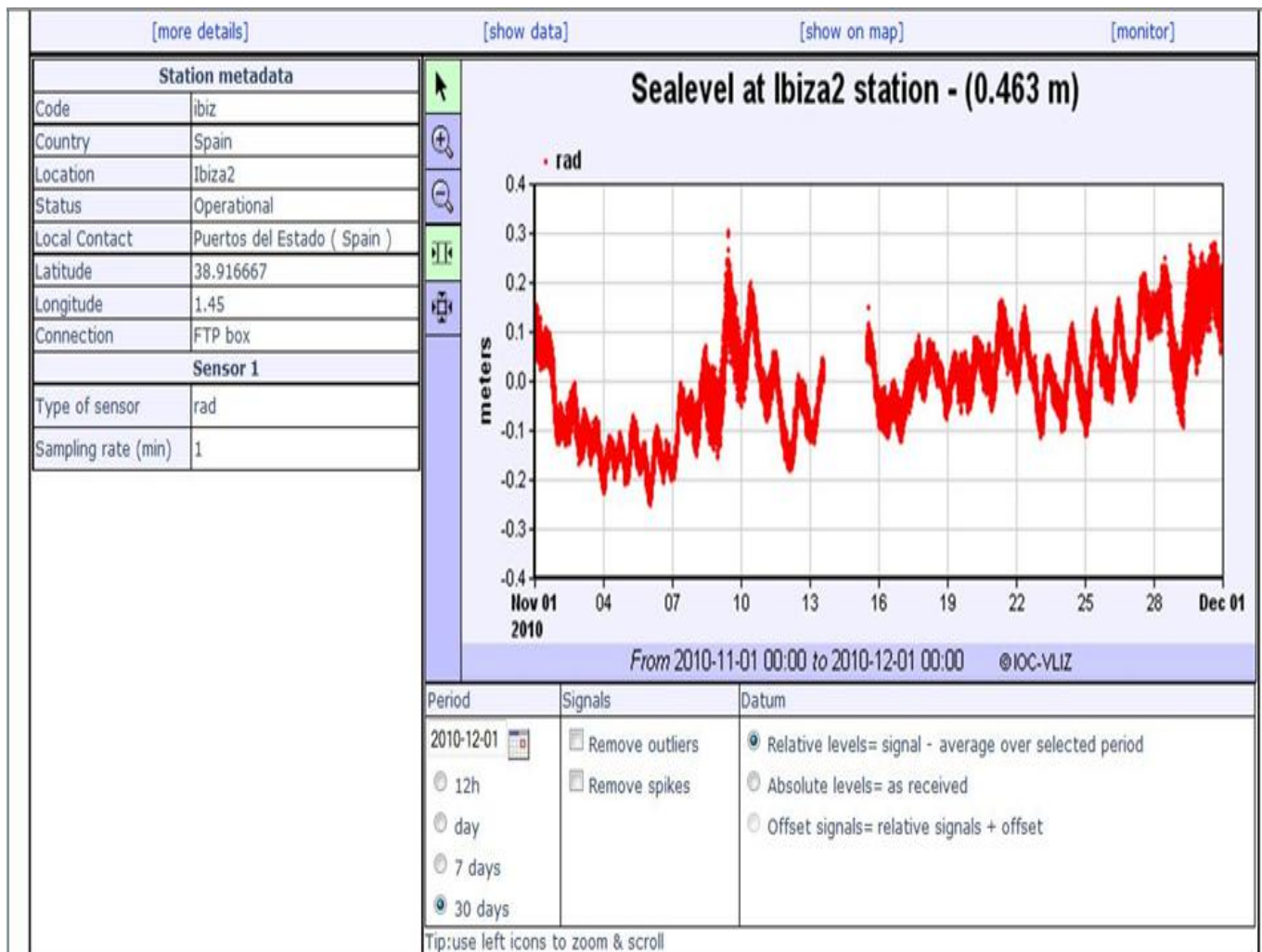


Figure 29: Présentation de signal global au niveau du site (Ibiza.Espagne)

Nous avons retenu les données de mesures du niveau de la mer d'une durée d'un mois comprenant le moment de l'événement de la hausse soudaine du niveau de la mer, qui a été observé lors de la nuit du 09 novembre 2010 où le niveau de la mer avait, d'après des témoignages oculaires, connu une hausse d'environ 2 m au port d'El Djamila. Ces données numériques sont indiquées sur le tableau ci-dessous.

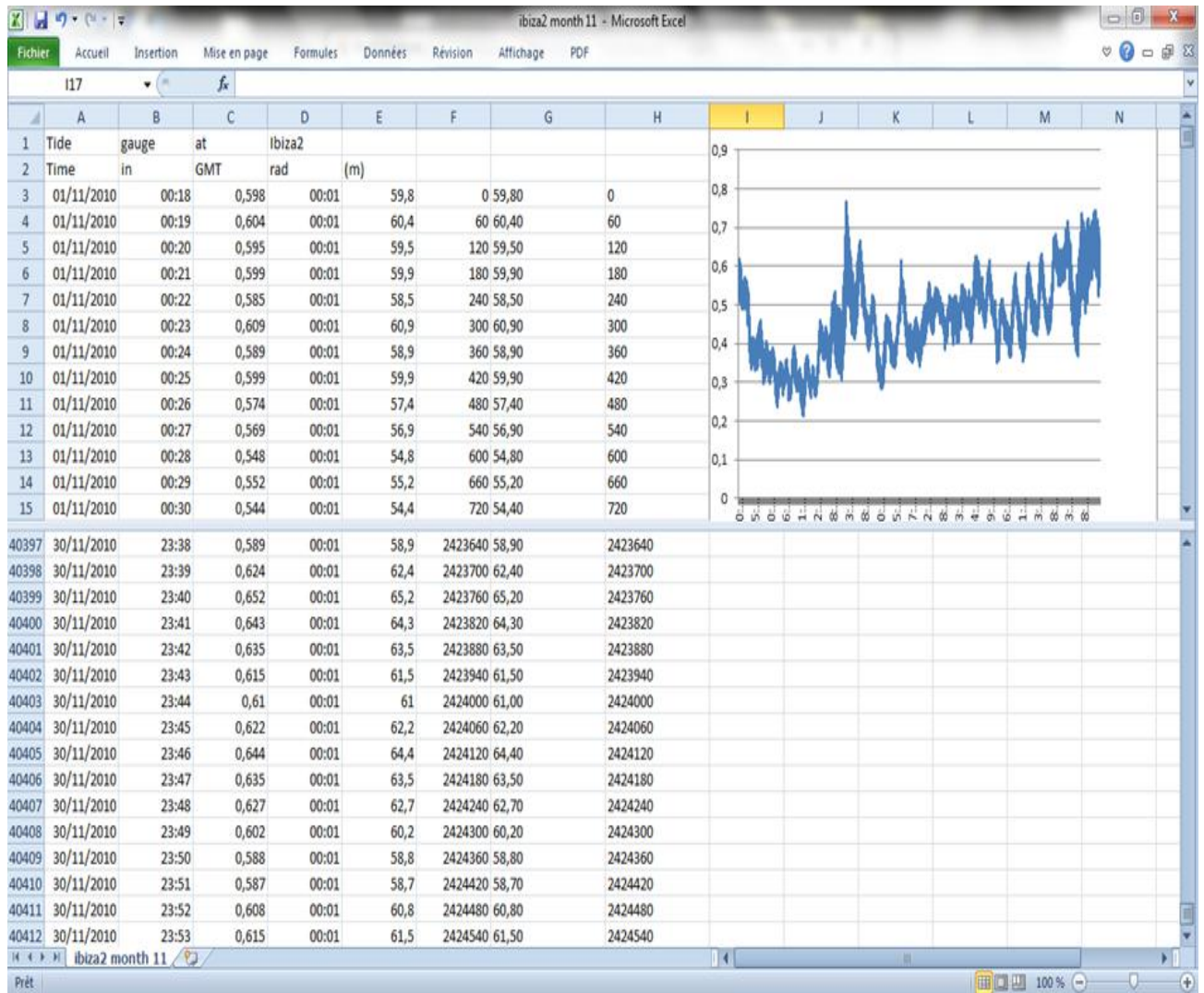


Figure 30 : Présentation des données numériques (niveau de la mer) sous forme d'un fichier Excel

3.3.2 La procédure utilisée dans Matlab :

Nous avons utilisé le programme Matlab (version R2009a) qui est très adapté pour le traitement des données numériques du signal.

