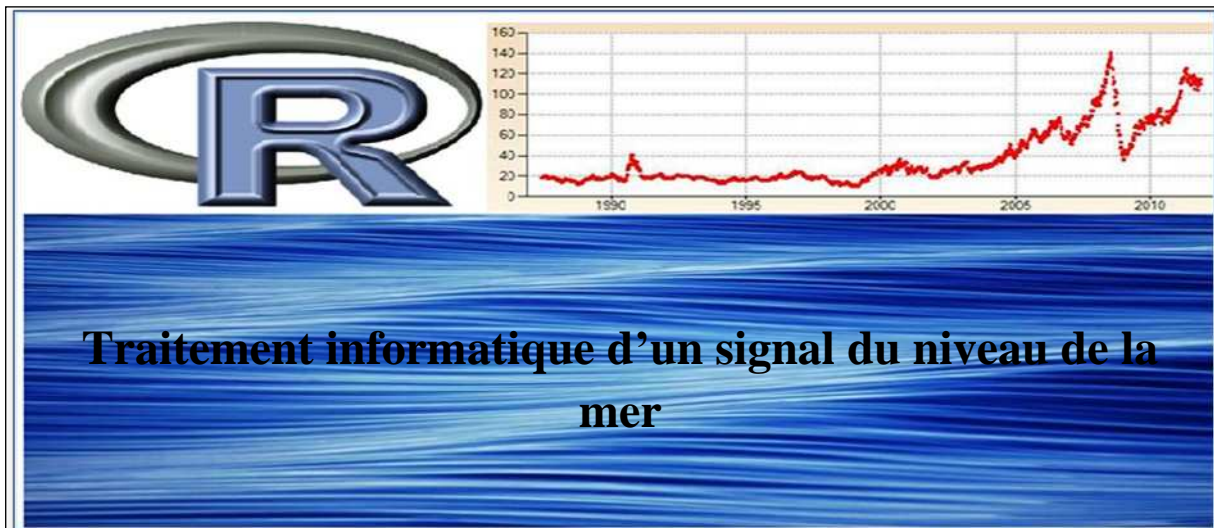


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'INGÉNIEUR EN SCIENCES DE LA MER**

Spécialité : AMÉNAGEMENT DU LITTORAL



**Traitement informatique d'un signal du niveau de la
mer**

Présenté par:

-ALLOUN Nacer

Soutenu le 01/07/2015 devant le jury suivant :

M. SEFIANE.O	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Président
M. GUERFI .S	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Examineur
M. MEZOUAR .K	Maître de conférences B (ENSSMAL)	Examineur
M. BELLAHRECHE.A	Maître assistant A (ENSSMAL)	Promoteur
M. HEMDANE.Y	Maître de conférences A (ENSSMAL)	Co-promoteur

Promotion : 2015

«Nous travaillons pour les autres jusqu'à notre vieillesse et quand notre heure viendra, nous mourrons sans murmure et nous dirons dans l'autre monde que nous avons souffert, que nous avons pleuré, que nous avons vécu de longues années d'amertume, et Dieu aura pitié de nous.» Tchekhov

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.

*Je tiens à remercier Mr **SEFIANE.O** le président d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.*

*Mr **MEZOUAR K.** de m'avoir honoré de leur présence, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à **GUERFI M.** d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à mon promoteur Mr **BELLAHRECHE.A** pour avoir dirigé ce travail et lui avoir accordé un intérêt tout au long de son élaboration.*

*Je tiens à remercier mon Co-promoteur Mr **HEMDANE.Y** d'avoir contribué à la réalisation de ce travail, et de le diriger.*

*Je tiens à remercier Madame **BENZOUAIS** et Mr **SAÏD KADDOUR** d'avoir contribué à la réalisation de ce travail.*

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail et dont nous pouvons citer les noms qu'ils trouvent mes sincères remerciements.

Dédicaces

« Je dédie ce modeste travail :

A toute la famille,

Mon père, ma mère,

*Et mes frères : HAKIM, ADEL, KAMEL, SMAIL et
KHALED*

À ma grande famille,

*À tous les amis et proches et à tous personne ayant
contribué à ce travail de près ou de loin. »*

Nacer ALLOUN

Liste des figures :

Figure 1 : Principe de calibrage des mesures du marégraphique à acquisition automatique...	17
Figure 2 : Estimation des variations du niveau marin depuis 140 ka. Modifié d'après Church et al. [2008].....	18
Figure 3 : Vitesse d'élévation: 20ème siècle et derniers 20 ans.....	19
Figure 4 : variations du niveau de la mer selon l'échelle géologique.....	20
Figure 5 : formation et destruction des calottes glaciaires.....	21
Figure 6 : Contribution de l'expansion thermique à la hausse du niveau moyen de la mer....	22
Figure 7 : contribution de l'isostasie glaciaire aux variations du niveau de la mer.....	23
Figure 8 : la variation du volume des bassins océaniques due aux variations du taux d'accrétion des dorsales.....	24
Figure 9 : Classification temporelle des ondes dans l'océan, d'après Munk, 1951.....	25
Figure 10 : Exemple de propagation d'une vague de tsunami.....	28
Figure 11 : Différents types de marée.....	30
Figure 12 : Marégraphe à flotteur inventé par Chazallon.....	34
Figure 13 : principe d'un marégraphe à flotteur.....	35
Figure 14 : Principe de mesure par le marégraphe à capteur de pression.....	36
Figure 15 : Observatoire MCN de Brest-Penfeld.....	37
Figure 16 : Principe de la mesure altimétrique.....	40
Figure17 : Schéma de la procédure de Welch.....	47
Figure18 : présentation de logiciel R.....	50
Figure19 : présentation schématique de fonctionnement de R.....	52
Figure20 : présentation de site source de données et de la station Alcudia.....	53
Figure21 : Présentation de l'emplacement des fichiers de MATLAB.....	54
Figure22 : Présentation du code dans la fenêtre d'editor.....	56

Liste des figures :

Figure23 : Présentation du code dans la fenêtre Commande.....	57
figure24 : Présentation du code du signal brut dans la fenêtre R Console.....	58
Figure 25 : Présentation du code de la densité spectrale dans la fenêtre R Console.....	60
Figure 26 : présentation de la procédure d'importation des données dans SIGVIEW.....	61
Figure 27 : présentation de la boite de dialogue du SIGVIEW.....	61
Figure28 : Signal brut temporel durant 30 jours prélevé au niveau d'Alcudia.....	64
Figure 29 : représentation de la fréquence des variations du niveau de la mer par un histogramme.....	65
Figure 30 : La densité spectrale de puissance des fréquences relative au signal.....	66
Figure 31 : schéma représentatif des différentes ondes contenues dans le signal.....	67
Figure 32 : les deux représentations de la densité spectrale de puissance sous R et Matlab....	68
Figure 33 : Résultats du filtre band pass entre 3h et 24h appliqué sur le signal.....	69
Figure 34 : Résultats du filtre band pass entre 1min et 3h appliqué sur le signal.....	70

Liste des abréviations

BM : basse mer

Cm : centimètre

COI : Commission Océanographique Intergouvernementale

col: couleur

CRAN: Comprehensive R Archive Network

DFT : transformée de fourrier discrète

DSP: la densité spectrale de puissance

FFT : fast fourier transform

Fe : Fréquence d'échantillonnage

g : l'accélération de la pesanteur

GIEC : Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GNU : GNU's Not Unix (GNU N'est pas Unix).

H : hauteur

Hz : Hertz

Ka : kilo année

km² : kilomètre carrée

Km.h⁻¹ : kilomètre par heure

LEGOS: Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales

MCN : Marégraphe numérique côtier

m : mètre

min : minute

mm : millimètre

N : nombre de point FFT

n : nombre total des échantillons

Liste des abréviations

N1 : représente l'altitude du sommet du puits du marégraphe par rapport au Nivellement Général Algérien

N2 : l'altitude de la plate-forme du marégraphe par rapport au (NGA)

NGA : Nivellement Général Algérien

NGF : nivellement général de la France

NOAA: national oceanic and atmosphéric administraion

Pa : Pascal

PM : pleine mer

Pwelch : type de spectre

[Pxx,F]:le spectre de pwelch

r: le type de la fenêtre

SHOM : service hydrographique et océanographique de la marine

T : la période

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

X : représente la hauteur du niveau de la mer

x : le nom de fichier des données

Δh : l'altitude du zéro du NGA par rapport à l'altitude du Zéro Hydrographique

ρ : La densité

SOMMAIRE

Introduction.....	13
-------------------	----

Chapitre I : Généralités sur le niveau de la mer

1. Définition du niveau de la mer.....	16
2. Histoire de variation du niveau de la mer	17
3. Les variations du niveau de la mer	20
3-1. Les variations du niveau de la mer à long terme	20
3-1-1. Variation affectant le volume d'eau.....	20
3-1-2. Variations affectant la structure des continents.....	22
3-2. Variations à court terme du niveau de la mer.....	24
4. Mesure du niveau de la mer.....	33
4-1. Le marégraphe.....	33
4-2. Altimétrie satellitaire.....	38

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1. L'analyse spectrale.....	42
1.1. Analyse spectrale avec la transformée de fourier rapide (FFT).....	43
1.2. Estimation de la densité spectrale par la méthode de WELCH.....	45
1.3. Filtrage numérique du signal.....	48
2. Le logiciel Matlab.....	48
3. Logiciel R.....	49
3-1. Définition.....	49
3-2. Présentation du logiciel.....	49
3-3. Fonctionnement de logiciel R.....	51
4. Méthodologie utilisée dans cette étude.....	52
4-1. Objectif du travail.....	52
4-2. Source des données.....	53

4-3.Traitement et analyse des données (signal du niveau de la mer).....	53
4-3-1. Estimation de l'énergie spectrale par la méthode de Welch.....	54
4-3-1-1. La procédure utilisée dans Matlab.....	54
4-3-1-2 .La procédure utilisée dans le logiciel R.....	57
4-3-2. Filtrage numérique de signal.....	61

Chapitre III : Résultats et Discussions

1. Signal temporel brut du niveau de la mer.....	64
2. Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal.....	66
3. Comparaison des deux résultats de la densité spectrale sous R et Matlab.....	67
4. Résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel.....	69
4-1. Filtre band pass entre 4h et 24h.....	69
4-1. Filtre band pass entre 1min et 3h.....	70
Conclusion.....	72

Références bibliographiques

Liste des tableaux

Tableau n°1 :les phénomènes en jeu dans les variations à long terme du niveau marin.....24

Tableau n°2 : les différentes causes des variations à court terme du niveau de la mer.....32

Tableau n°3 : Les différents types de marégraphes.....38

Introduction

L'élévation de niveau planétaire des océans et des mers est une des conséquences à attendre du réchauffement de l'atmosphère terrestre, dont on parle beaucoup actuellement et pour lequel on prévoit une accélération en liaison avec l'effet de serre additionnel dû aux activités humaines. De toutes les répercussions du changement climatique annoncé, c'est la plus largement médiatisée car elle se prête facilement à des évacuations et à des illustrations spectaculaires, malheureusement trop souvent outranciers, voire apocalyptiques. La menace serait à notre porte. Plus de 100 millions de personnes dans le monde vivraient sous la menace de la submersion. **(Giec, 2007)** Des petits états insulaires constitués de basses îles coralliennes, pourrait être rayés de la carte, et leurs habitants contraints à l'exode.

Il est nécessaire de s'interroger sur les effets possibles de cette élévation du niveau planétaire du niveau de la mer, on est en droit d'imaginer, selon les endroits, des risques d'inondation, d'érosion et de salinisation. On pourrait penser que la grande remontée du niveau de la mer –de l'ordre d'une centaine de mètres-consécutive à la fin de la dernière époque glaciaire et achevée il ya environ 6000 ans peut fournir un modèle pour les conséquences à attendre d'un tel évènement sur les différents milieux littoraux. **(Paskoff, 2001)**

On peut distinguer deux types des variations du niveau de la mer, les variations à long terme, et les variations à court terme.

La première élévation nécessite des dizaines d'années pour sa mise en évidence, les variations à court terme sont visibles à courte durée (de quelques heures à quelques jours).

Les variations à court termes englobent toutes les ondes marines de différentes fréquences, qui pourrait être générées par des phénomènes météorologiques et sismiques, et d'autres sont générées par les astres et les forces gravitationnelles.

Une variété de méthodes existe pour mesurer le niveau de la mer, parmi les plus utilisées sont les méthodes marégraphiques, La marégraphie qui était restée inchangée pendant près d'un siècle a fait l'objet depuis quelques années d'un regain d'intérêt, principalement en raison d'un besoin nouveau de mesures de bonne qualité émanant surtout de la communauté scientifique, **(Haddad, 2012)**. Qui représentent les variations du niveau de la mer en fonction de temps par un signal.

Le marégramme (ou le signal) issu d'un marégraphe nécessite un traitement numérique, à fin d'extraire les différentes composantes qui le constitue. Pour cela l'informatique joue un rôle très important. Le degré de précision pouvant être atteint par le traitement informatique des signaux présentant des oscillations très importantes, en fréquence et en amplitude. **(Devaux, 2009)**

Par conséquence la connaissance des variations du niveau de la mer, le comportement des ondes marines sont des atouts indispensables pour un ingénieur en aménagement du littoral.

L'objectif de notre travail consiste dans une première phase à aborder les différentes méthodes permettant l'étude des signaux :

- analyse spectrale avec la transformée rapide de fourier
- estimation de l'énergie spectrale par la méthode de WELCH
- filtrage numérique du signal du niveau de la mer

Dans une deuxième phase, on va réaliser un programme informatique à l'aide de langage R qui permettra de traiter un signal issu d'un marégraphe avec les méthodes citées précédemment.

Pour montrer le fonctionnement et les limites du programme qui sera réalisé les données a traitées sont choisis aléatoirement.

L'utilité de notre travail sera appréciée dans plusieurs domaines tel que l'océanographie, le génie côtier, la gestion de la zone côtière, du surcroit elle aide à alarmer des millions de personnes qui occupent la bande littorale et les peuples insulaires de danger qui les guettent, et également contribue à alarmer les instances autoritaires sur les enjeux socioéconomiques suite à l'élévation du niveau de la mer.

Ce présent mémoire intitulé " Traitement informatique d'un signal du niveau de la mer " est un mémoire qui comprend trois chapitres :

- Premier chapitre : Généralités sur le niveau de la mer.
- Deuxième chapitre : traitement des différentes méthodes permettant l'étude des signaux issus des marégraphe numériques, et description de la méthodologie suivie dans notre étude et des logiciels utilisés.
- Troisième chapitre : comprend les résultats des différentes analyses et traitements des signaux et leur interprétation.