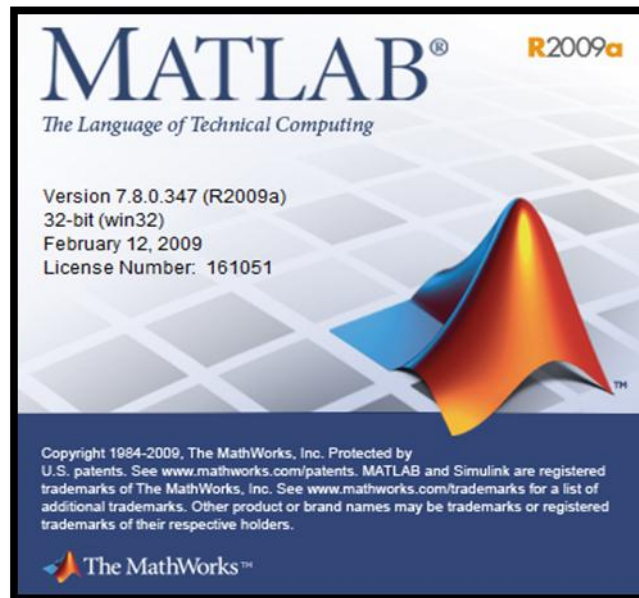


Figure 31 : Présentation de la version R2009a du logiciel MATLAB

En premier lieu, nous avons ouvert un répertoire spécialement pour Matlab dans lequel nous avons inséré les fichiers nommé Work Matlab. Par la suite, à l'ouverture Matlab, il faut toujours s'assurer qu'on travaille toujours dans le bon répertoire, là où notre fichier est sauvegardé, sinon on obtiendra des erreurs : dans notre exemple le fichier à exécuter est mis dans le répertoire 'C:/utilisateur/RAMI/Workmatlab' :

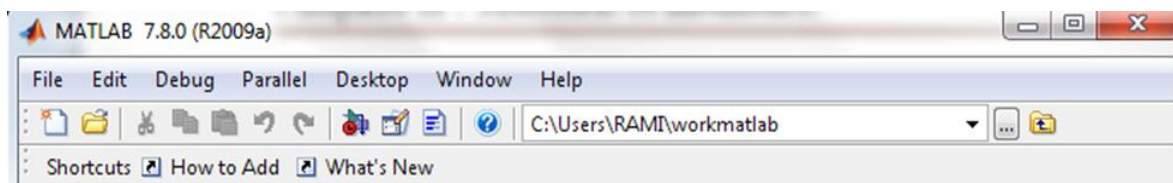


Figure 32 : Présentation de l'emplacement des fichiers de MATLAB

→ La programmation du code :

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

load ibiza11 .txt
Appel Fichier La forme
du utilisé du
Fichier fichier

Nous définissons **x** avec :

x = ibiza11 (:,2) ;

X représente dans le fichier l'élévation du niveau de la mer

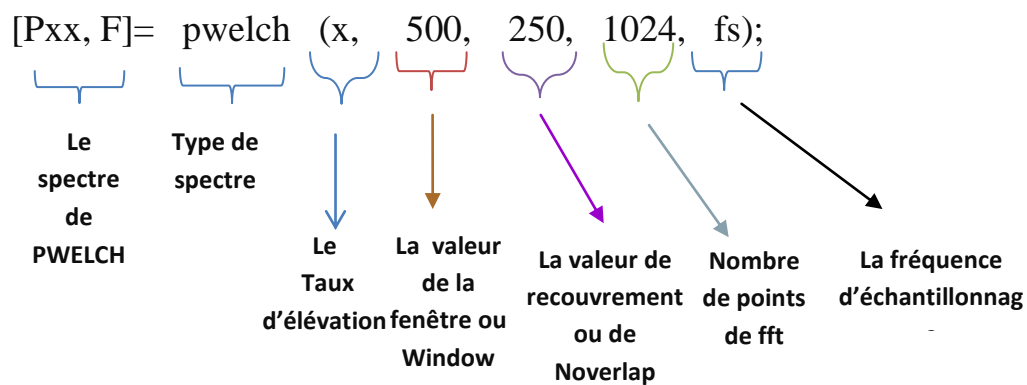
Le nom du fichier utilisé pour définir X

La colonne que prend X dans le fichier et qui est la 2ème colonne

On utilise le point-virgule pour terminer l'instruction

Ensuite, nous définissons la méthode utilisée qui est PWelch pour obtenir la densité spectrale d'énergie avec :

$[P_{xx}, f] = \text{pwelch}(x, \text{window}, \text{noverlap}, \text{nfft}, \text{fs})$.

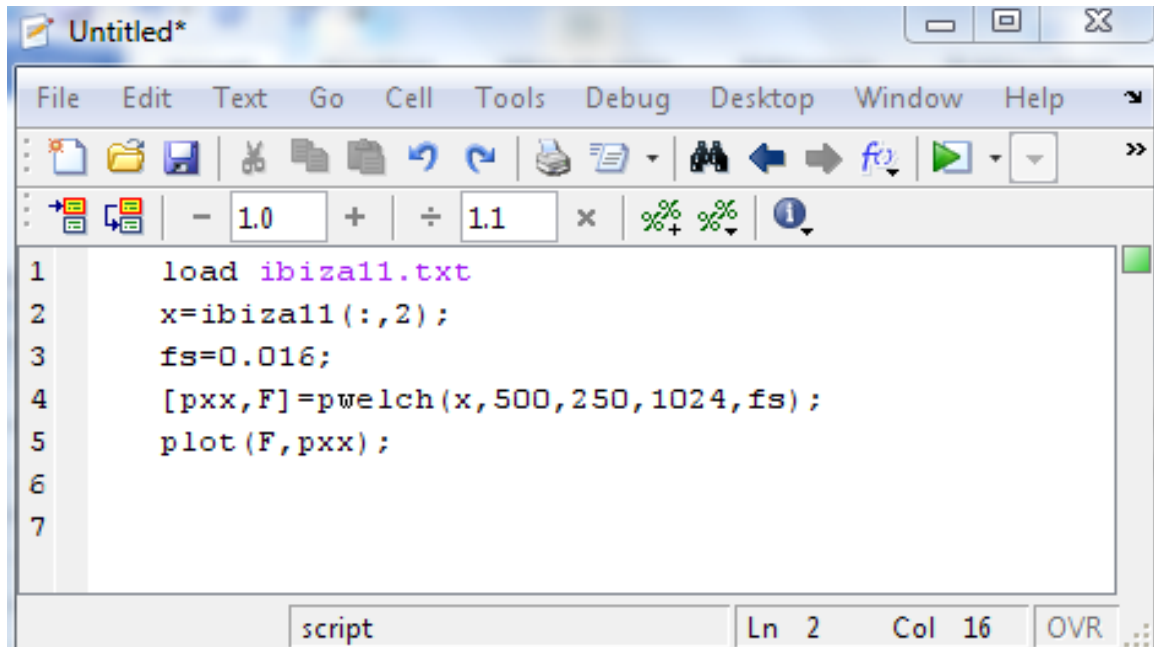


Pour dessiner :

Plot (F, Pxx)

Dessiner Le spectre (la densité de l'énergie spectrale en fonction des fréquences)

Nous ouvrons ensuite l'espace Editor dans lequel nous avons écrit notre code.



```
1 load ibiza11.txt
2 x=ibiza11(:,2);
3 fs=0.016;
4 [pxx,F]=pwelch(x,500,250,1024,fs);
5 plot(F,pxx);
6
7
```

script Ln 2 Col 16 OVR

Figure 33 : Présentation du code dans la fenêtre d'Editor

Ensuite, nous collons une copie du code dans la fenêtre de la commande *Window* :

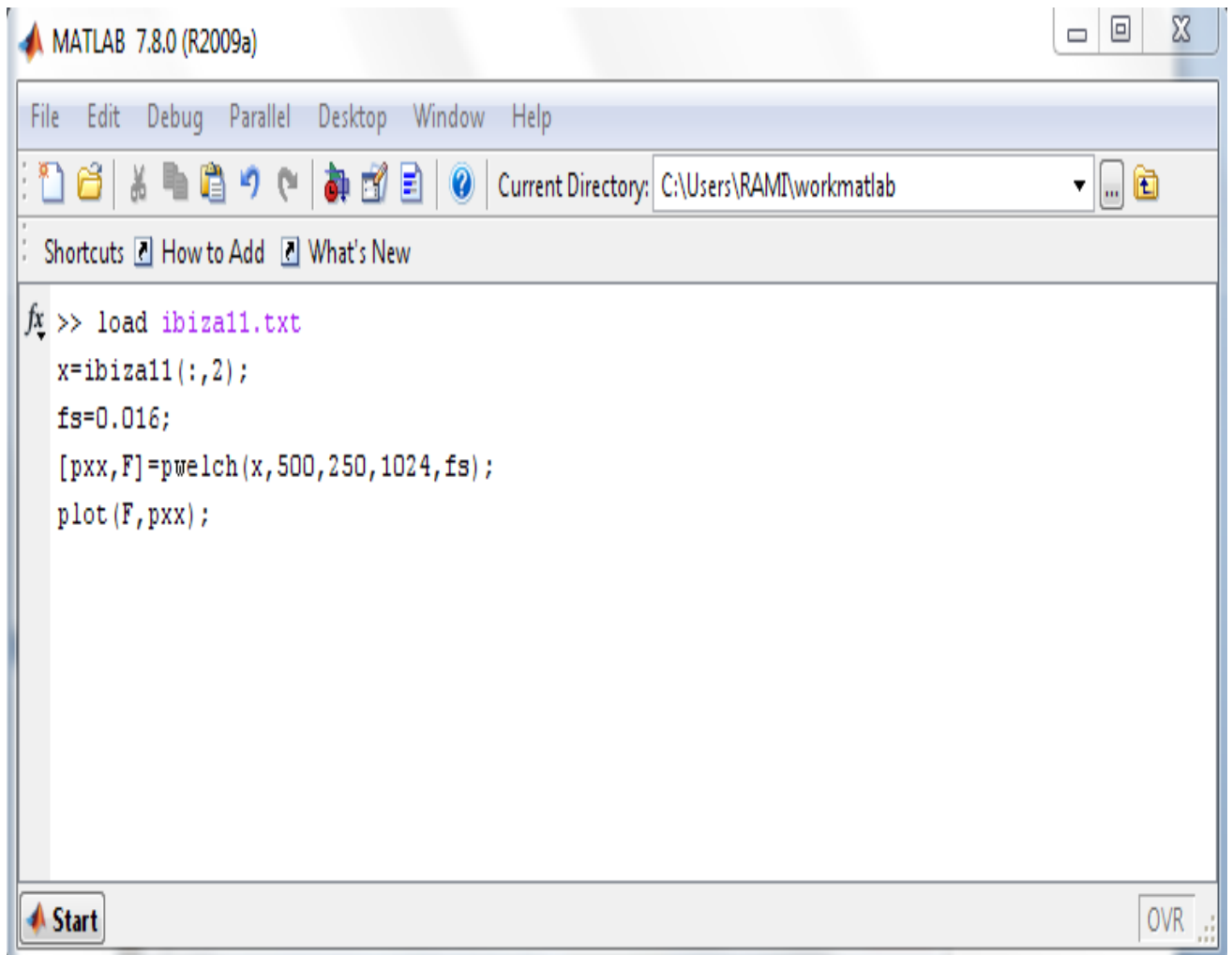


Figure 34 : Présentation du code dans la fenêtre de commande

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

4. Filtrage du signal avec OriginPro 8 :

Origin est un ensemble puissant et complet pour l'analyse des données scientifiques. Il est un excellent moyen universel de traitement des fonctions mathématiques et statistiques. Origin8pro offre tous les outils d'analyse étendue des statistiques, montage 3D, traitement d'image et de traitement du signal.

4.1 Filtrage :

Parce que chaque type d'onde marine a sa propre gamme fréquentielle, nous avons appliqué un filtre mathématique qui est un outil qui permet de séparer des différentes harmoniques que peut contenir un signal brut. Et en vue de séparer les différentes ondes marines contenues dans le signal brut du niveau de la mer, nous avons appliqué ce que l'on appelle le "filtrage dans le domaine de Fourier". Ce dernier, est une opération qui, à un spectre d'entrée, associe un spectre de sortie.

4.2 Les différents filtres existent dans OriginPro 8:

Le filtrage est un processus sélectif qui consiste à enlever ou à permettre le passage de certaines fréquences d'un signal. Il y a quelques types de base de filtres:

- Les filtres passe-bas : Bloquent les hautes fréquences d'un signal, permettant seulement aux signaux de basse fréquence de passer.
- Les filtres passe-haut : Bloquent les signaux de basse fréquence d'un signal.
- Les filtres passe-bandes : Permettent seulement le passage des fréquences faisant partie d'une marge spécifique (bande passante).

Pour effectuer le filtrage de FFT:

En premier lieu, nous avons copié les données numériques sur OriginPro8 où le temps est en secondes sur l'axe des X et les hauteurs de niveau de la mer sur l'axe des Y sont représenté en cm. Ensuite, il suffit de cliquer sur columns pour choisir les axes des x et des y en haut de la page.

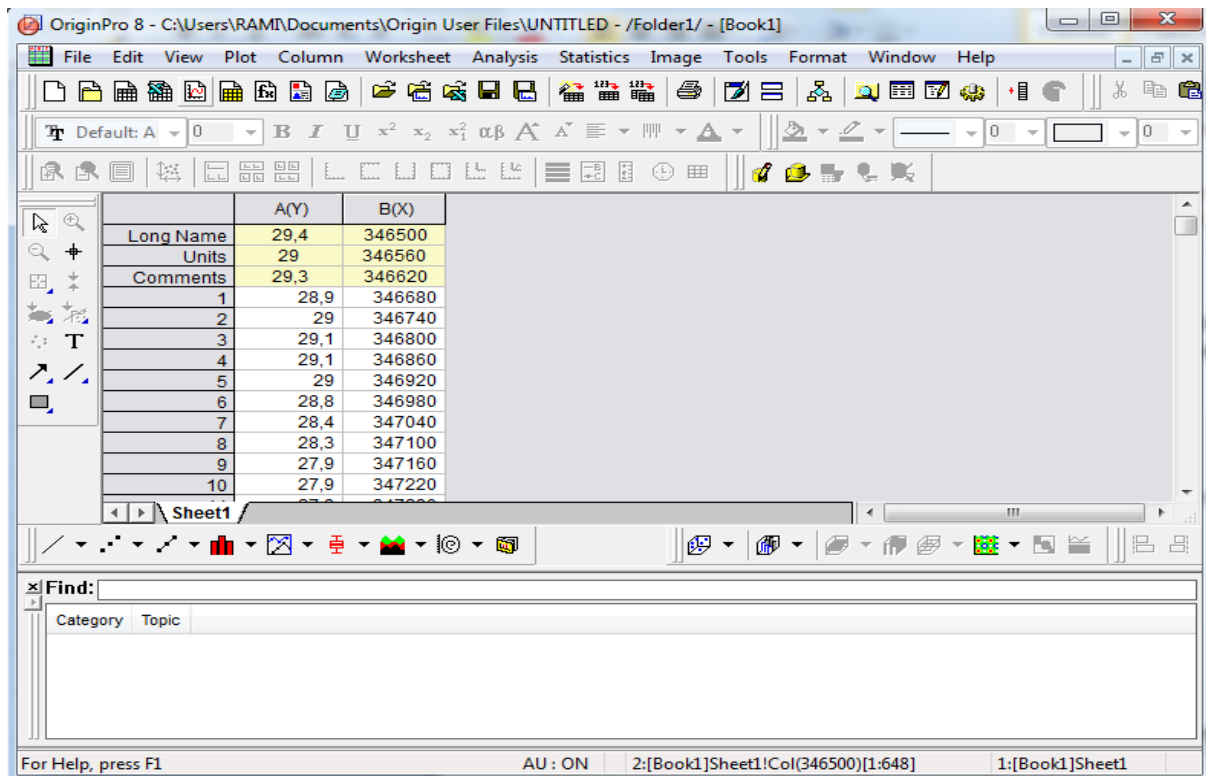


Figure 35 : Présentation des données numériques dans le logiciel OriginPro 8

Pour dessiner le signal nous sélectionnons les deux axes et nous cliquons sur la barre de dessin situé en bas.