Chapitre I

Généralités sur le niveau de la mer

Le niveau de la mer est une grandeur observée depuis plusieurs siècles déjà. En effet, dans de nombreux pays, les peuples anciens étaient capables de relier les mouvements réguliers de la mer à ceux de la Lune et du Soleil.

Aujourd'hui nous sommes obligés de mesurer le niveau de la mer à cause des dangers que représente son élévation, mesurer le niveau de la mer Ça nous oblige à poser la question suivante : *mesurer le niveau de la mer par rapport à quoi?*

1) Définition de niveau de la mer

Le niveau de la mer est la hauteur moyenne des eaux marines en repos, c'est-à-dire le profil de la mer sans aucune déformation (absence totale des différentes ondes qui peuvent exister en mer), cette hauteur est mesurée par rapport à un point de référence préalablement déterminé.

On éliminant les déformations à courte durée, on peut se repérer à un niveau moyen de la mer qui s'identifie à l'interface entre l'hydrosphère marine et l'atmosphère.

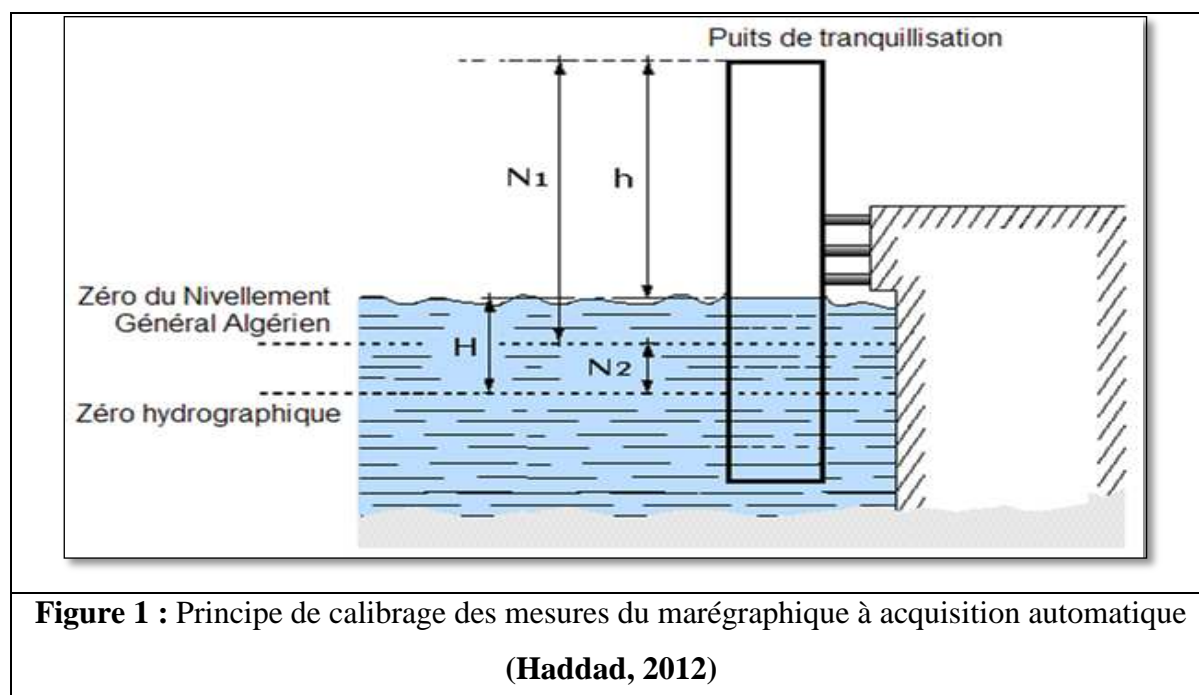
En France, ce niveau moyen qui correspond au 0 NGF (nivellement général de la France), fut déterminé dans l'anse Calvo, près de Marseille, en calculant la moyenne altimétrique des hauteurs de la marée pendant la période allant du 3 février 1885 au 1^{er} janvier 1897. (**Paskoff, 2001**).

En Algérie le niveau de la mer référencé au zéro hydrographique est obtenu par l'équation suivante :

$$H=N1+N2-h$$

Où N1 représente l'altitude du sommet du puits du marégraphe par rapport au Nivellement Général Algérien (NGA), N2 est l'altitude de la plate-forme du marégraphe par rapport au (NGA) qui est fixé à 34 cm, et H hauteur de la mer par rapport au zéro hydrographique , h représente la hauteur entre le point marégraphique situé au sommet du puits marégraphique et le niveau de la mer. (**Haddad, 2012**).

Les paramètres de calibrage ont été calculés en utilisant ce procédé pour des périodes équivalentes d'un mois. (**Zekkour, 2013**).



La Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) définit le niveau moyen comme la valeur moyenne du niveau de la mer calculée à partir d'une série suffisamment longue de données (le niveau de la mer étant défini comme le niveau de la surface de la mer observé par rapport à un niveau de référence prédéfini, à un instant quelconque) [UNESCO, 1985].

2) Histoire de variation de niveau de la mer

De ce point de vue, les modifications les plus spectaculaires, parce que rapides dans une perspective géologique du temps et mettant en jeu la soustraction ou l'ajout de gros volumes d'eau aux cuvettes océaniques, sont celles liées à l'alternance de périodes marquées par le refroidissement de la Terre (périodes glaciaires) et de périodes caractérisées au contraire par son réchauffement (périodes interglaciaires).

Dans les hautes latitudes, d'énormes calottes du type inlandsis peuvent alors se former, telles celles qui, entre 80 000 et 10 000 ans avant aujourd'hui, se sont développées et ont fini par recouvrir sous quelques milliers de mètres d'épaisseur le Canada et la Fennoscandie.

Dans les grandes montagnes des moyennes latitudes (Rocheuses, Alpes, Caucase, Himalaya, Andes), les glaciers s'étaient considérablement allongés et épaissis. Il y a environ 20 000 ans, lors du maximum du froid, 71 millions de km³ d'eau (contre 24

millions de km³ actuellement) prélevée dans les océans étaient stockés sur les continents sous forme de glace. En ce temps là, le niveau général des océans et des mers était situé entre -100 et -120 m par rapport à sa position actuelle.

Il y a 15 000 ans un réchauffement climatique commença à se manifester. La hausse des températures fut suffisante pour faire disparaître en une dizaine de milliers d'années les grands inlandsis du Canada et de Fennoscandie, et pour réduire considérablement l'extension des glaciers de montagne. De l'eau retourna aux océans et aux mers dont le niveau actuel fut atteint, à peu de chose près, il y a 5 ou 6 000 ans. Cette remontée mondiale du niveau marin, parfois interrompue par des baisses temporaires dues à des récurrences du froid, est connue sous différentes appellations qui sont synonymes : transgression postglaciaire, holocène, flandrienne en Europe occidentale. (**Paskoff, 1993**)

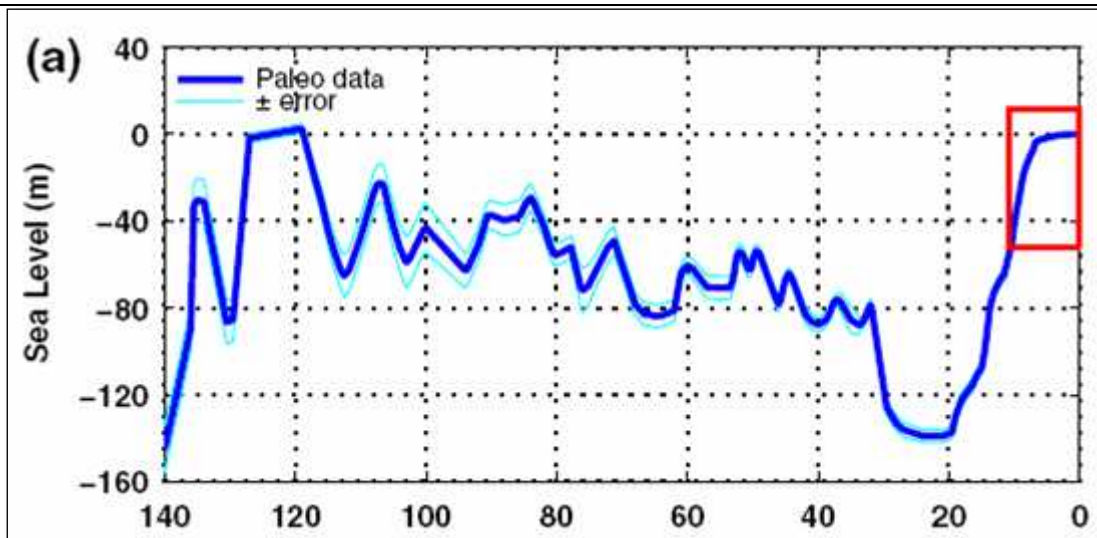


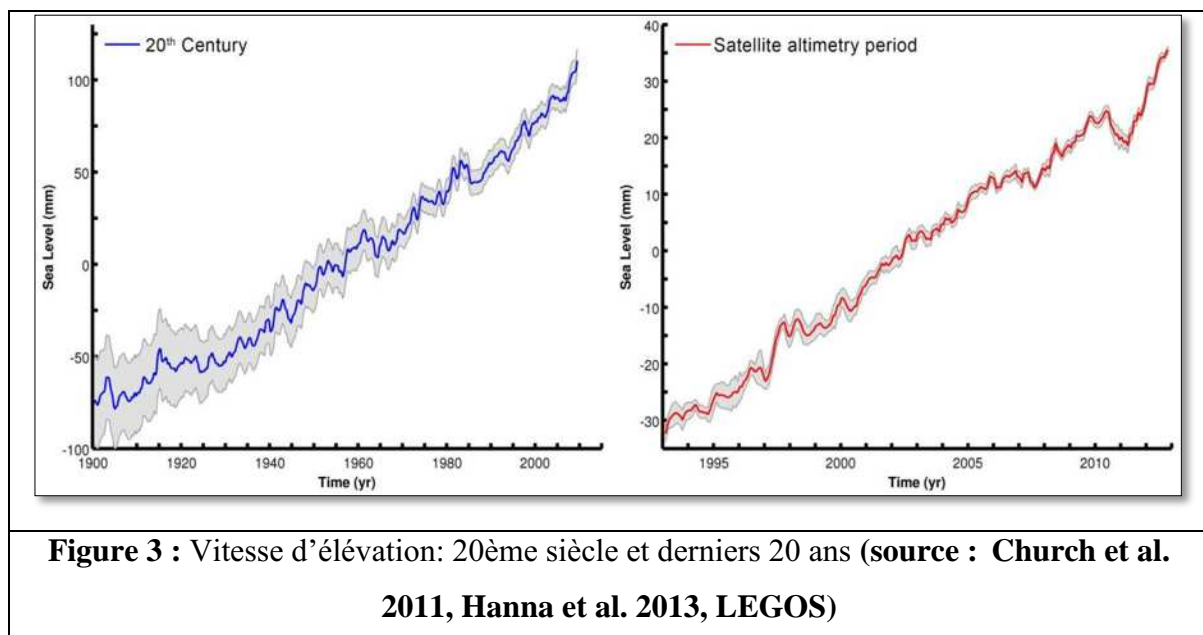
Figure 2 : Estimation des variations du niveau marin depuis 140 ka. Modifié d'après Church et al. [2008]. (**Anny CAZENAVE, 2009**).

L'élévation contemporaine du niveau de la mer :

Les variations du niveau de la mer contemporaines qui sont l'objet d'une multitude d'études.

Ces variations sont généralement d'origine anthropiques, avec les grandes quantités de carbone émit dans l'atmosphère, l'homme a provoqué le phénomène de changement climatique, qui tend à augmenter la température et par conséquent la fonte des glaces polaires, ensuite l'élévation du niveau de la mer. Malgré que les variations sont très lentes «depuis environ un siècle, le niveau de la mer se relève à une vitesse de l'ordre d'1,5 mm/an» (Paskoff, 1998), mais peuvent atteindre des valeurs alarmantes dans les prochaines années qui viennent.

Dans les 15 cm d'élévation du niveau de la mer mis en évidence pour les cent dernières années, 10 cm sont attribués au glacio-eustatisme (décrue des glaciers de montagne) et 5 cm au thermo-eustatisme (réchauffement de la tranche supérieure de l'eau des océans et des mers). On s'inquiète actuellement pour la Terre d'un possible effet de serre qui serait lié à l'augmentation croissante de la quantité de gaz carbonique dans l'atmosphère à cause du recours aux combustibles fossiles et des déforestations. (Paskoff, 1998).

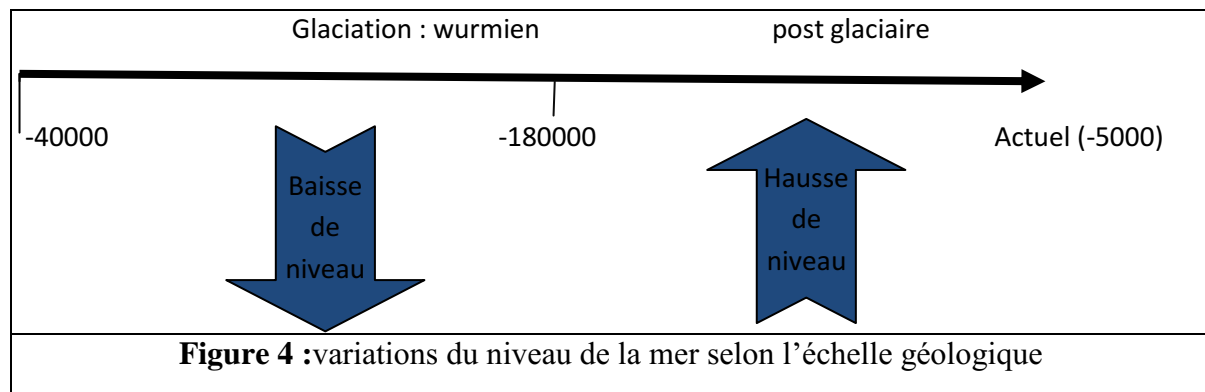


3) les variations du niveau de la mer

Les variations du niveau de la mer sont temporelles, c'est-à-dire sont liées à l'échelle géologique d'une part, et chronologique d'autre part. Alors on parle des variations du niveau de la mer à long terme et des variations à court terme.

3-1) les variations du niveau de la mer à long terme

les variations du niveau de la mer durant l'histoire géologiques sont liées à des périodes glaciaires et post-glaciaires, c'est à dire en relation avec le climat, par conséquent pendant la période glaciaire il ya une baisse du niveau de la mer, et pendant la période post-glaciaire une hausse du niveau de la mer.



Il ya un autre phénomène qui peut contribuer à la variation du niveau de la mer, c'est le changement des reliefs sous marins, alors on distingue deux types des variations :

3-1-1) variation affectant le volume d'eau :

❖ Fonte des glaces continentales :

La fonte des banquises et des icebergs ne modifie jamais le niveau de la mer parce que Si cette glace océanique fond, l'eau de fonte occupe exactement le volume d'eau de mer que la glace occupait, sans modifier le niveau marin.

Par contre, la fonte des calottes polaires (Antarctique et Groenland) et des glaciers de montagne (réservoirs continentaux d'eau) constitue la deuxième cause de l'élévation du niveau de la mer.

“Le réchauffement climatique qui suivit provoqua la fusion de ces glaciers (les glaciers régionaux et locaux qui s'étaient formés et développés pendant la dernière période froide du globe) et la conséquence fut une remontée mondiale du niveau de la mer, connue sous le nom de transgression flandrienne, parfois appelée versilienne en Méditerranée” (Paskoff, 1998)

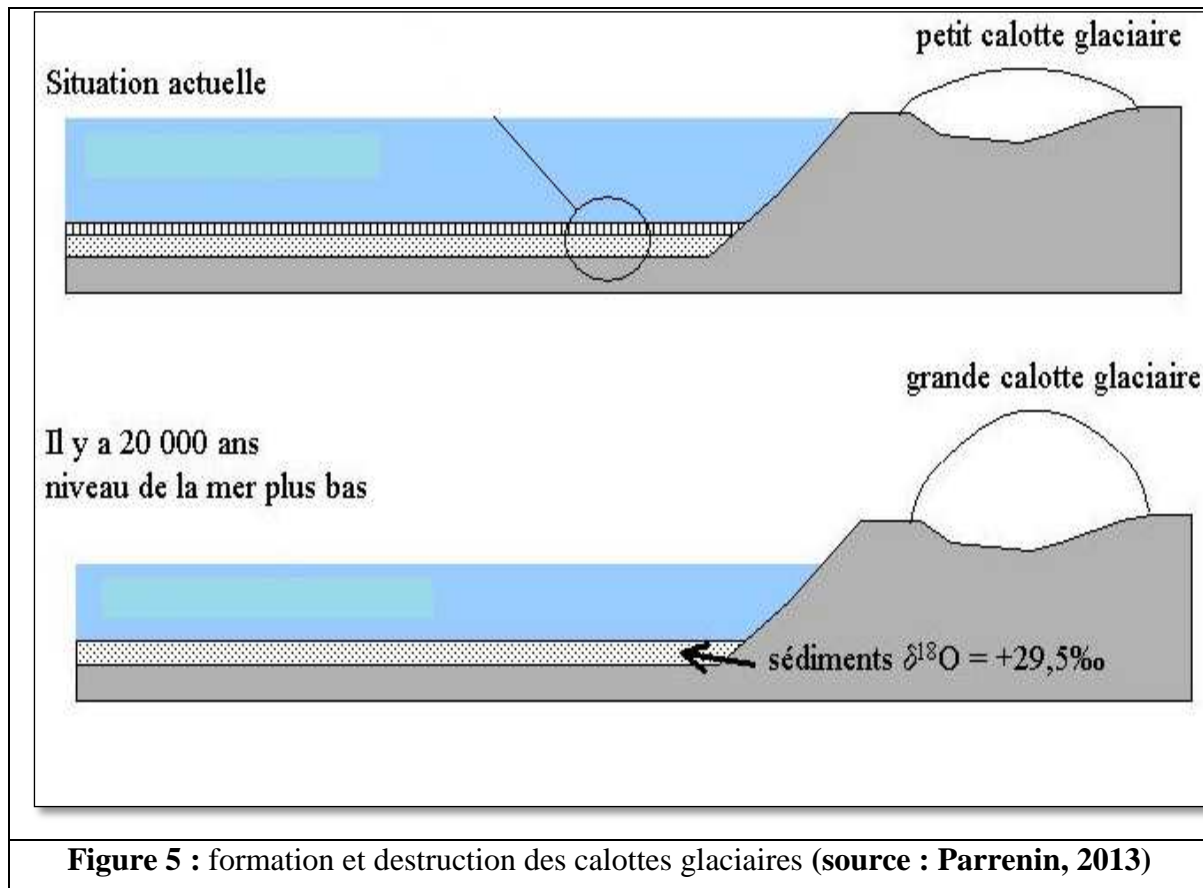


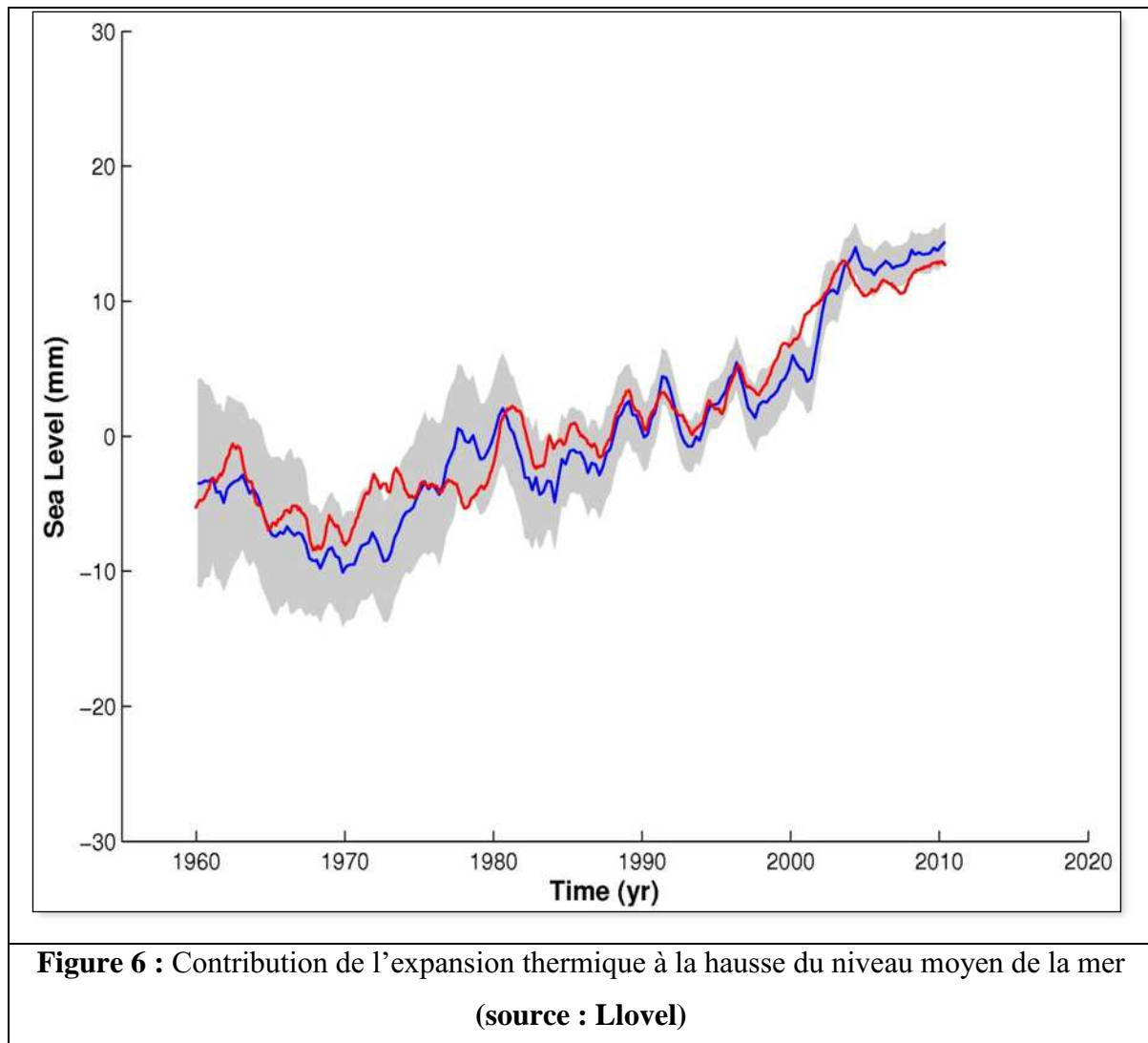
Figure 5 : formation et destruction des calottes glaciaires (source : Parrenin, 2013)

❖ La dilatation thermique de l'eau :

L'eau change de volume selon la température, en se réchauffant sa densité diminue et son volume augmente. Les observations depuis 1961 montrent que la température moyenne de l'océan mondial a crû jusqu'à des profondeurs d'au moins 3 000 m et que l'océan a absorbé plus de 80 % de la chaleur ajoutée au système climatique (GIEC, 2007). Un tel réchauffement provoque une expansion de l'eau de mer, contribuant à l'augmentation du niveau de la mer.

Au dernier siècle les températures de la terre ont augmenté, sous l'effet des activités industrielles, par conséquence le niveau de la mer a augmenté.

Les températures des océans ont augmenté, et le niveau des eaux a globalement augmenté de 15-20 cm au cours du 20ème siècle, avec un rythme accéléré durant la dernière décennie (3 cm) (Cazenave & Nerem, 2004; Lombard et al., 2005).



3-1-2) variations affectant la structure des continents :

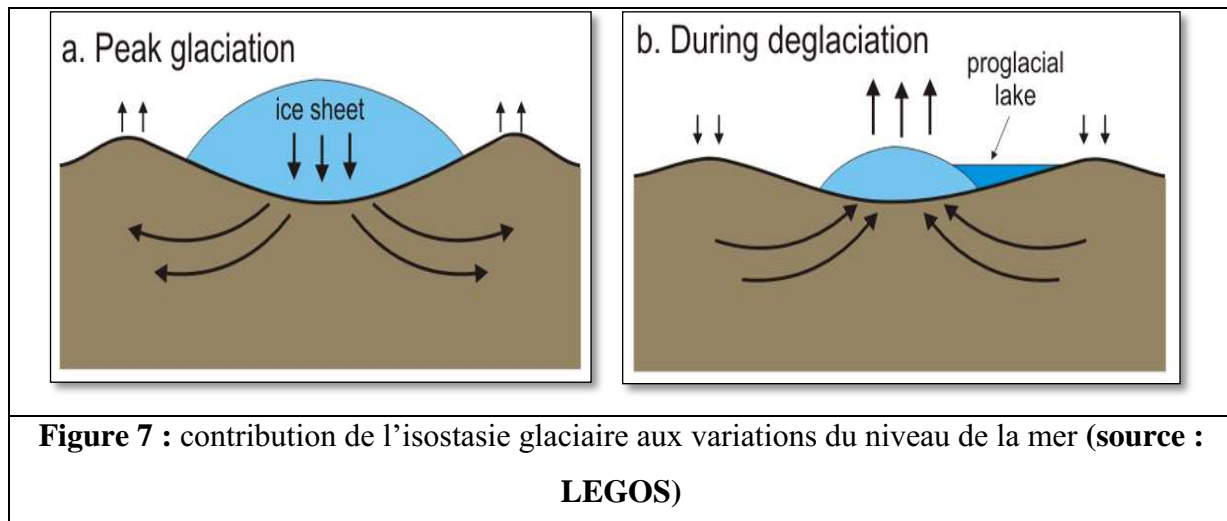
les variations affectant la structure des continents, sont provoqués par divers phénomènes tel que la tectonique des plaques, géodynamique des fonds, la formation des rides et des dorsales océaniques, l'expansion du lit marin, l'isostasie glaciaire, compaction.

❖ Isostasie glaciaire :

la formation d'une calotte glaciaire entraîne sous elle l'enfoncement de la lithosphère dans la matière visqueuse du manteau, et entraîne le soulèvement des régions périphériques. Lors de la fonte de ces calottes le phénomène inverse se produit, soulèvement

de la lithosphère et enfoncement des zones périphériques, suivant les deux cas sur les cotes, le niveau de la mer baisse ou monte.

sur la cote nord-orientale des états-unis qui s'était soulevée, pendant la dernière glaciation, le Canada était recouvert par un grand inlandsis, l'affaissement se poursuit au rythme d'environ 1.5 mm par an (**Paskoff, 1993**)



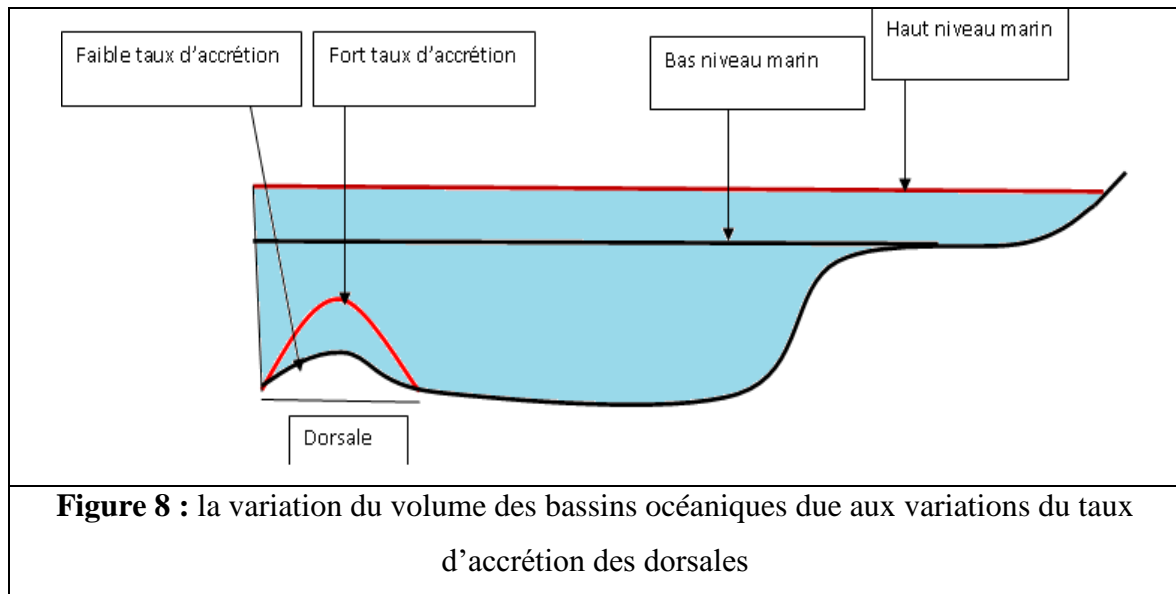
❖ Seismes et variations brusques du niveau de la mer :

L'instabilité tectonique des rivages contribue aussi à faire varier localement l'intersection de la surface avec le continent. La subduction d'une plaque tectonique sous une autre provoque des tremblements de terre, qui sont capables de modifier la topographie des côtes, par conséquent des modifications du niveau de la mer.