Chapitre II : Matériels et méthodes

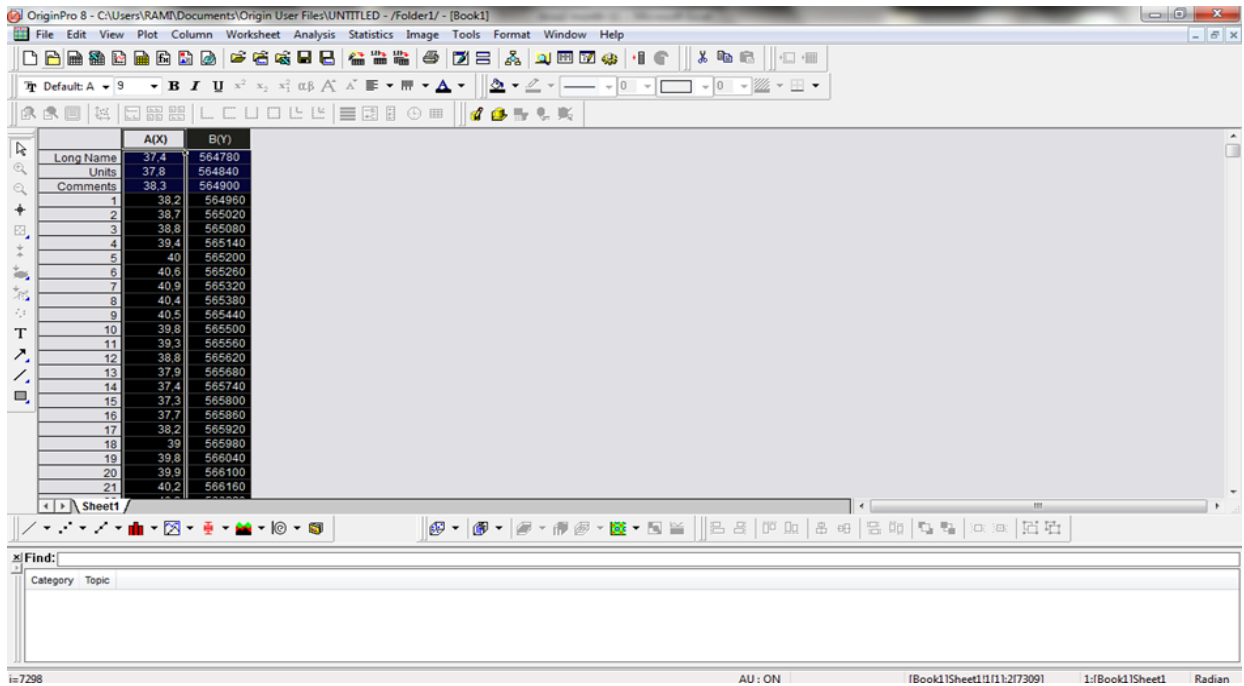


Figure 36 : Importation des données vers OriginPro 8

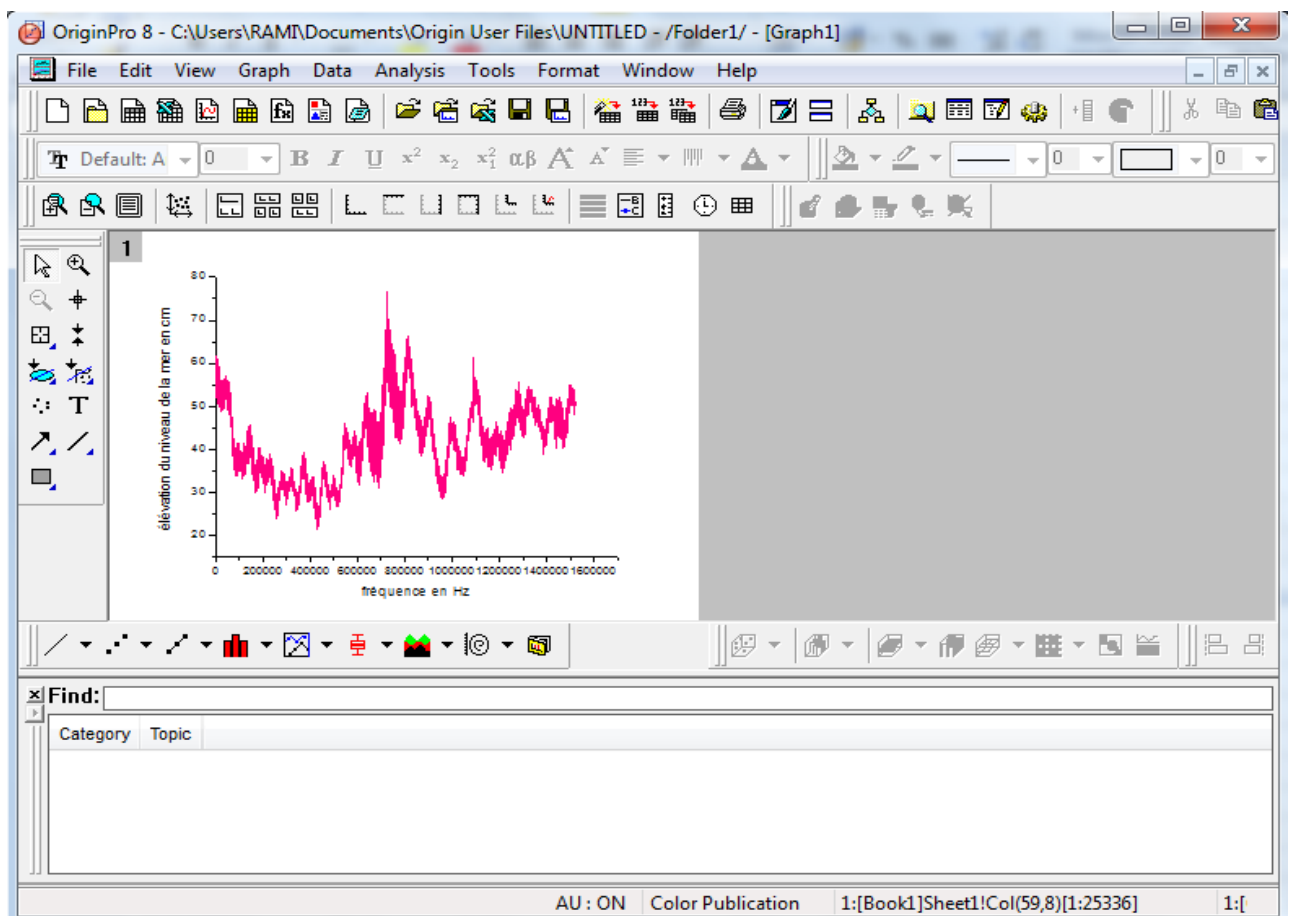


Figure 37: Présentation du signal au niveau d'OriginPro 8

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). Pour cela, nous sélectionnons le signal et cliquons sur « *Analysis* ». Puis, dans FFT filtre, nous ouvrons la boîte de dialogue qui permet de choisir le type de filtre (band pass) ainsi que la période du phénomène étudié. A ce propos, la période de la marée étant comprise entre environ 4 h jusqu'à 24 h, avec respectivement, les fréquences de 0.000069 Hz 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 celle qui va de 2 min à 3 h, avec respectivement, les fréquences de 0,008 Hz et 0,00009 Hz.

Chapitre III : Résultats et discussions

En vue d'avoir un aperçu sur le type d'ondes marines qui seraient derrière la hausse soudaine du niveau de la mer observées au niveau du Port d'El Djamila le 09 novembre 2010, nous avons, comme cité dans le chapitre précédent, consulté un des marégraphes numériques du réseau de la COI (Commission Océanographique Intergouvernementale), localisé à Ibiza (Iles Baléares, Espagne). Nous présentons dans cette partie les résultats des différents traitements (analyse spectrale et filtrage) effectués sur le signal du niveau de la mer observé comprenant la période 09 novembre 2010.

1. Niveau de la mer brut à Ibiza entre le 06/11/2010 et 30/11/2010 :

La figure n° 38 montre le signal global du niveau de la mer observé à Ibiza entre le 06/11/2010 et 30/11/2010. L'observation du niveau de la mer brut montre que le niveau de la mer contient des oscillations de haute fréquence dont l'origine est extratidale. Cependant, pendant la nuit du 09 novembre 2010 (date de la hausse soudaine du niveau de la mer observée au niveau du port d'El Djamila), le niveau de la mer avait significativement augmenté à Ibiza. Et l'analyse spectrale et les différents filtres appliqués au signal brut nous aiderons à déterminer exactement le type de ces ondes marines extratidales.

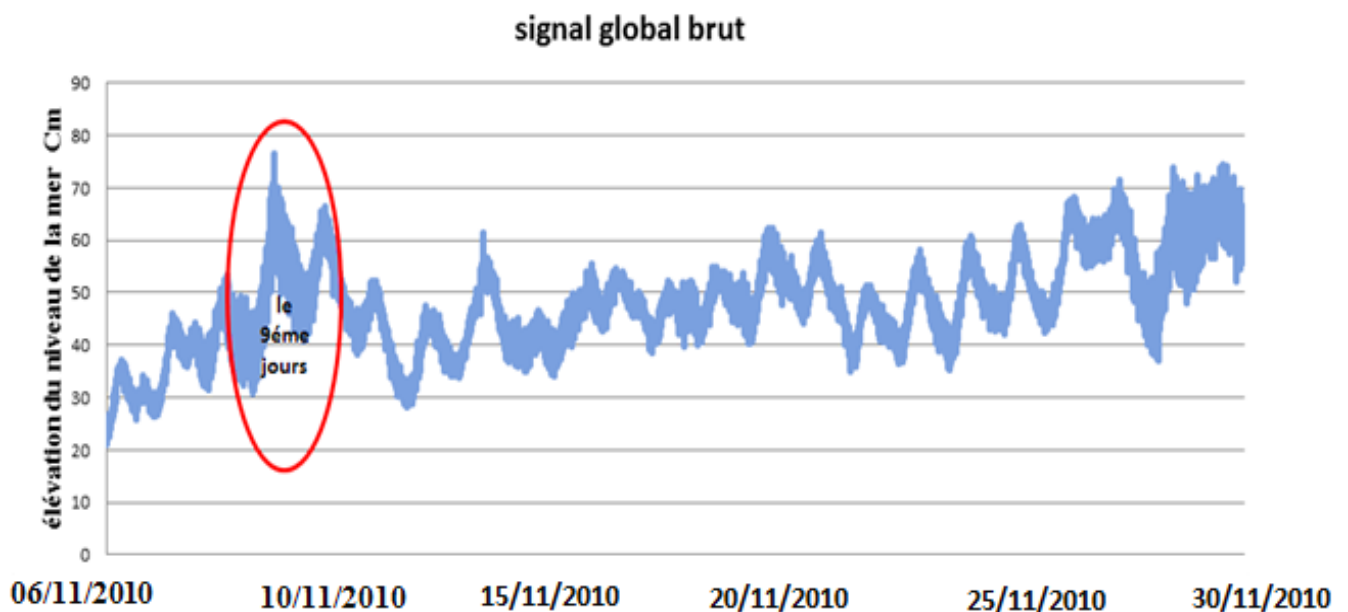


Figure 38 : Signal brut temporel du marégraphe prélevé entre le 6/11/2010 et 30/11/2010 de la station Ibiza2

1.1 Densité Spectrale d'Énergie appliquée au signal temporel (entre 06/11/2010 et 30/11/2010) :

La figure n° 39 montre les résultats de la densité spectrale d'énergie des fréquences observée sur le signal global. Ces résultats font état d'un pic spectral dans la gamme fréquentielle qui environne 0.000015 Hz. Cette dernière est imputable à l'action tidale (marée) qui, dans notre cas, est considérée comme oscillations « *normales* ».

Et afin d'avoir les détails de la densité spectrale d'énergie relatifs aux ondes extratidales, nous examinerons le zoom que nous avons effectué sur un segment du signal concernant les ondes non tidales (liées aux perturbations atmosphériques), entre 1 min et 3 h (Figure n° 40). La figure n°40 montre les densités spectrales d'énergie des fréquences obtenues dans la gamme fréquentielle des Météotsunami.

L'observation de ces dernières montre en effet des densités d'énergie dans des pics fréquentiels qui sont propres aux météotsunamis. Ceux-ci, apparaissent exactement dans les fréquences suivantes 0,000093 Hz (197, 21 min), 0,00017 Hz (98.04 min), 0,0002 Hz (83.33 min), 0,00025 Hz (66.67 min), 0,00036 Hz (46.30 min), 0,0009 Hz (18.52 min), 0,002 Hz (8.33 min). Toutes ces fréquences sont propres aux tsunamis et aux météotsunamis. Et étant donné que pendant ce moment aucun séisme n'avait été enregistré dans la région, ces ondes ont été donc engendrées par des phénomènes purement atmosphériques.

Par conséquent, la hausse soudaine du niveau de la mer observée au port d'El Djamila, lors du 09 Novembre 2010, serait également induite par un météotsunami qui aurait été amplifié à l'intérieur du port, vraisemblablement en raison d'une architecture portuaire favorable à l'amplification des météotsunamis et des seiches.

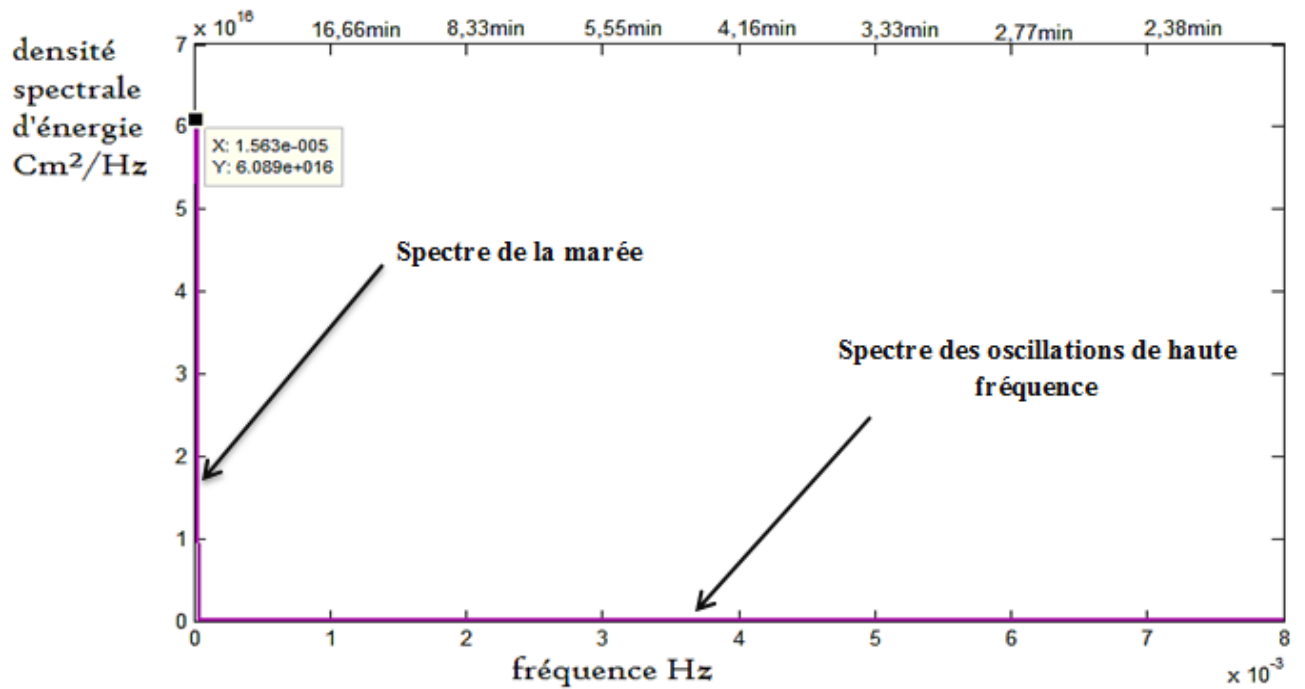


Figure 39: La densité spectrale d'énergie des fréquences du spectre global

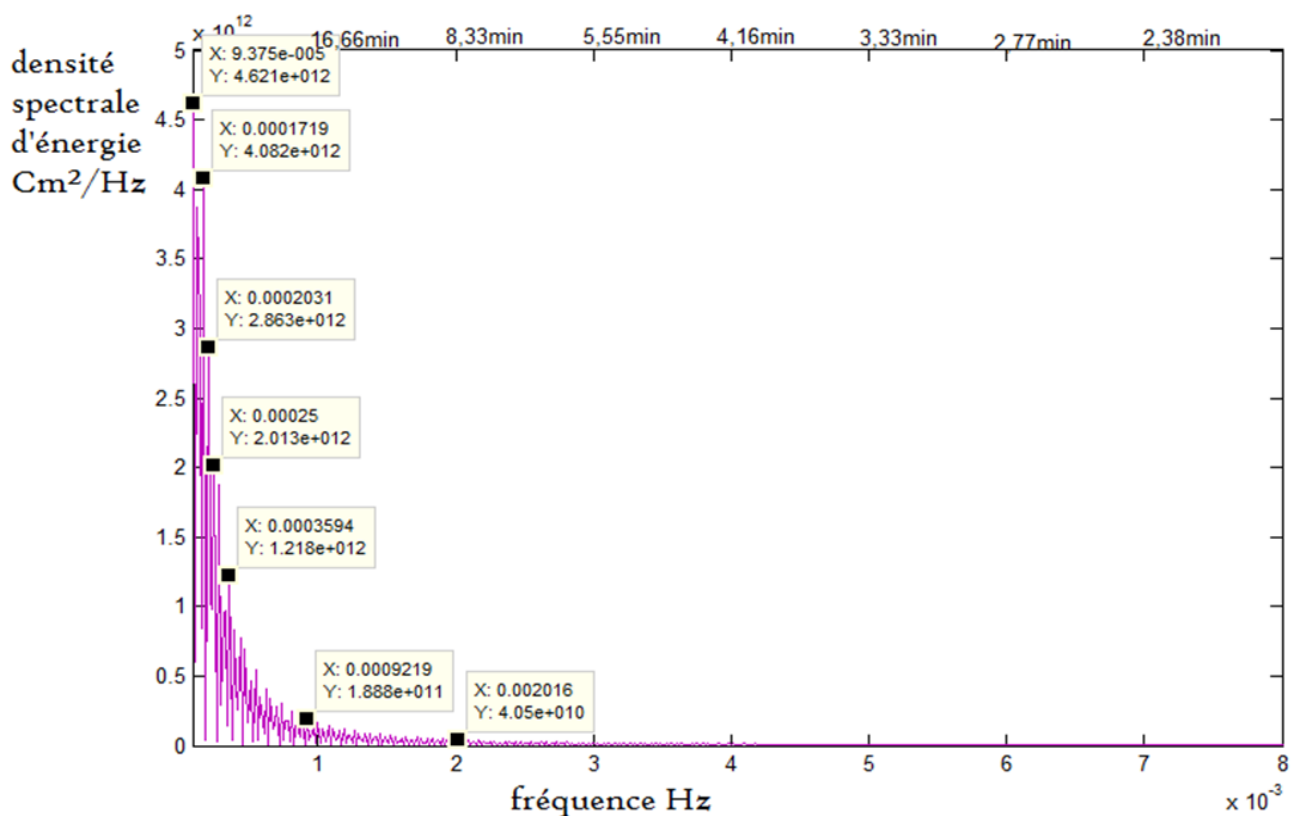


Figure 40 : Détails de la densité spectrale d'énergie du spectre des oscillations de haute fréquence relative au météotsunami (périodes entre 1min et 3h)

1.2 Résultats de l'application des filtres band-pass sur le signal brut temporel du marégraphe (entre le 06/11/2010 et 27/11/2010) :

Les filtres opérés sur le signal brut du niveau de la mer ont été effectués en utilisant OriginLab. Cependant, parce que ce dernier est limité en input data (données d'entrée), nous avons découpé notre signal en deux périodes (du 06/11/2010 jusqu'au 15/11/2010 et du 14/11/2010 jusqu'au 27/11/2010) (Figure n° 41).