Dans le sud du Chili, lors de l'occurrence d'un séisme important, on observa les effets quelques jours plus tard à Concepción, un peu plus au nord, où le niveau marin local s'était abaissé comme conséquence d'un soulèvement du rivage de 0.60 à 1 m. (**Paskoff, 1993**)

❖ Accrétion des dorsales et variation du niveau de la mer :

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**).



On a expliqué quelques phénomènes en jeu dans les variations du niveau de la mer à long terme, parmi les divers phénomènes qui existent, qu'on peut résumer dans le tableau suivant :

Tableau n°1 : les phénomènes en jeu dans les variations à long terme du niveau marin
(Roland PASKOFF, 1998)

océan	Continent
Tectono-eustatisme	Isostasie glaciaire
Glacio-eustatisme	Isostasie d'érosion
Eustatisme sédimentaire	Mouvements tectoniques
Thermo-eustatisme	Compaction
Halo-eustatisme	
Hydro-isostasie	
Déformation du géoïde	

3-2) variations à court terme du niveau de la mer :

La surface des océans est perturbée par de nombreux phénomènes physiques tels que l'action du vent, les mouvements du plancher océanique dus aux séismes et glissements de terrain se répercutant dans la colonne d'eau, l'interaction entre la Terre et les astres, ou encore les différences de pressions atmosphériques.

Ces perturbations sont périodiques ou aléatoires, c'est-à-dire à court terme, en éliminant ces déformations on peut se référer à un niveau moyen de la mer.

Toutes les ondes présentes en mer sont soumises à plusieurs forces de rappel parmi lesquelles on trouve la gravité, la force de Coriolis, les tensions superficielles et la compressibilité du fluide. Ces ondes sont comprises dans un spectre allant de quelques secondes jusqu'à quelques jours.

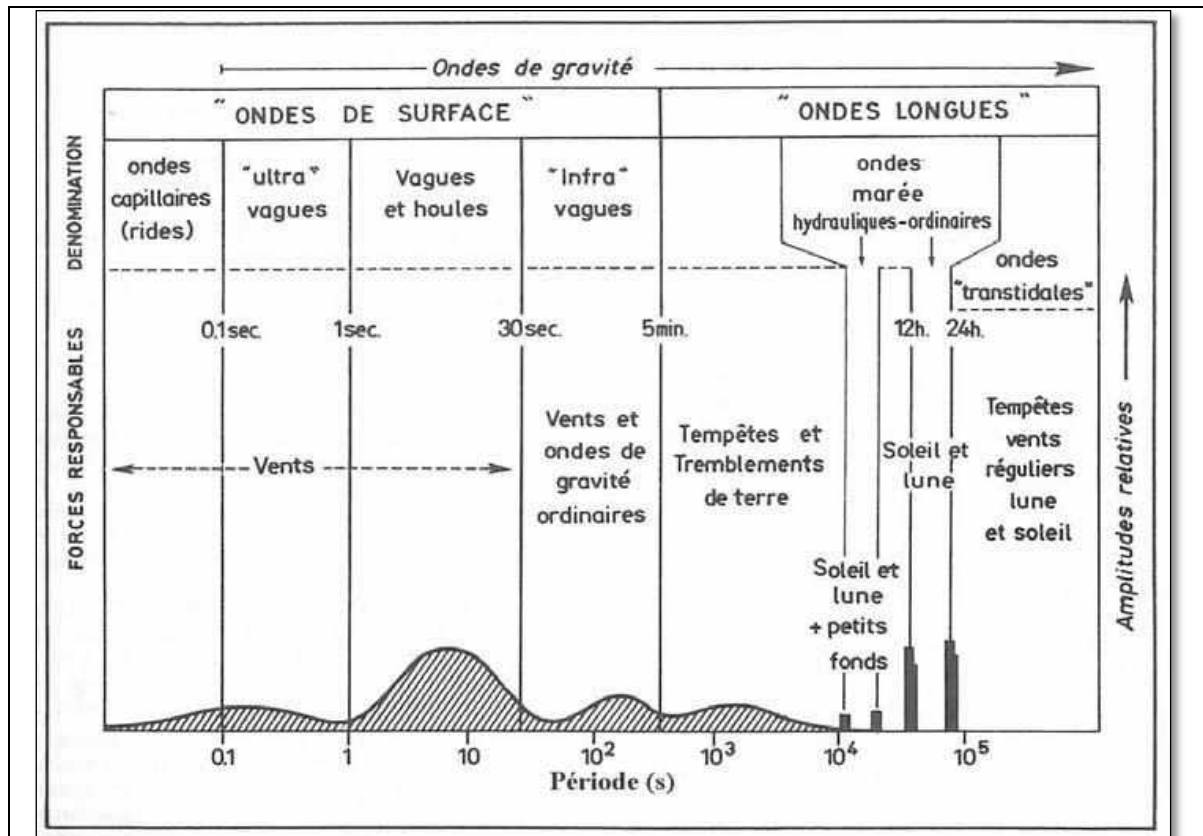


Figure 9 : Classification temporelle des ondes dans l'océan, d'après Munk, 1951.

Dans cette partie nous allons aborder les différentes ondes marines, mais on va donner beaucoup plus l'importance à l'effet des ondes marines sur les variations du niveau de la mer.

❖ **Les différentes ondes marines et leur contribution à l'élévation du niveau de la mer :**

- Les ondes capillaires :

Ceux 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) :

Se sont des ondes caractérisées par une gamme fréquentielle comprise entre 3 et 33 secondes. les ondes de gravité regroupant la houle et la mer du vent.

➤ La houle :

La variabilité de la houle pourrait avoir un impact sur les variations du niveau de la mer, en produisant une légère surélévation du niveau marin à l'approche de la cote. L'amplitude de cette surélévation dépend de plusieurs facteurs, notamment la bathymétrie à l'approche du marégraphe et l'amplitude de la houle [Castelle, 2004]. L'élévation due à ce phénomène peut être de l'ordre de quelques dizaines de centimètres pendant une grosse tempête. (Thomas GOURIOU, 2012).

➤ Mer du vent :

La mer du vent désigne l'ensemble des vagues générées par un vent local. Ceux sont des ondulations qui progressent et évoluent en présence du vent. Le vent agit sur le profil de la mer, ce qui va modifier le niveau moyen de la mer.

• Les ondes infra-gravitaires :

Ceux sont des ondes qui ont une période comprise entre 33 secondes et 5 min, La génération des ondes infra-gravitaires provient de la présence de groupes d'ondes qui induisent une variation de la surface libre moyenne. Là où les vagues sont grosses , le niveau d'eau moyen est le plus bas, Cette onde longue va être fortement réfléchiée par la plage alors que les groupes d'ondes qui se propageaient avec elles sont dissipés par déferlement bathymétrique. L'onde longue va alors pouvoir se propager librement.

“Les ondes infra-gravitaires pourrait être générées, entre autres, par le battement du point de déferlement des vagues et les oscillations dues aux trains d'ondes”(Yacine HEMDANE, 2006).

La hauteur de ces vagues infra-gravitaires est relativement faible, elle est souvent comprise entre 20 cm et moins d'un mètre, (René BONNEFILLE ,2011). Mais se sont des ondes longues qui peuvent franchir la cote, notamment les cotes à faible relief.

- Les seiches :

Les seiches sont des oscillations périodiques, amorties ou entretenues, des grands plans d'eau (rades, bassins portuaires, canaux, détroit, lacs, etc.). Ce sont des ondes de gravité, de période comprise dans la gamme de l'ordre de grandeur de la minute à quelques heures. **(Bonnefille ,2011).**

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 secondes à 10min).et leurs origine est purement météorologique **(Haslett et al, 2009).**

Les seiches ont souvent été ignorées lors des études du niveau de la mer, principalement en raison de leur effet local, mais leur connaissance est importante aussi bien pour l'ingénierie côtière que pour la réalisation de travaux portuaires.

- Les tsunamis :

La vague de tsunami est une onde marine générée par la perturbation de la surface de la mer. Cette dernière peut être induite aussi bien par les séismes que par d'autres phénomènes comme la chute d'astéroïdes en mer, des glissements sous-marins, etc. **(Hemdane, 2015).**

La longueur d'onde d'un tsunami peut être supérieure à 100 km et sa période peut varier de quelques minutes à plus d'une heure (quelques minutes à 2-3h), **(Bonnefille ,2011).** en fonction du mécanisme générateur de l'onde, les tsunamis lorsqu'elles s'approchent des côtes, elles donnent, par suite de la diminution de la profondeur, des vagues qui peuvent être monstrueuses puisque des lames de plusieurs dizaines de mètres de haut, qui inondent la zone côtière, de cette manière les tsunamis contribue à l'élévation du niveau de la mer.

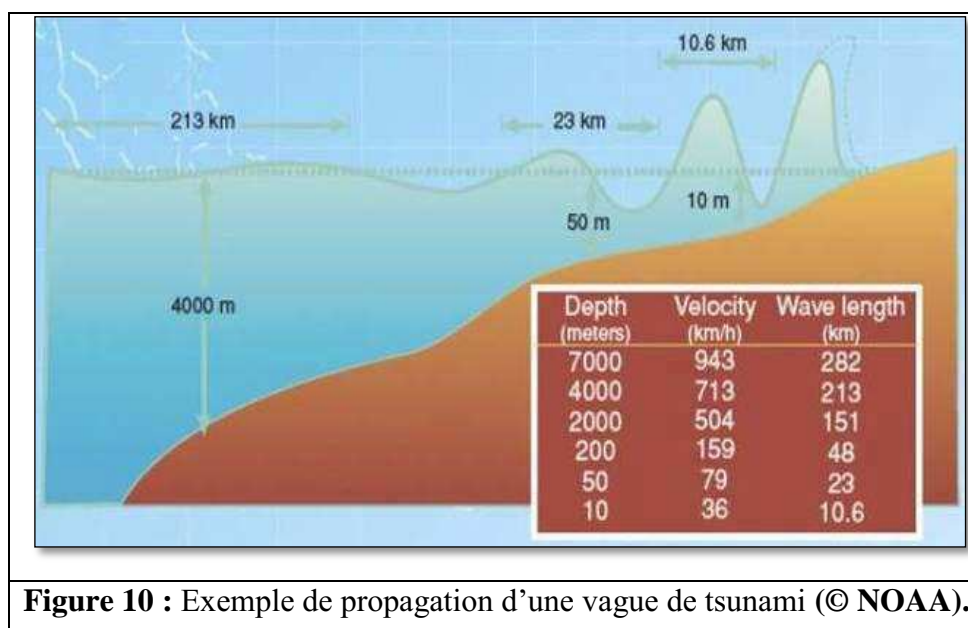


Figure 10 : Exemple de propagation d'une vague de tsunami (© NOAA).

Ainsi, donc Ce phénomène est à l'origine d'inondations spectaculaires sur les espaces littoraux bas, en particulier les plaines deltaïques et les vasières maritimes, En 1953, aux Pays-Bas, 1365km² de polders furent inondés et il y eut 1 835 morts. (Paskoff, 1998).

- Les marées :

La marée océanique est la variation périodique du niveau de la mer due à l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil. C'est généralement le signal le plus important contenu dans un enregistrement marégraphique, et il est assez facile de le distinguer parmi d'autres signaux en raison de ses périodes bien définies.

L'amplitude de la marée est différente en chaque lieu du globe, en fonction de la profondeur et de la dimension des bassins océaniques, par conséquent le niveau de la mer varie selon l'amplitude de la marée, qui joue un rôle très important dans les variations à court terme du niveau de la mer.

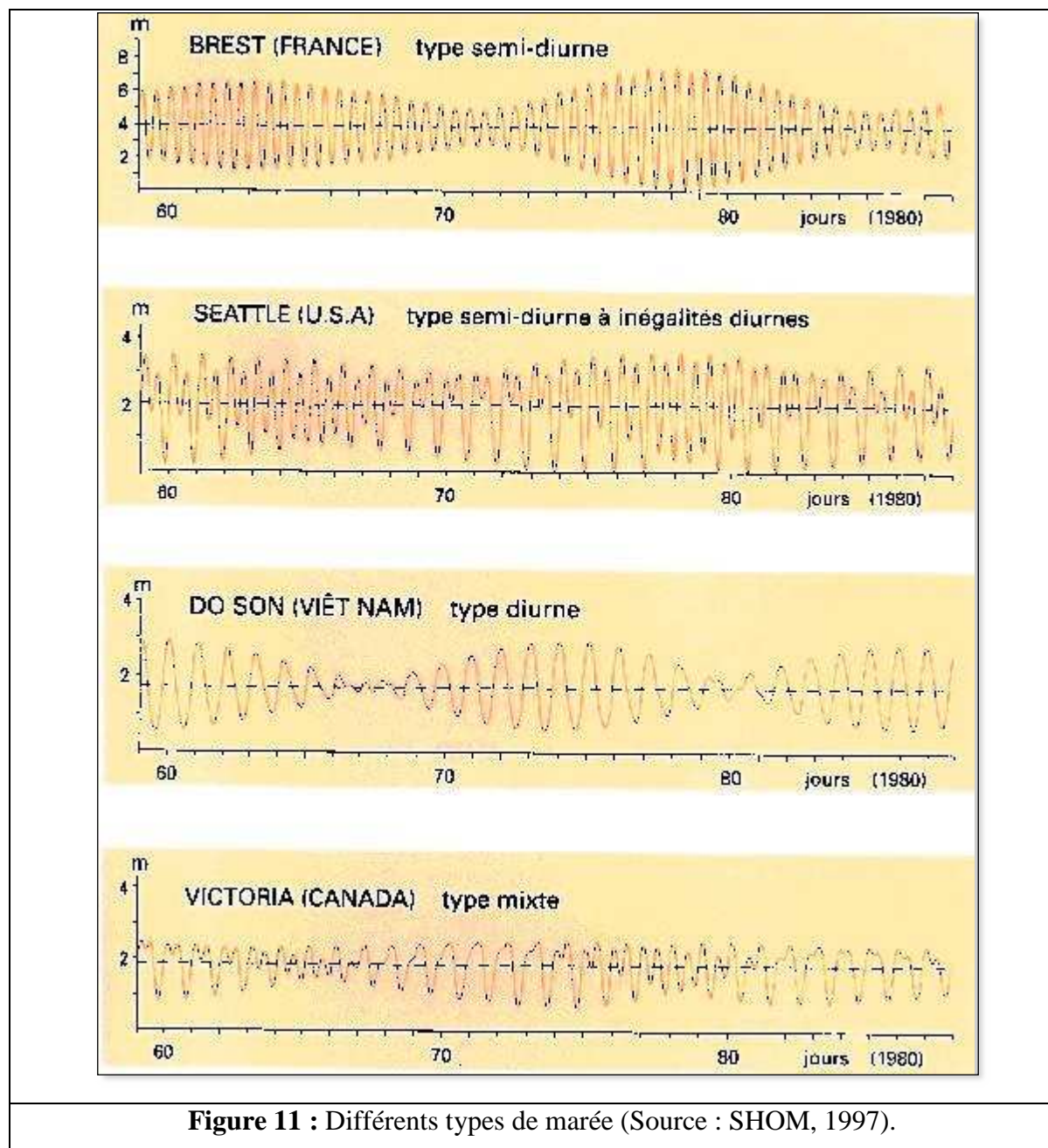
Les force génératrices de la marrée sont liées aux attractions entre les astres, considérons successivement les systèmes Terre-Lune, puis Terre-Soleil : dans chacun une particule d'eau de masse M2, située à la surface de la Terre sera soumise à deux forces : la force centrifuge et la force d'attraction gravitationnelle. (Nicolle, 2006).