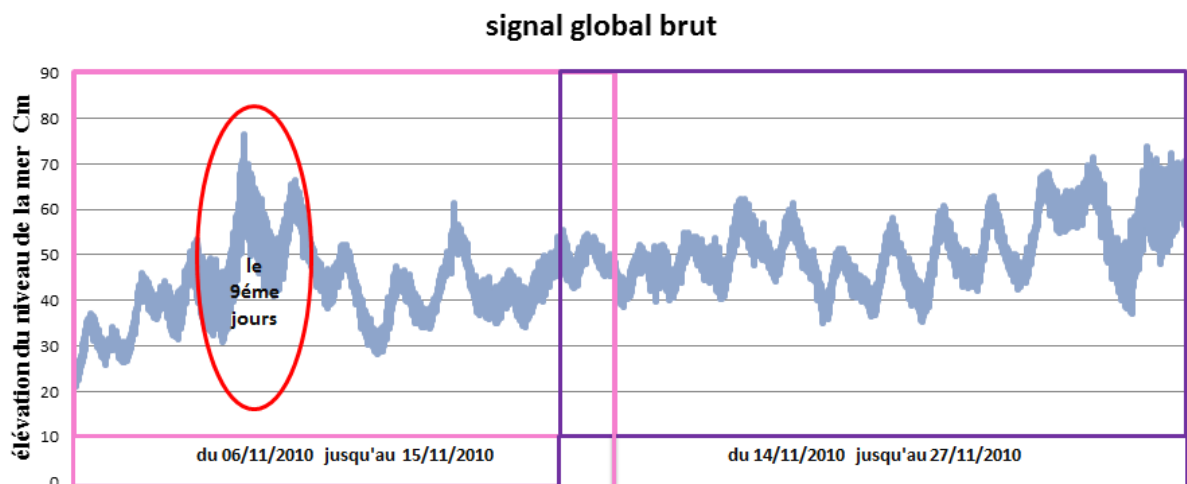


Figure 41 : Signal brut temporel du marégraphe prélevé entre le 6/11/2010 et 27/11/2010 de la station Ibiza2 découpé en deux parties

1.2.1 Application du filtre pour la période entre le 06/11/2010 et 15/11/2010 :

La figure n° 42 illustre les résultats du signal du niveau de la mer (station Ibiza) filtré par *band-pass* (bande passante) entre 6h et 24h et ce, pour la période du 06/11/2010 au 15/11/2010. Nos résultats font aussi état d'une marée mixte diurne et semi-diurne. Durant la semaine englobant la journée du 09 Novembre 2010, date de la hausse soudaine du niveau de la mer observée dans le port d'El Djamilia, nous observons à Ibiza des ondes ayant des hauteurs atteignant environ 20 cm, appartenant à la gamme fréquentielle des météotsunamis. Ces ondes sont relatives aux densités spectrales des énergies illustrées sur la figure n° 40 qui ont été observées dans les fréquences suivantes 0,000093 Hz (197, 21 min), 0,00017 Hz

(98.04 min), 0,0002 Hz (83.33 min), 0,00025 Hz (66.67 min), 0,00036 Hz (46.30 min), 0,0009 Hz (18.52 min), 0,002 Hz (8.33 min).

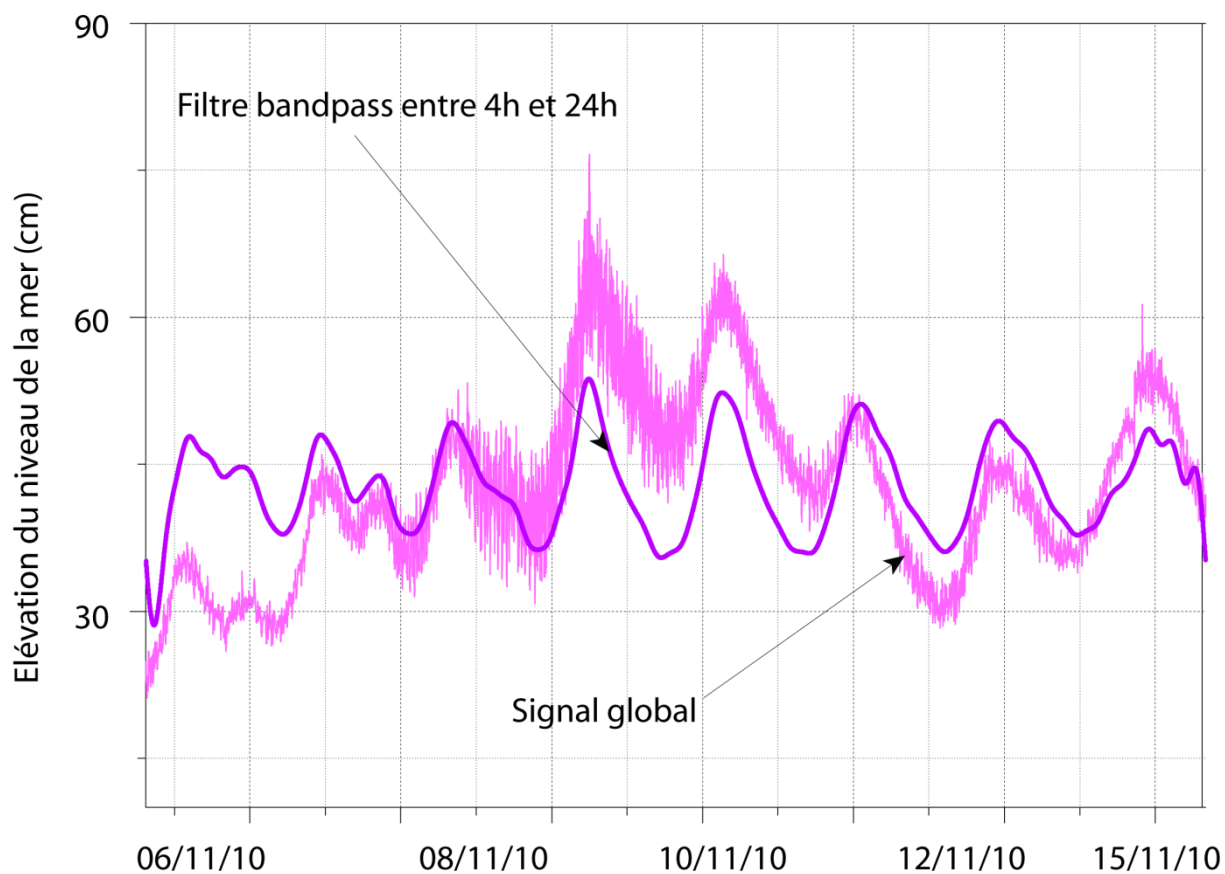


Figure 42 : Résultat du filtre band pass entre 4h et 24h de la période entre 06/11/2010 et 15/11/2010 ; isolation de la marée (trait violet)

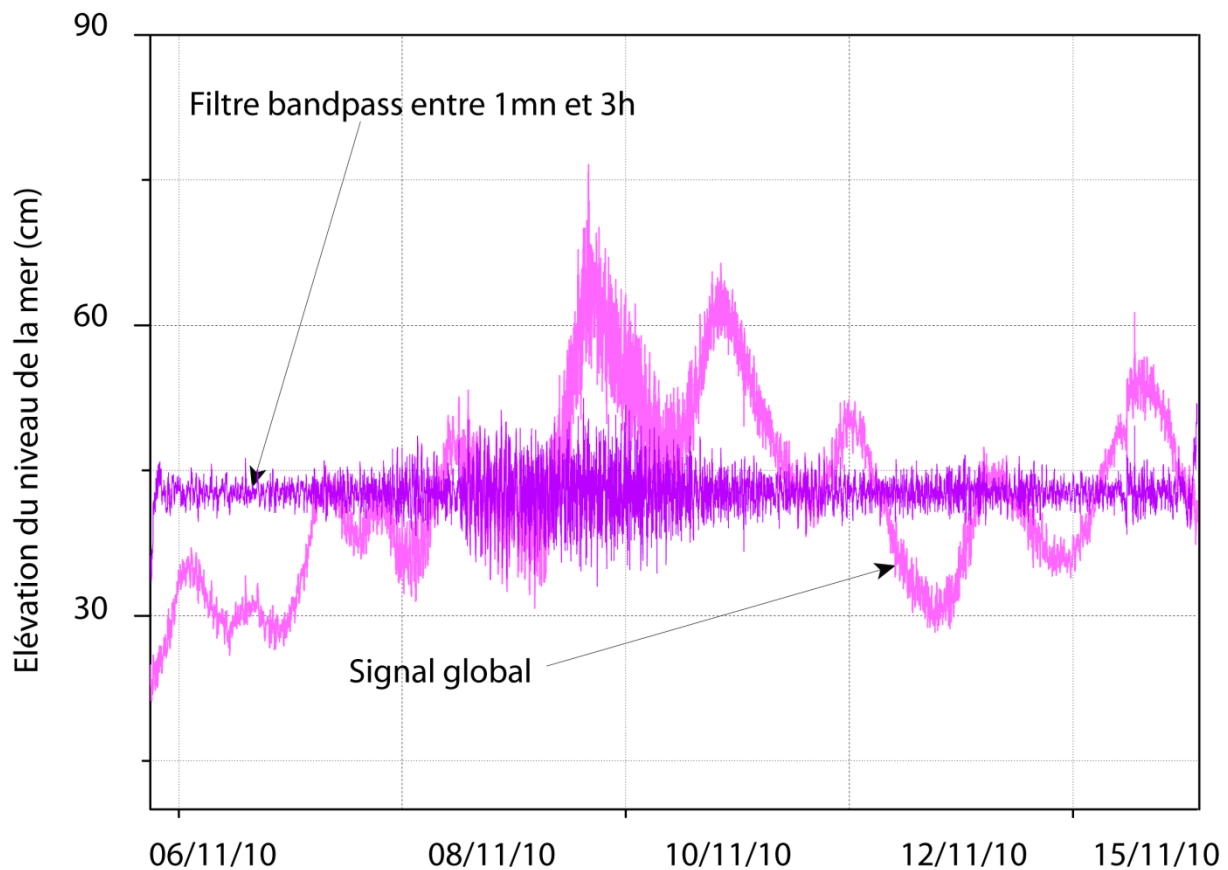


Figure 43 : Résultat du filtre band pass entre 1min et 3h de la période entre 06/11/2010 et 15/11/2010 ; isolation de la marée (trait violet)