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, Michallet, Barthélemy, 2007).**

Il existe 4 grands types de marée, selon les importances respectives des composantes semi-diurnes et diurnes :

- Type semi-diurne : les composantes diurnes sont négligeables devant les composantes Semi-diurnes. Deux PM et deux BM d'importance sensiblement égale sont observées par jour. Ce type de marée est prépondérant en Atlantique.
- Type diurne : les composantes semi-diurnes sont négligeables devant les composantes diurnes. Une PM et une BM sont observés par jour. Ce type de marée se trouve dans les petites mers comme la Baltique ou le Golfe du Mexique.
- Type semi-diurne à inégalités diurnes : c'est un cas intermédiaire entre les deux types précédents. Les composantes diurnes ne sont pas négligeables. La marée présente toujours 2 PM et 2 BM par jour, mais les hauteurs des PM ou des BM consécutives peuvent être très différentes.
- Type mixte : c'est un autre cas intermédiaire, avec cette fois des composantes diurnes très importantes. Tantôt 2 PM et 2 BM sont observées par jour (lorsque la Lune est à l'équateur) et tantôt 1 PM et 1 BM sont observées par jour (lorsque la déclinaison de la Lune est proche de son maximum). Ce type de marée se trouve dans le Pacifique et l'Océan Indien. **(Nicolle, 2006)**



❖ **Les ondes de tempête (élévation soudaine du niveau de la mer) :**

Les ondes de tempête sont la résultante de basses pressions atmosphériques et de forts vents, provoquant une élévation anormale du niveau de la mer, appelée surcote. La surcote étant définie comme la différence positive entre le niveau marin réellement observé et le niveau prédit de la marée [PINEAU-Guillou, 2008].

Les facteurs qui contribuent à la montée soudaine du niveau de la mer sont divers, Il y a d'abord une diminution de la pression atmosphérique liée au passage, soit d'une perturbation du front polaire, soit d'un cyclone tropical. 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**). . Ensuite peut s'ajouter une accumulation sur la côte d'eau poussée par des vents violents. Ainsi, dans le cas d'un vent soufflant durant douze heures en direction de la terre à une vitesse de 80 km.h⁻¹ l'élévation de la mer est de l'ordre du mètre (**Paskoff, 1998**). . Enfin, la surcote peut être encore accentuée par un effet de résonance lié à la configuration du lit marin, en particulier quand les petits fonds s'étendent loin vers le large.

Le 7 et 8 novembre 1982, les rivages de la Camargue et du Languedoc subirent les effets d'une tempête exceptionnelle, de fréquence semi-centennale. Une diminution marquée de la pression atmosphérique et des vents violents du sud-est, caractérisés par des rafales de plus de 150 km.h⁻¹, engendrèrent pendant une cinquantaine d'heures une surélévation du plan d'eau qui, à certains moments, atteignit 2 m tandis que des vagues de 2 m de haut ravageaient les plages. (**Paskoff, 1998**).

Tableau n°2 : les différentes causes des variations à court terme du niveau de la mer(source: **élévation du niveau de la mer, Wiki-média, par moulin**)

Causes à court terme (périodiques)	Échelle de temps	Effet vertical
Changements périodiques du niveau de la mer		
Marées astronomiques diurnes et semi-diurnes	période 12–24 h	0,2–10+ m
Marées à longue période		
Variations de la rotation de la Terre	période 14 mois	
Fluctuations météorologiques et océanographiques		
Pression atmosphérique	quelques heures à quelques mois	–0,7 à 1,3 m
Vents (ondes de tempête)	1–5 jours	Jusqu'à 5 m
Évaporation et précipitations	quelques jours à quelques semaines	
Topographie de la surface de l'océan (changements dans la densité de l'eau et courants)	quelques jours à quelques semaines	Jusqu'à 1 m
El Niño/ oscillation méridionale	6 mois tous les 5–10 ans	Jusqu'à 0,6 m
Variations saisonnières		
Équilibre saisonnier de l'eau entre les océans		
Variations saisonnières dans les pentes de la surface de la mer		
Trop-plein et crues des rivières/fleuves	2 mois	1 m
Changements de densité saisonnière de l'eau	6 mois	0,2 m
Seiches		
Seiches (vagues stagnantes)	quelques minutes à quelques heures	Jusqu'à 2 m
Séismes		
Tsunamis	Heures	Jusqu'à 10 m

4) mesure du niveau de la mer

Comme on a déjà vu précédemment les variations du niveau de la mer (surtout contemporaines), constitue un risque côtier, par la destruction des infrastructures portuaires, l'inondation de la frange côtière, d'une manière générale le risque de submersion ; pour lutter contre ce danger il faut avoir les outils de la prévision et du mesure des variations du niveau de la mer.

En fin les variations du niveau de la mer est un indicateur des changements climatiques, qu'il faut mesurer pour connaître l'extension de ce phénomène et alerter le monde de ce danger.

4-1) le marégraphe :

La conception du premier marégraphe à flotteur à enregistrement automatique est l'œuvre d'un ingénieur anglais, H. Palmer qui décrit l'appareil dans le journal Philosophique Transactions de 1831. Son premier lieu d'implantation fut à Sheerness, sur la côte Est de l'Angleterre. **(Pouvreau, 2008)**

Les enregistrements marégraphiques, nous permet de détecter les bruits de fond liés à des événements météorologiques (oscillations de la pression atmosphérique) ou hydrologiques (oscillations dans la position et dans l'intensité des courants marins), une tendance de comportement du niveau moyen de la mer.

L'analyse des données marégraphiques nous permet de mieux appréhender les mécanismes physiques qui sont à l'origine de la variabilité de cette grandeur.

❖ Définition :

Un marégraphe est un instrument permettant de mesurer le niveau de la mer à un endroit donnée sur une durée déterminée.

Le principe du marégraphe est simple, situé dans un emplacement précisément identifié, le marégraphe enregistre le niveau de la mer au cours du temps, c'est-à-dire il mesure les variations du niveau de la mer par rapport à la terre dans une ou des période (s) donnée (s).

❖ Les types de marégraphe :• Marégraphe à flotteur :

Le marégraphe à flotteur est un marégraphe mécanique à enregistrement automatique dont l'invention est attribuée à un ingénieur anglais, Henry Palmer, en 1831 [PALMER, 1831].

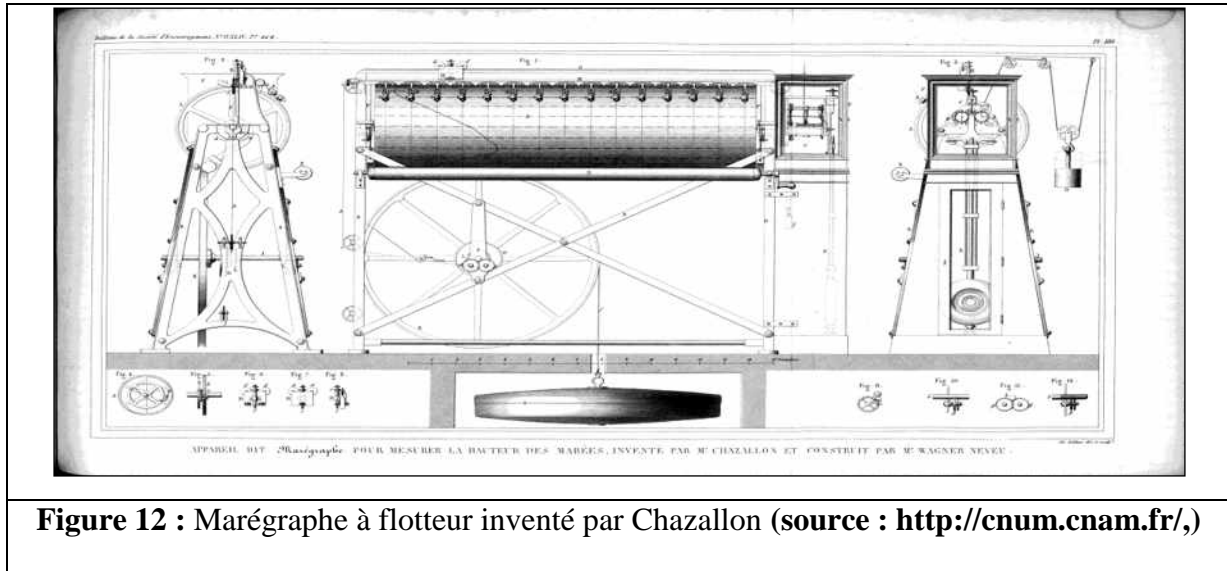


Figure 12 : Marégraphe à flotteur inventé par Chazallon (source : <http://cnum.cnam.fr/>.)

Le principe de mesure est simple : un stylet assure le tracé du niveau marin sur une feuille quadrillée (marégramme), qui est enroulée sur un tambour enregistreur dont la rotation est régulée par une horloge. Les variations du niveau marin sont alors transmises par un fil reliant le flotteur situé dans le puits de tranquillisation au tambour enregistreur.

On obtient des enregistrements analogiques sur un marégramme, dont il est rapporté à un axe horizontal des abscisses graduée en heures et un axe vertical des ordonnées graduées en mètres. (Gouriou, 2012)

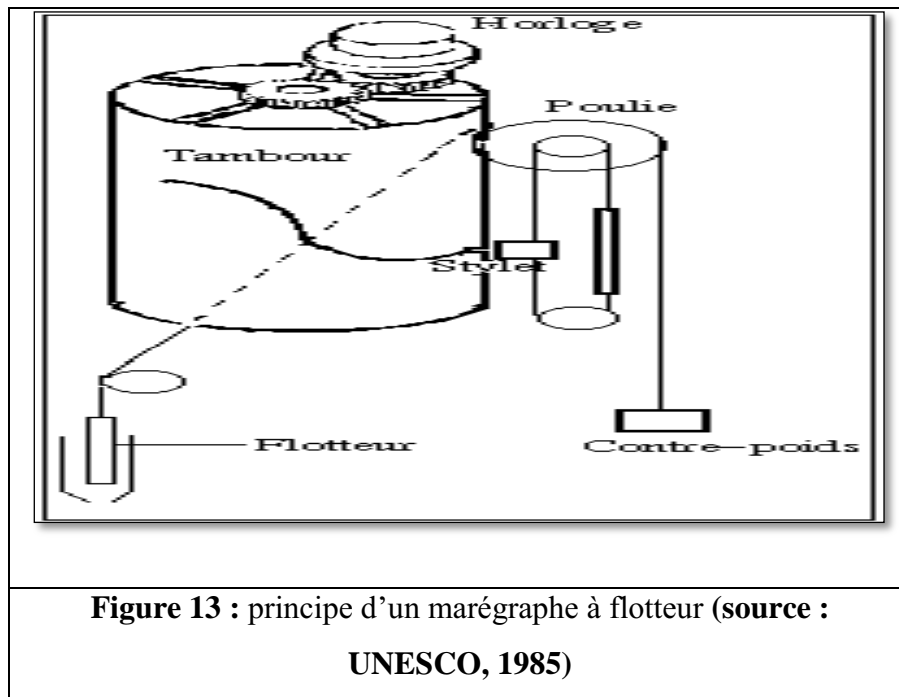


Figure 13 : principe d'un marégraphe à flotteur (source : UNESCO, 1985)

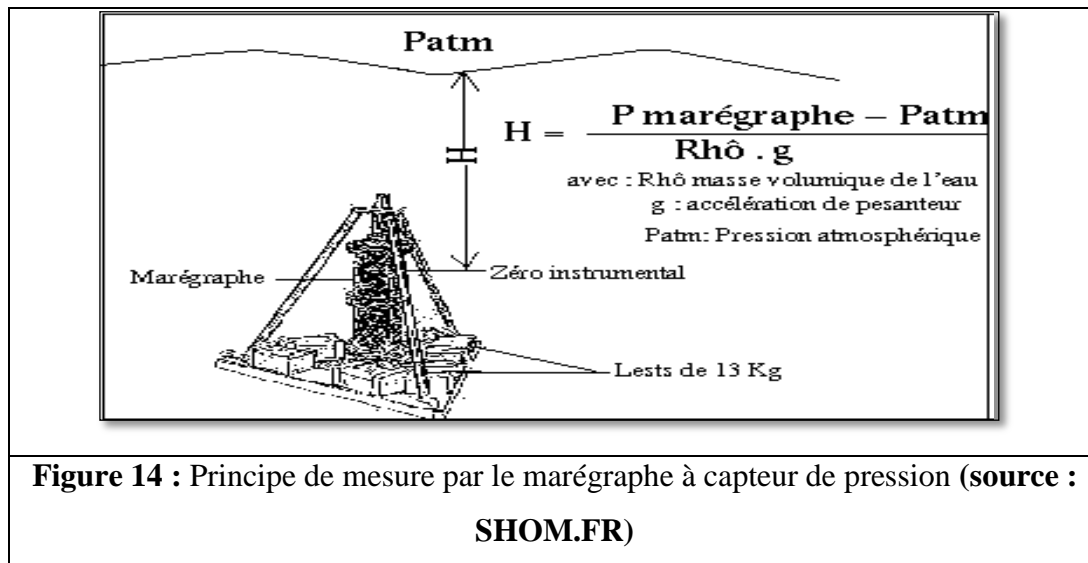
- Marégraphe à capteur de pression :

La principale motivation de la construction de ce type de marégraphe était la possibilité de pouvoir mesurer les variations du niveau marin au large, contrairement aux marégraphes à flotteur, limités à la côte.

Le principe de fonctionnement est simple : le marégraphe utilise la relation entre la hauteur d'eau et la pression hydrostatique correspondante. . (Gouriou, 2012). Il mesure la pression exercée par la colonne d'eau et par l'atmosphère au-dessus du point de mesure immergé, et on obtient ensuite la valeur de la hauteur d'eau H au dessus de la référence interne du marégraphe, à l'aide de l'équation :

$$H = \frac{P_{\text{mesuré}} - P_{\text{atmosphérique}}}{\rho * g} \dots \dots \dots (I - 1)$$

Avec ρ : la densité de l'eau de mer et g : l'accélération de la pesanteur



- Marégraphe numérique côtier (MCN) :

Le marégraphe numérique côtier est un nom donné par le service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) (service français), qui désigne les marégraphe à sonde aérienne de deux types : ultrasonique (acoustique) et radar (électromagnétique).

Les MCN comprennent deux entités complémentaires :

- La centrale d'acquisition archive les données acquises, la centrale a une horloge interne qui date les mesures.
- Les télémètres ultrasonores ou radars placés au dessus de la surface d'eau, ces télémètres émettent un court train d'impulsion et détectent le signal réfléchi.

Le principe de mesure de ces marégraphe est fondé sur la mesure du temps de parcours aller-retour d'une onde (acoustique ou électromagnétique) émise par le transducteur au-dessus de la surface de l'eau et réfléchi par cette dernière. La connaissance de la vitesse de propagation de l'onde dans l'atmosphère permet alors de convertir la mesure de temps en mesure de distance.

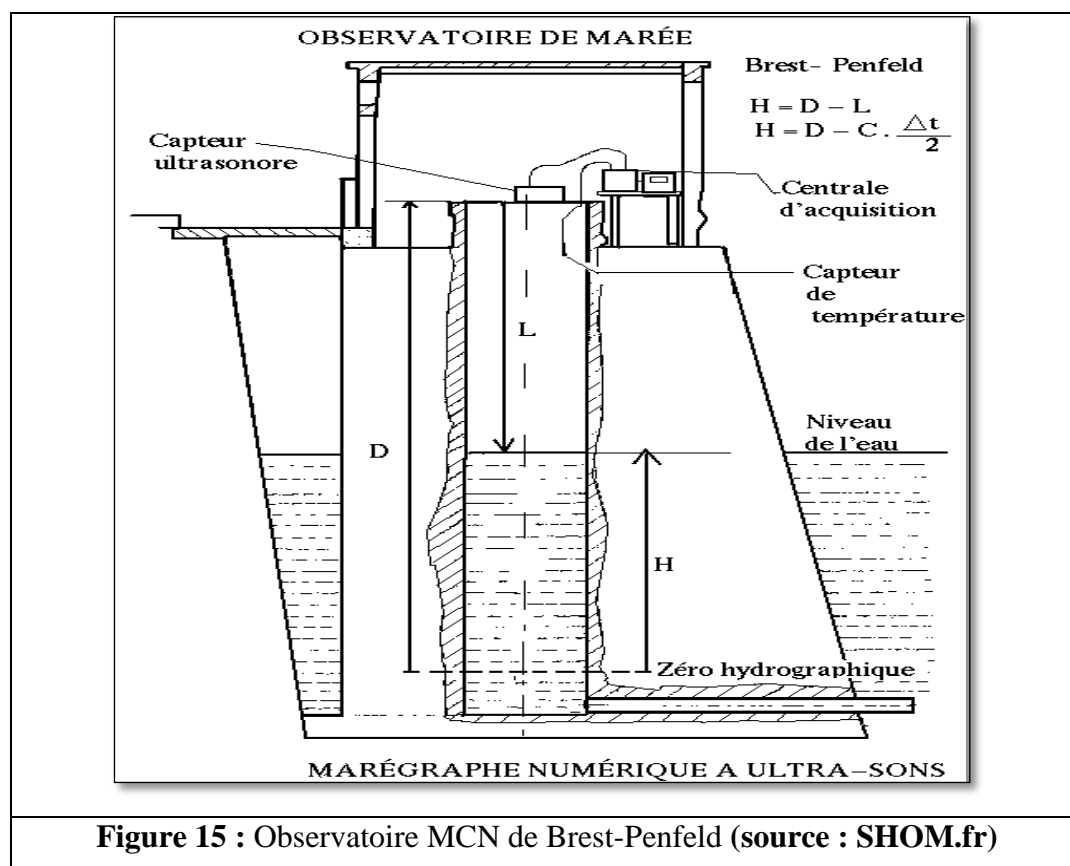


Figure 15 : Observatoire MCN de Brest-Penfeld (source : SHOM.fr)

- L'échelle de marée :

L'échelle de marée est l'outil le plus ancien utilisé pour mesurer le niveau de la mer, 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 in Bouldja et Rami, 2012).

Elle est placée verticalement le long d'un quai ou d'un échafaudage ou selon la plus grande pente du quai.

L'observateur note sur un carnet d'observation de marée, l'heure et la hauteur. Les lectures de marée sont relevées à intervalles réguliers. Ces intervalles sont variables selon le type de contrôle et d'application désirée.

Son but premier est désormais le contrôle et l'étalonnage des marégraphes, c'est pourquoi il est nécessaire d'installer l'échelle à proximité directe du marégraphe, de préférence dans un lieu abrité de la houle et qui ne risque pas la destruction.

On peut présenter les différents types des marégraphes et leurs principes dans le tableau suivant :

Tableau n°3 : Les différents types de marégraphes (sources : SHOM [2002] et CAZENAVE [2012])

Type	Première utilisation	Installation / Principe
Echelle de marée	1679	au niveau de l'interface eau/air, lecture manuelle des pleines et basses mers
Marégraphe à flotteur	1831	au niveau de l'interface eau/air, immergé dans un puits de tranquillisation, enregistrement des variations de hauteur du flotteur
Marégraphe à capteur de pression	1960	Posé sur le fond, mesure des variations de pression
Marégraphe à ultrason	1985	au-dessus de la surface de l'eau, mesure acoustique de la distance
Marégraphe radar	1990	au-dessus de la surface de l'eau, mesure radar de la distance séparant l'instrument de la surface libre de l'eau

4-2) altimétrie satellitaire

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

Les rapides progrès des techniques de l'altimétrie satellitaire radar ont permis de mener des travaux scientifiques d'une grande variété et d'un grand intérêt, Cette technologie a permis de quantifier la distribution spatiale du niveau des océans, ainsi que son évolution temporelle.

❖ Historique et définition :

L'altimétrie satellitaire radar a vraiment connu ses débuts le 28 juin 1978 avec le lancement du satellite Seasat (Seasat-A), développé par le JPL2 (Jet Propulsion Laboratory, NASA). Le but de cette première mission était non seulement de démontrer la possibilité d'observer les océans -au travers notamment de la mesure de leur hauteur, température de surface et hauteur des vagues- depuis l'espace à une altitude de 800km, mais également de définir les besoins pour les futures missions opérationnelles de suivi des océans.

Depuis, de nombreuses missions - à composante altimétrique ou dédiées - ont vu le jour, Nous pouvons citer les missions ERS-1 et ERS-2, GeoSAT, GFO, Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2 et ENVISAT. (**Bercher, 2008**).

❖ Principe de l'altimétrie radar par satellite :

La mesure du niveau de la mer par un altimètre radar embarqué sur satellite repose sur le même principe que ceux des marégraphes à sonde aérienne ; 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 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. (**Rami, 2012**). 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, in Bouldja et Rami, 2012**).

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. L'objectif essentiel est de mesurer le niveau de la mer par rapport à une référence terrestre. (**Cazenave,et Nerem, 2004**).

En réalité donc, les mesures altimétriques ne sont pas le produit d'un simple instrument, mais le résultat d'un système de mesure complexe constitué de quatre composantes principales :

1. la mesure du temps de parcours de l'onde radar
2. le positionnement précis du satellite dans un référentiel terrestre
3. la connaissance de l'indice de réfraction de l'atmosphère qui affecte la durée de propagation
4. l'état de la mer sur une zone de plusieurs kilomètres

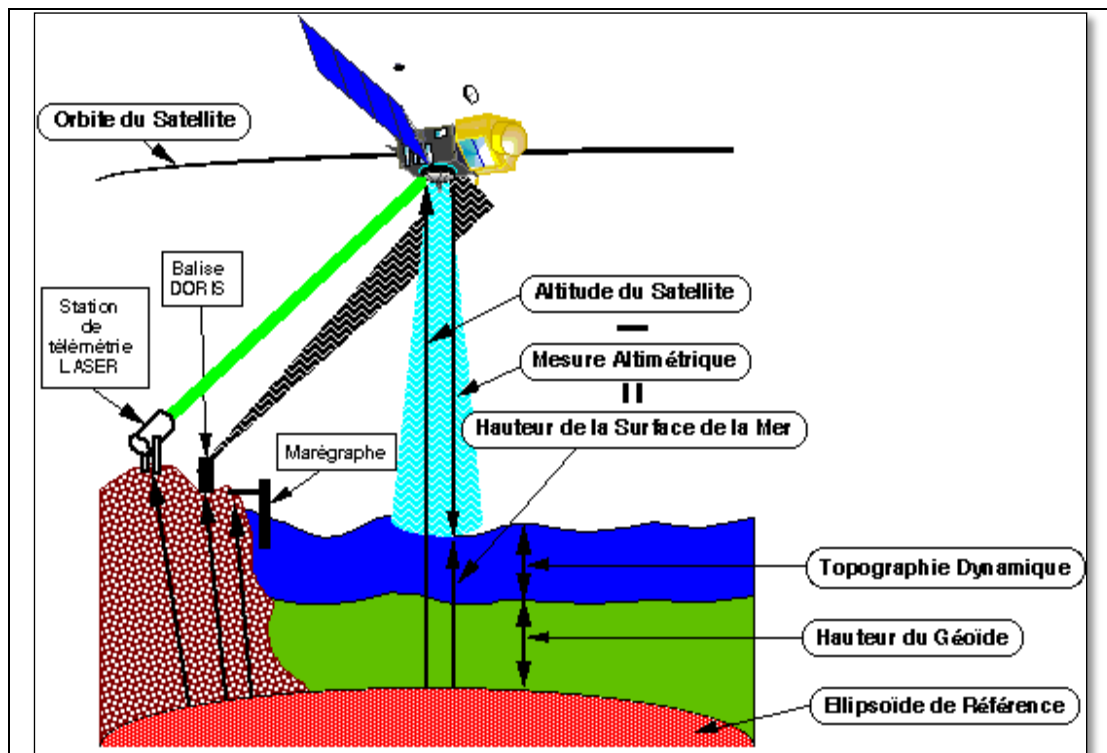


Figure 16 : Principe de la mesure altimétrique (Source: Aviso Altimetry)

Chapitre II

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 du réseau de la COI (commission océanographique intergouvernementale) localisé au niveau d'Alcudia une commune d'Espagne de l'île de Majorque.

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].

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

- 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.

1) l'analyse spectrale :

L'analyse spectrale c'est une méthode en physique pour déterminer les caractéristiques fréquentielles et énergétiques d'un phénomène ondulatoire observé. Elle décrit la forme d'un signal temporel comme une superposition de composantes de formes simples.

L'analyse spectrale est considérée comme un élément primordial dans le traitement du signal, Un signal est une fonction du temps (et de paramètres d'intérêt) véhiculant une information (pertinentes au sens de l'observateur). (**Fleury, 2001**)., 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**)., Cette analyse permet aussi 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**).

Alors on pourrait définir l'analyse spectrale comme toute méthode permettant de caractériser le contenu spectral d'un signal particulier, et ce à l'aide d'un nombre fini d'observation. (Fleury, 2001), et on peut étendre cette étude sur les signaux issus des marégraphes numériques, entre 1950-1960, les travaux de Rice (1944-1945) dans le traitement des signaux ont été étendus pour l'étude des vagues marines (Phillips, 1977). , cela afin d'extraire leurs caractéristiques pour avoir des informations sur le phénomène des variations et l'élévation du niveau de la mer.

1-1) Analyse spectrale avec la transformée de Fourier rapide (FFT) :

La série de Fourier est une représentation des signaux périodiques. Un signal périodique $s(t)$ de période $T_0=1/f_0$ peut être décomposé en une somme infinie de fonctions sinusoïdales et cosinusoïdales dites *harmoniques* de fréquence $f_0, 2f_0, 3f_0, \dots, nf_0, \dots$ multiples de la fréquence fondamentale f_0 (décomposition en série de Fourier). (MEZARI Rezak, 2006). On aura ainsi :

$$s(t) = \sum_{N=0}^{N=+\infty} A(n). \cos(2N n f_0 t) + \sum_{N=0}^{N=+\infty} B(n). \sin(2N n f_0 t) \dots \dots \dots \text{(II-2)}$$

Série de Fourier en notation *réelle*

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} A(0) = 1/T_0 \int_0^{T_0} S(t) dt \dots \dots \dots \text{(II-3)} \\ B(n) = 2/T_0 \int_0^{T_0} S(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt \dots \dots \dots \text{(II-4)} \\ A(n) = 2/T_0 \int_0^{T_0} S(t) \cos (2\pi n f_0 t) dt \dots \dots \dots \text{(II-5)} \end{array} \right.$$

La décomposition en série de fourier est un outil simple et pratique pour trouver le spectre d'un signal périodique (sinusoïdal ou cosinusoidal).on peut écrire la série de fourier de la manière suivante :

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + A_2 \sin\left(\frac{4\pi t}{T}\right) + \dots + A_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \dots \dots \dots \text{(II-6)}$$

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 $F_n = n/T$

Intérêt de la transformée de Fourier :

Les fonctions sinus et cosinus se dérivent facilement, les traitements mathématiques sont donc plus faciles sur les spectres que sur le signal lui-même.

Le signal décomposé laisse souvent apparaître des composantes fréquentielles d'amplitudes très inégales. En ne conservant que les composantes essentielles, on peut reconstituer le signal sans trop d'erreurs avec très peu de composantes.

a) Les paramètres de la FFT :

➤ Fréquence d'échantillonnage : F_e

La fréquence d'échantillonnage est le nombre d'échantillons par unité de temps. Exprimé en Hertz [Hz] .Celle-ci est la cadence à laquelle le signal est regardé par l'analyseur.

➤ Règle d'échantillonnage de Shannon :

Le choix de la fréquence d'échantillonnage pour un signal donné est une étape très importante dans notre étude. Seuls les signaux dont le contenu fréquentiel est strictement inférieur à la fréquence d'échantillonnage peuvent être analysés correctement (**Durnerin, 1999**). 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. (**Muller, 2002**).