1.2.2. Application du filtre pour la période entre le 14/11/2010 et 27/11/2010 :

La figure n° 44 illustre les résultats du signal du niveau de la mer (station Ibiza 2) filtré par *band-pass* (bande passante) entre 4h et 24h et ce, pour la période allant du 14/11/2010 au 27/11/2010. La marée observée est de type mixte (diurne et semi-diurne). Et vers la fin du mois de Novembre, nos résultats montrent la présence d'ondes de mététsunamis, qui seraient également induites par des perturbations atmosphériques. L'observation des périodes de ces ondes par analyse vauge/vague, montre que ces ondes ont des périodes qui varient de quelques minutes à 3 h.

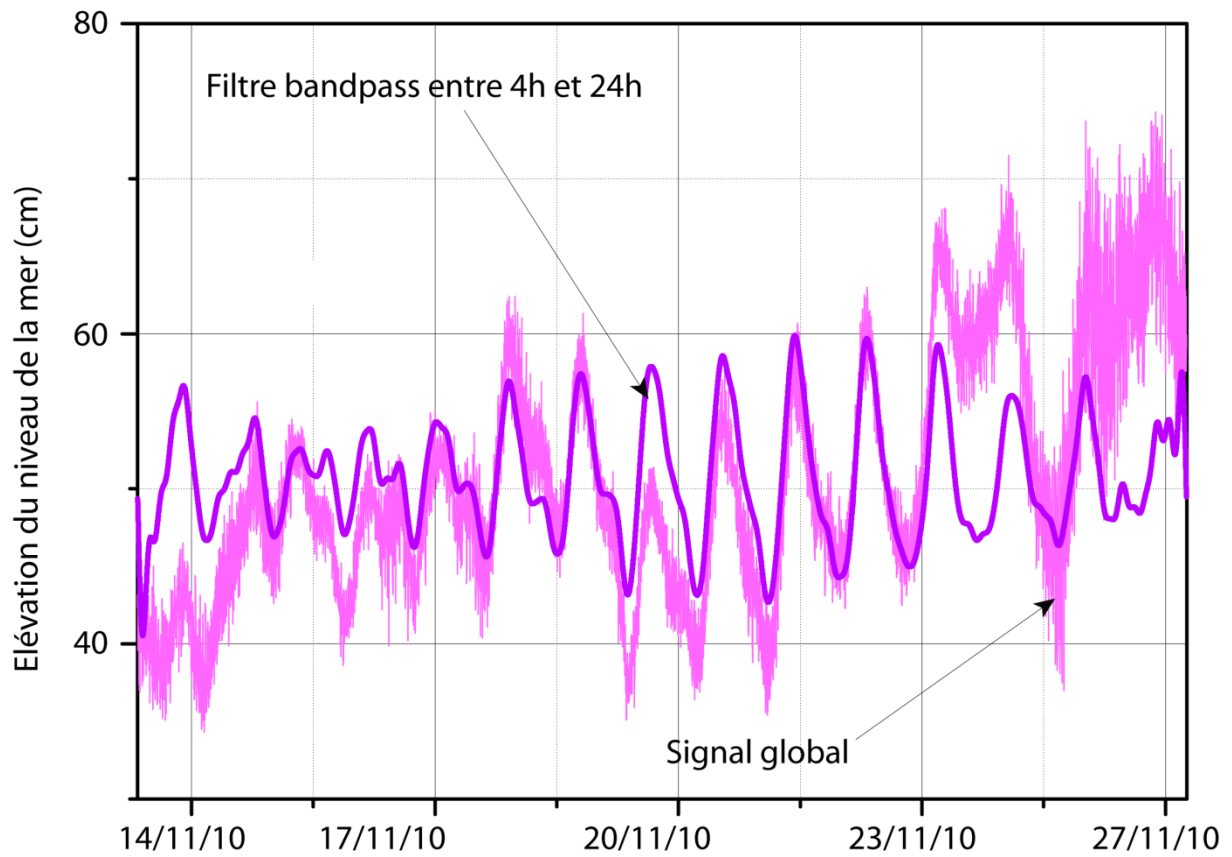


Figure 44: Résultat du filtre band-pass entre 4h et 24h de la période entre 14/11/2010 et 27/11/2010 ; isolation de la marée (trait violet)

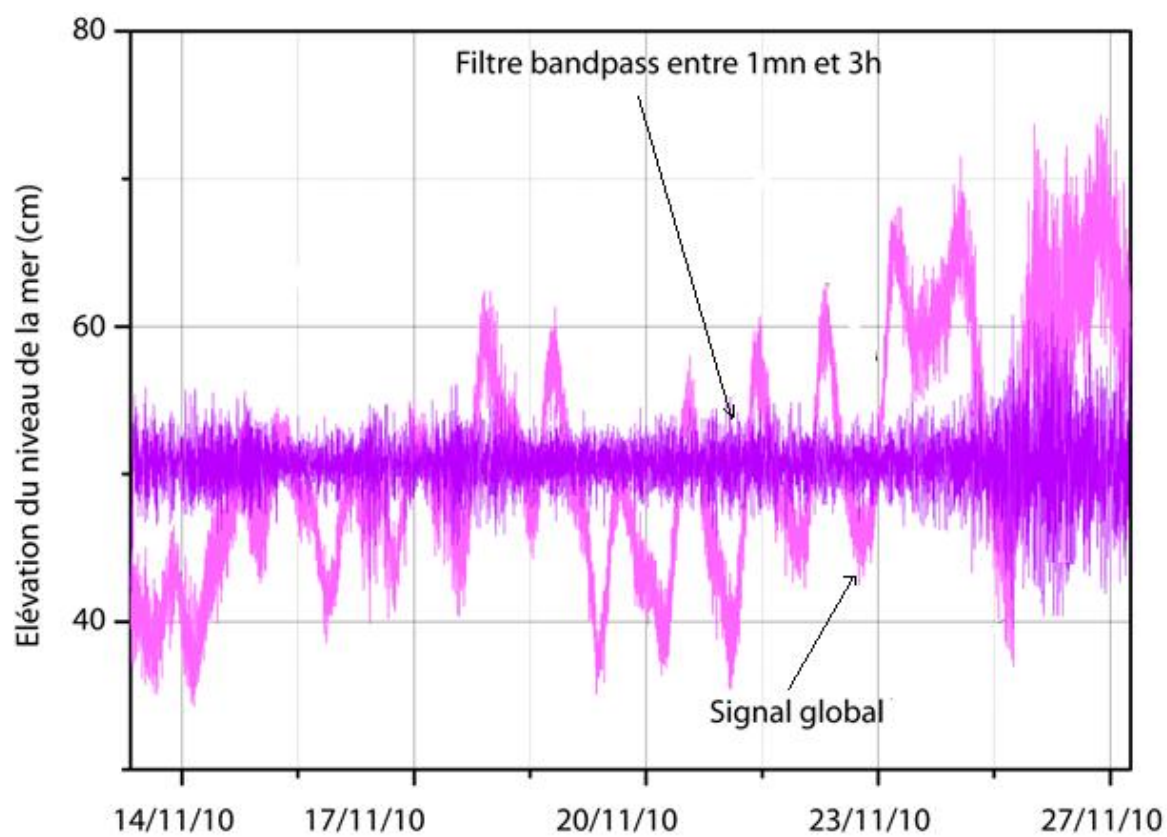


Figure 45: Résultat du filtre band pass entre 1min et 3h de la période entre 14/11/2010 et 27/11/2010 ; isolation de la marée (trait violet)

Conclusion

Conclusion et recommandations

Ce travail est une contribution pour comprendre les facteurs qui avaient induit la hausse soudaine du niveau de la mer observée au port d'El Djamila, lors de la nuit du 09 novembre 2010, laquelle, d'après certains témoignages, avait atteint des seuils d'environ 2 m.

Cependant, en raison de l'absence d'un marégraphe numérique qui effectue régulièrement des mesures dans la région, nous avons ausculté les signaux du niveau de la mer mesurés par un des marégraphes numériques du réseau de la COI (Commission *Océanographique Intergouvernementale*), localisé à Ibiza (Iles Baléares, Espagne).