Pour numériser convenablement un signal, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit au moins deux fois supérieure à la fréquence du signal à numériser. (**Adnet, 1990**).

$$f_s \geq 2f_{max} \dots\dots\dots(\text{II-7})$$

➤ **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).

b) Efficacité de l'algorithme de la FFT :

La DFT (transformée de fourrier discrète) et la FFT sont deux méthodes utilisées pour produire l'analyse de fréquence des signaux périodiques.

La DFT est une méthode complexe, la DFT revient à calculer un produit matrice-vecteur où chaque élément est de type complexe. La complexité de calcul de la DFT est donc de : N^2 multiplications et $N(N-1)$ additions sur des nombres complexes. (**Atoub, 2013**).

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. (**Allen, 1997**).

1-2) Estimation de l'énergie spectrale par la méthode de WELCH :

a) 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. (**Clark, et Mullis, 1993**). Cette fonction va nous donner les variations de l'énergie spectrale en fonction de la fréquence.

La densité spectrale d'énergie est donnée par :

$$S_x(v) = |X(v)|^2 \dots \dots \dots (\text{II-8})$$

En unité du signal au carré par hertz.

Pour notre cas, nous utilisons la méthode de pwelch pour calculer la densité spectrale de puissance de signal d'entrée.

b) La fenêtre spectrale :

Tous les estimateurs de type Fourier ont des caractéristiques communes. La principale caractéristique est celle de la notion de fenêtre spectrale (**Durnerin, 1999**). De nombreuses fenêtres de pondération ont été proposées pour l'analyse spectrale. ces fenêtres sont utilisées pour limiter la durée temporelle de signal $x(t)$ à analyser. (**Baudoin et Bercher, 1998**). En notant $x(t)$ le signal $F(t)$ la fenêtre, $x_{tr}(t)$ le signal tronqué, on obtient la relation suivante :

$$x_{tr}(t) = x(t) F(t) \dots \dots \dots (\text{II-9})$$

Et dans le domaine fréquentiel :

$$X_{tr}(f) = X(f)F(f) \dots \dots \dots (\text{II-10})$$

c) Définition de Pwelch (périodogramme de Welch) :

Considérons un signal x_n , observé sur une plage temporelle discrète $[0, N-1]$. le périodogramme consiste à calculer la transformée de fourier de cette réalisation du signal, soit $X(f)$, à en prendre le module, puis à le rendre homogène à une densité de puissance. (**Fleury, 2001**). Cette méthode va apporter des modifications au signal traité. Afin d'améliorer l'estimation de la DSP. (**Durnerin, 1999**).

Ci-dessus on a défini le périodogramme d'une manière générale, en ce qui concerne le périodogramme de Welch afin d'améliorer les performances du périodogramme, Welch (1967) a proposé une variante produisant ainsi un ensemble de périodogrammes modifiés qui sont moyennés.

d) Estimateur de WELCH :

Welch proposa deux modifications à la méthode de Bartlett, L'estimateur de Welch, présenté en 1967, n'est qu'une généralisation de l'estimateur de Bartlett. Il rajoute simplement la possibilité d'utiliser des tranches recouvrantes et multiplie chaque tranche

par une fenêtre de pondération afin de maîtriser les lobes secondaires des périodogrammes élémentaires. (Fleury, 2001).

Cette procédure, met en œuvre un moyennage d'observations successives. L'apport de cette méthode est de calculer un périodogramme modifié par l'ajout d'une fenêtre de pondération sur les séquences de L échantillons. (Ollivier, 2014). En effet, on peut résumer la méthode de Welch par le schéma suivant:

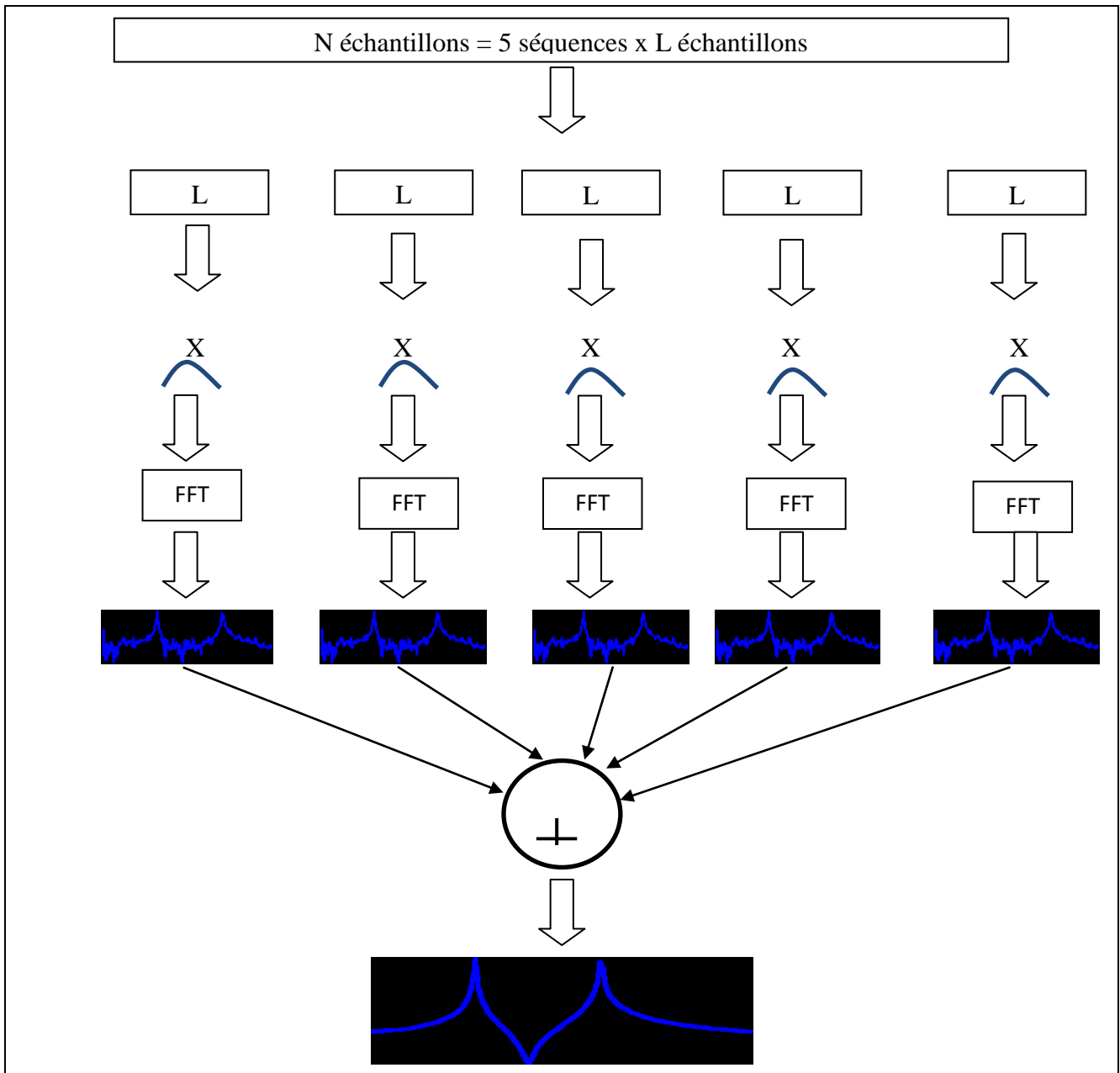


Figure17 : Schéma de la procédure de Welch

➤ **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.

1-3) Filtrage numérique du signal :

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.

2) Le logiciel Matlab :

MATLAB est un système interactif de programmation scientifique, pour le calcul numérique et la visualisation graphique, basé sur la représentation matricielle des données. Le nom dérive de cette représentation : MATLAB = MATrix LABoratory. (**Petrenko, 2004**).

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**).

Matlab peut aussi être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques.

Il est largement utilisé par la communauté océanographique dans le monde. Vous pourrez trouver de larges boîtes à outils de programmes océanographiques.

❖ 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.

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

- Command Window
- Edit Window
- Fenêtres des figures

3) Le logiciel R :

3-1) Définition :

R est un clone gratuit du logiciel S-Plus commercialisé par Math Soft et développé par Statistical Sciences autour du langage S (conçu par les laboratoires BELL). **(Maumy et Bertrand, 2009)**. R est un langage de programmation interactif interprète et orienté objet contenant une très large collection de méthodes statistiques et des facilités graphiques importantes. **(Marin, 2006)**. R est un logiciel de développement scientifique spécialisé dans le calcul et l'analyse statistique. Et un projet open source (projet GNU). **(Chiquet, 2012)**. Il permet de faire des analyses statistiques et de produire des graphiques. Mais R est également un langage de programmation complet, c'est cet aspect qui fait que R est différent des autres logiciels statistiques. **(Bertrand, 2013)**.

3-2) Présentation du logiciel:

L'application Rgui.exe forme une interface utilisateur simple pour l'environnement R. Elle est structurée autour d'une barre de menu et de diverses fenêtres.

Les menus sont très peu développés. Leur objectif est de fournir un raccourci vers certaines commandes parmi les plus utilisées. **(Marin, 2006)**.

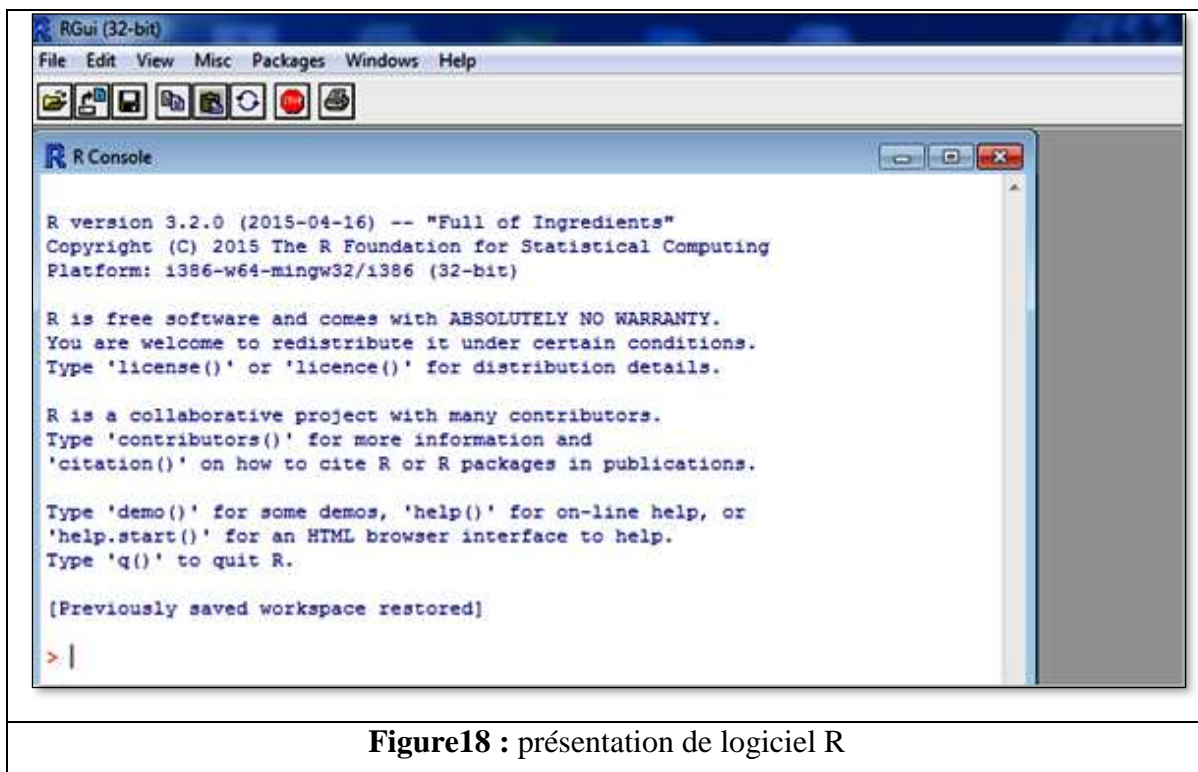


Figure18 : présentation de logiciel R

R fonctionne avec plusieurs fenêtres sous Windows. En particulier nous distinguons la fenêtre R console, c'est à-dire la fenêtre principale où sont réalisées par défaut les entrées de commandes et sorties de résultats en mode texte. À celle-ci peuvent s'ajouter un certain nombre de fenêtres facultatives telles que les fenêtres graphiques et les fenêtres d'informations (historique des commandes, aide, visualisation de fichiers, . . .), toutes appelées par des commandes spécifiques via la console.

- Le menu File contient les outils nécessaires à la gestion de l'espace de travail, tels que la sélection du répertoire par défaut, le chargement de fichiers sources externes, la sauvegarde et le chargement d'historiques de commandes, etc...
- Le menu Edit contient les habituelles commandes de copier-coller, ainsi que la boîte de dialogue autorisant la personnalisation de l'apparence de l'interface.
- Le menu Misc traite de la gestion des objets en mémoire et permet d'arrêter une procédure en cours de traitement.
- Le menu Packages automatise la gestion et le suivi des bibliothèques de fonctions, permettant leur installation et leur mise à jour de manière transparente au départ du site CRAN (Comprehensive R Archive Network) :

<http://cran.r-project.org/>

- Enfin, les menus Windows (ou Fenêtres) et Help (ou Aide) assument des fonctions similaires à celles qu'ils occupent dans les autres applications Windows à savoir la définition spatiale des fenêtres et l'accès en ligne et aux manuels de références du logiciel R.

En ce qui concerne la fenêtre R console:

- Ce qui est entré par l'utilisateur figure en rouge et la réponse de R est en bleu.
- Les nombre entre crochets au début de chaque ligne donnent l'indice du premier nombre de la ligne.

3-3) Fonctionnement de logiciel R :

D'abord, R est un langage interprété et non compilé (**Paradis, 2005**). , c'est-à-dire que les commandes tapées au clavier sont directement exécutées sans qu'il soit besoin de construire un programme complet comme cela est le cas pour la plupart des langages informatiques.