Dans ce travail, nous avons privilégié une méthodologie basée sur le traitement du signal et ce, afin d'ausculter le signal du niveau de la mer observé à Ibiza, durant une période comprenant la journée du 09 novembre 2010. Ainsi, nous avons appliqué deux méthodes la Densité Spectrales des Energies et les filtres qui ont permis, respectivement, d'étudier les différentes fréquences énergétiques contenues dans le signal brut et de séparer les différentes ondes marines confondues dans le signal brut du niveau de la mer.

Les résultats des densités spectrale des puissances ont mis en évidence la présence de pics fréquentiels qui appartiennent aux ondes des tsunamis et des météotsunamis avec des fréquences de 0,000093 Hz (197, 21 min), 0,00017 Hz (98.04 min), 0,0002 Hz (83.33 min), 0,00025 Hz (66.67 min), 0,00036 Hz (46.30 min), 0,0009 Hz (18.52 min), 0,002 Hz (8.33 min). Cependant, parce que pendant cette période, aucun séisme tsunamigénique n'a été enregistré, ces ondes pourraient être imputées aux perturbations atmosphériques, capables de générer de telles ondes.

Par ailleurs, les filtres opérés sur notre signal a permis aussi bien de caractériser le type de la marée de la région d'Ibiza que l'isolation des ondes marines générées par les perturbations météorologiques. Par conséquent, la hausse soudaine du niveau de la mer observée au port d'El Djamila, lors de la journée du 09 Novembre 2010, pourrait être également générée par un météotsunami. Cependant, la corroboration de notre supposition passe par l'examen des pressions atmosphériques observées lors de la journée du 09 Novembre 2010 à El Djamila et des signaux de la marée issus du marégraphe analogique du port d'Alger.

Aussi, nous y avons mis en exergue le rôle de la morphologie côtière (ports, baies, etc) dans l'amplification de la hausse du niveau de la mer (seiches au niveau des ports, par exemple).

Notre travail se veut aussi une contribution illustrant essentiellement 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 bibliographique

- **Bellanger.M.(1996)**: Traitement numérique du signal. Edition : MASSON. 44-46p.
- **Ciria.(1991)**:Rock Manual .174p.
- **Defant. A (1961)**. Physical Oceanography, Vol.2, Pergamon Press, Oxford, UK.
- **Drago. A.(2009)**: Sea level variability and the ‘Milghuba’ seiche oscillations in the northern coast of Malta, Central Mediterranean. Physics and Chemistry of the Earth 34 (2009) 948–970p.
- **Fleury.G(2001)** . Analyse spectrale : méthode non-paramétrique et paramétrique .Edition : ellipses. 1-17-22-34p.
- **Gasquet.C, Witomski.P (1990)**. Analyse de Fourier et applications filtrage, calcul numérique et ondelette .Edition DUNOD. 6-61-71p.
- **Hemdane Yacine, Garcia María Jesús (2006)**. Analyse spectrale et temporelle des vagues du Tsunami mesurées dans les petits-fonds de Palma de Mallorca (Espagne) provoquées par le Tsunami du séisme du 21 mai 2003 généré sur la côte de Boumerdès. Alger. Algérie. (Proceeding, *International Workshop of Coastal Integrated Management GIZC*)
- **Hemdane. Y. (2006)**. Dynamique hydrosédimentaire de l’avant-côte d’un environnement macrotidal: Exemple du littoral du Nord-Pas-de-Calais. Mer Du Nord. *Thèse Doctorat*. Université du Littoral. 207 p.
- **Holthuijsen.L.(2007)**: Waves in oceanic and coastal waters. Edition: Cambridge University Press.39-40-324-325-326p.

- **Kim.Y.(2009)** Handbook of coastal and ocean Engineering .Edition: World Scientific publ., Singapoure. 194-195-213p.

- **Kinsman, B. (1965)**. Wind Waves, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

- **Malliavin.P.(2001)** : Intégration et probabilités analyse de Fourier et analyse spectrale .Edition Masson.m. 95-133p.

- **Mokhtari .M, Marie.M .(1998)**: Applications de Matlab R5et Simulink R2.Edition spinger. 1-497-477-470p.

- **Mokhtari . (2000)** . Matlab 5.2et 5.3et Simulink 2 et 3pour étudiants et ingénieurs. Edition springer. 1-3-246p.

- **Monserrat S., I. Vilibić, and A.B. Rabinovich. (2006)**: Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 1035-1051p.

- **Nosov.M ; 2009** : Physics of Tsunamis. Edition Springer. 5-11-8p.

- **Paskoff.P.(1992)** . Cote en danger .Edition Masson.m. 22-14p.

- **Paskoff.R.(2001)**. L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers. Edition: institut océanographique. 12-16-27-51p.

- **Phillips, O. M. (1977)**. The Dynamics of the Upper Ocean, 2nd ed., Cambridge University Press. Rabinovich, A.B., Monserrat S.(1996): Meteorological Tsunamis Near the Balearic and Kuril Islands: Descriptive and Statistical Analysis. *Natural Hazards* 13: 55-90, 1996. 1996 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

- **Rabinovich, A.B .(2009):** *Handbook of Coastal and Ocean Engineering. World Scientific.*
- **Rice, S. O. (1944-1945).** “Mathematical Analysis of Random Noise,” *Bell System Tech. Jour.*, Vol 23,pp 282-332.; Vol 24, pp 45-156.
- **Šepić J. ,Vilibić I, Monserrat S.(2009):** Teleconnections between the Adriatic and the Balearic meteotsunamis. *Physics and Chemistry of the Earth* 34 (2009) 928–937p.
- **Simon.B.(1994):** Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et de leur évolution. Edition: ER-PM. 94-01p.
- **Sorensen.(2006):** Basic Coastal Engineering .Edition: Springer . 139-167-168-169p.
- **Schwartz.M.(2005):** Encyclopedia of coastal science .Edition: Springer. 680-682-991-992p.
- **U.S.Army corpsof engineers.(2002):** Coastal Enginneering manual-partII.Edition EM .608p.
- **Welch, P.D. (1967).** The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio Electroacoustics* AU-15, 70–73p.

Mémoire :

- Zemmour. A et limam.M Analyse d'un signal du niveau de la mer en présence d'un Tsunami. Exemple d'un signal du marégraphe à $f = \min^{-1}$ du réseau IOC de la région de Papeete du 27 Février 2010 .Session juin 2010. 19-20p.

Sites Internet :

1. WWW.Shom.fr
2. WWW.sonel.org
3. WWW.ioc-sealevelmonitoring.org
4. <http://www-iti.enst-bretagne.fr/~hamitou/MTS301/> .51p.
5. www.tektronix.com. 47p.
6. www.meteo.gp/
7. [http://www.gipecofor.org/docs/38/manifestations/seminairelitto_octobre2010/ppt/GIZ C-adaptationaucc-Magnan_Rochette-articleIDDRI.pdf](http://www.gipecofor.org/docs/38/manifestations/seminairelitto_octobre2010/ppt/GIZ_C-adaptationaucc-Magnan_Rochette-articleIDDRI.pdf) . 4et 5p.
8. <http://www.ryounes.net/publications/houle.pdf>. 282.p.
9. http://www.pole.lagunes.org/ftp/LettreLagunes_hors_serie/Lettre_des_lagunes_hors_serie_1.pdf .3-4-7p.
10. http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/07/99/69/PDF/These_AlixLombard_Recto.pdf. 15-24-25-31-33-34P
11. http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/lettre_RONIM_2008.pdf page 3-4-8
12. http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_Litto3D/Besoin/rapport_senat_tsunami2007.pdf . 11-16-18-28p
13. http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_Litto3D/Besoin/rapport_senat_tsunami2007-syn.pdf . 1-2p.
14. http://www.shom.fr/fr_page/fr_shom/Focus_xynthia.pdf.1-2p.
15. <http://www.odpf.org/antérieures/xii/gr-5/memoire.pdf> . 5-9-10-11-16p.
16. http://refmar.shom.fr/IMG/pdf/STAGE_Rapport_TFE_surcotes_et_de_submersions_marines.pdf. 11-18-19-20-23-29p.
17. http://pierre-paul-riquet.entmip.fr/lectureFichiergw.do?ID_FICHER=33683 . 1-2p.
18. http://www.ipgp.fr/~arnaudl/PuertoRico/200806_CR_PuertoRico_AN.pdf 5 -6p.

19. <http://www.warshelectronics.com/pdf/MAREGRAPHE%20%20MCN.pdf>
20. <http://cyberscargot.pagesperso-orange.fr/term/termSujetsBac/termBacAsie2010Pb1.pdf> . 1-2p.
21. <http://www.ast.obs-mip.fr/users/carfan/Matlab/MatlabSignal.pdf>
22. MATLAB - Alfred A. Manuel - (Atelier d_outils informatiques pour la physique - UniversitB De Geneve) . 2-5-6-35p.
23. poc.obs-mip.fr/DOCUMENTS/master.gaelle.pdf
24. www.westou.ump.ma/mounir/anits/TS/matlab.pdf . 4-5 -8-9p.
25. www.qkshare.com/thread429361.html?language=fr
26. <http://maps.grida.no/go/graphic/causes-of-sea-level-rise-from-climate-change>
27. <http://www.gloss-sealevel.org/data>. 41-44-46p

Logiciels utilisés :

- Matlab
- Origine8pro
- Arc Gis