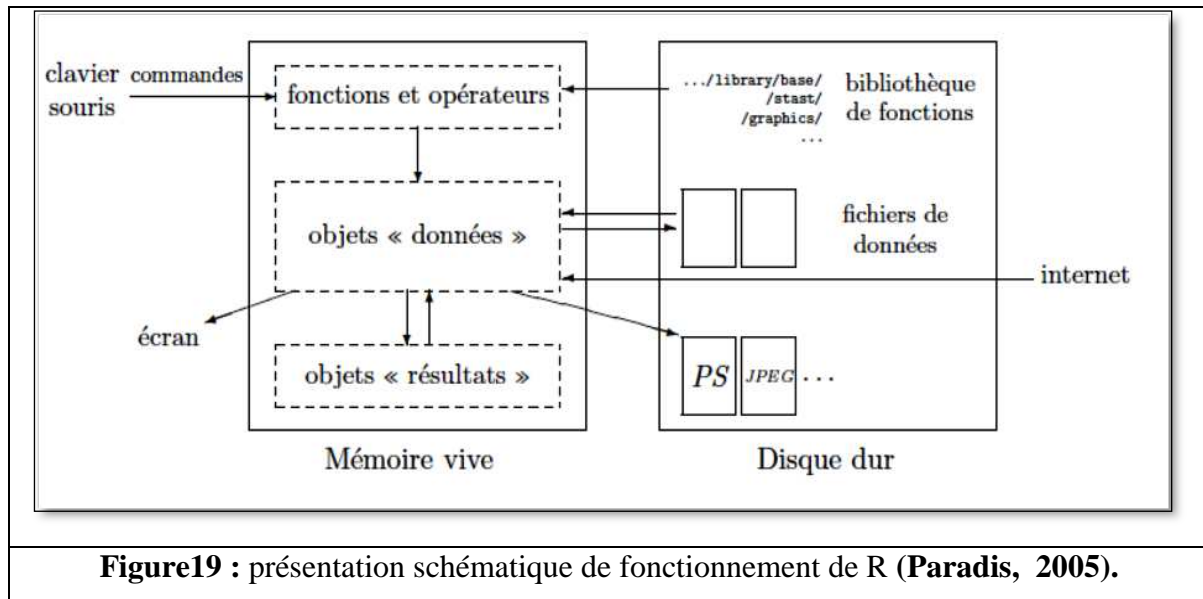
Avec R, une fonction, pour être exécutée, s'écrit toujours avec des parenthèses, même si elles ne contiennent rien, les noms des fonctions sont généralement écrits avec des parenthèses pour les distinguer des autres objets.

Quand R est utilisé, les variables, les données, les fonctions, les résultats, etc, sont stockés dans la mémoire de l'ordinateur sous forme d'objets qui ont chacun un nom. L'utilisateur va agir sur ces objets avec des operateurs et des fonctions (qui sont elles mêmes des objets).

Les objets R se différencient par leur mode, qui décrit leur contenu, et leur classe, qui décrit leur structure. Les objets atomiques sont de mode homogène et les objets récurifs sont de mode hétérogène. (**Marin, 2006**).

- Les différents modes sont :
 - Null (objet vide), logical, numeric, complex, character
- Les principales classes d'objets sont :
 - Vector, matrix, array, factor, time-series, data.frame, list

Toutes les actions de R sont effectuées sur les objets présents dans la mémoire vive de l'ordinateur, L'utilisateur exécute des fonctions par l'intermédiaire de commandes. Les résultats sont affichés directement à l'écran, ou stockés dans un objet, ou encore écrits sur le disque. Les fichiers de données peuvent être lus sur le disque de l'ordinateur local ou sur un serveur distant via internet.



Les fonctions disponibles sont stockées dans une bibliothèque localisées sur le disque dans le répertoire R HOME/Library (R HOME désignant le répertoire où R est installé). Ce répertoire contient des packages de fonctions, eux-mêmes présents sur le disque sous forme de répertoires. (Andruccioli, 2006). Le package nommé base est en quelque sorte le cœur de R et contient les fonctions de base du langage, en particulier pour la lecture et la manipulation des données.

4) Méthodologie utilisée dans cette étude :

4-1) Objectif du travail :

L'objectif de notre travail il s'agit dans une première phase d'aborder les différentes méthodes permettant l'étude des signaux :

- analyse spectrale avec la transformée rapide de fourier
- estimation de l'énergie spectrale par la méthode de WELCH
- filtrage numérique du signal du niveau de la mer

Dans une deuxième phase, on va réaliser un programme informatique à l'aide de langage R qui permettra de traiter un signal issu d'un marégraphe avec les méthodes citées précédemment.

Pour montrer le fonctionnement et les limites du programme qui sera réalisé les données a traitées sont choisis aléatoirement.

4-2) Source des données :

La source des données est un site internet « <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/> » de la COI, c'est un service qui a été développé à partir d'une collaboration entre l'institut marin de la Flandre (VLIZ), les États-Unis d'Amérique et le projet d'ODINAFRICA d'IODE. Au début le service a été conçu pour la surveillance opérationnelle des stations de mesures 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.

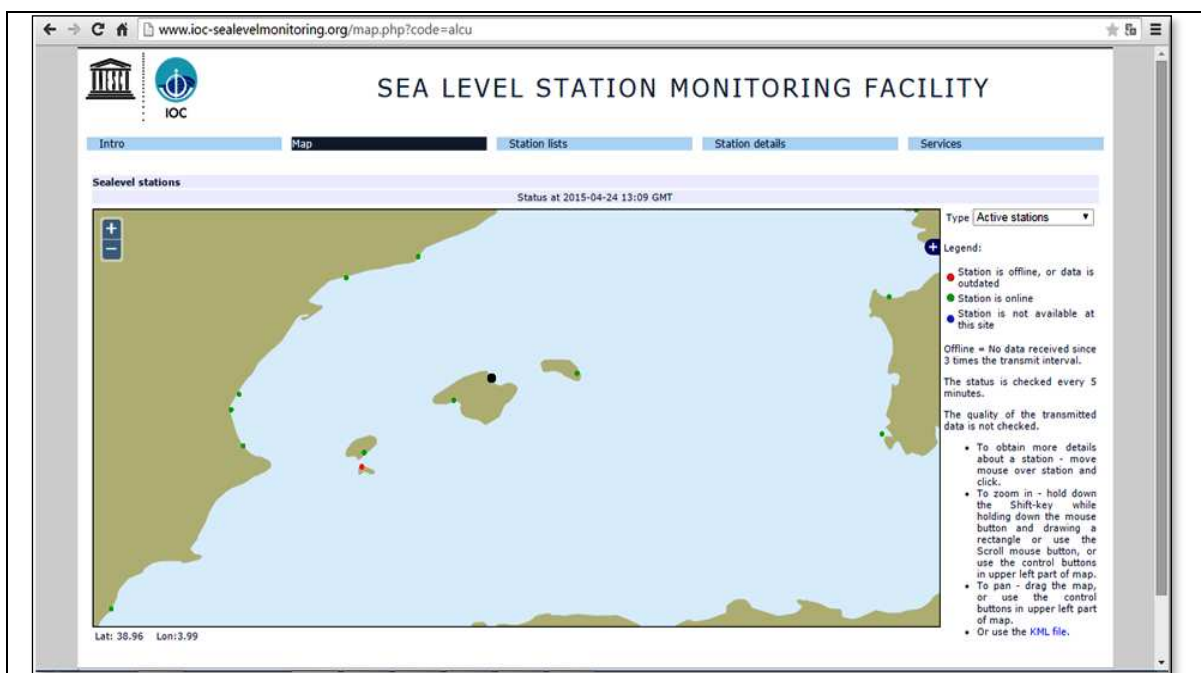


Figure 20 : présentation de site source de données et de la station Acudia (point noir)

4-3) Traitement et analyse des données (signal du niveau de la mer) :

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 basé à Alcudia une commune d'Espagne de l'île de Majorque, durant la période comprise entre 10/03/2015 22:24 et 09/04/2015 23:17. 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 le faire, nous avons utilisé des logiciels optimisés pour ce type de traitement (MATLAB et R, SIGVIEW).

4-3-1) Estimation de l'énergie spectrale par la méthode de Welch :

4-3-1-1) 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/nacer/Workmatlab'.

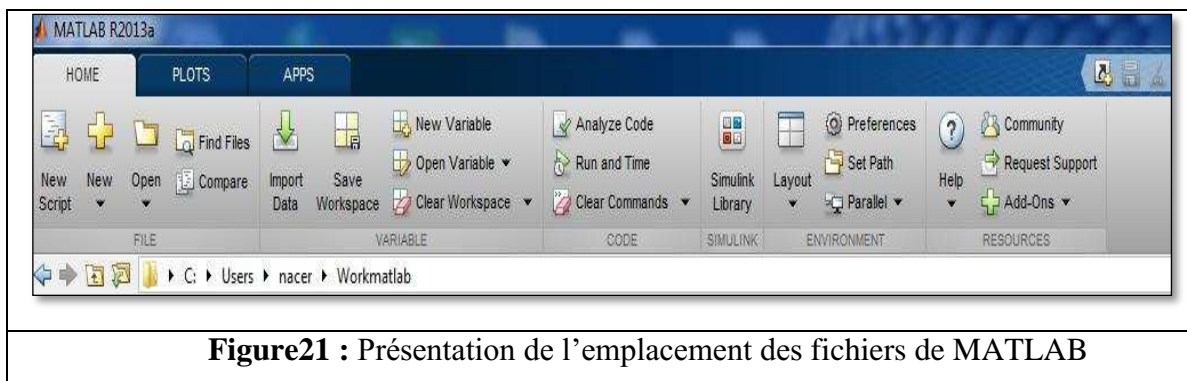
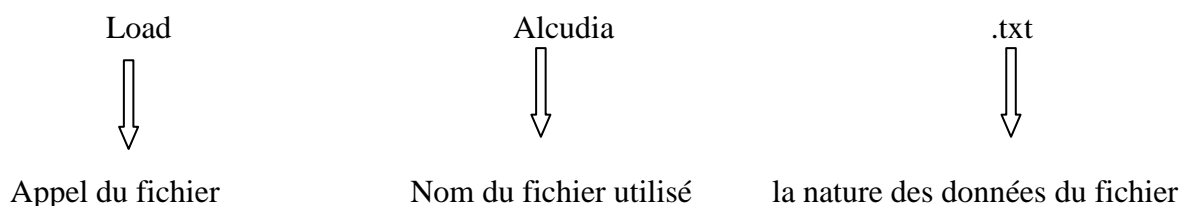


Figure21 : Présentation de l'emplacement des fichiers de MATLAB

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 : $X = \text{Alcudia}(:,1)$;

X : représente la hauteur du niveau de la mer

Alcudia: Le nom du fichier dans le fichier

1 : la colonne que prend x

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 Alcudia.txt
x=Alcudia(:,1);
fs=0.016;
n = length(x)
[Pxx,F] = pwelch(x,500,250,n,fs)
loglog(F,Pxx)
```

Où :

- **Alcudia** : 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 1ère colonne du tableau des données.
- **Fs** (Sampling frequency) : La fréquence d'échantillonnage en (Hz).
- **N** : nombre de point FFT
- **[Pxx,F]**:le spectre de pwelch
- **Pwelch** : type de spectre
- **500** : la valeur de la fenêtre ou window
- **250** : la valeur de recouvrement ou de Noverlap

- **Loglog (f,pxx)** : Correspond à la représentation logarithmique des amplitudes ou des densités spectrales de puissance (pxx) en fonction des fréquences (f).

Après avoir défini la méthode que nous allons utiliser, nous ouvrons ensuite l'espace Editeur pour taper notre code.

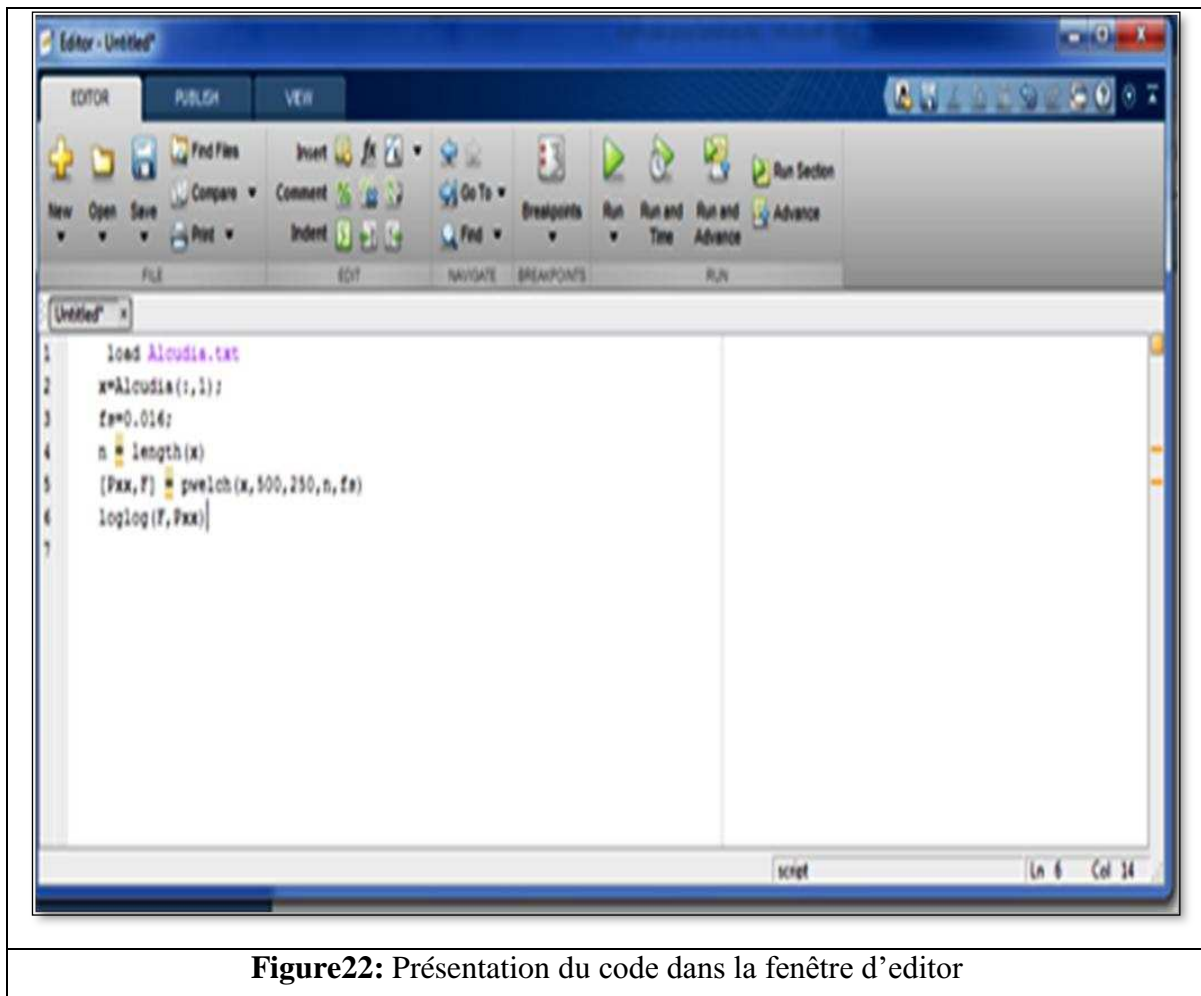


Figure22: Présentation du code dans la fenêtre d'editor

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 :

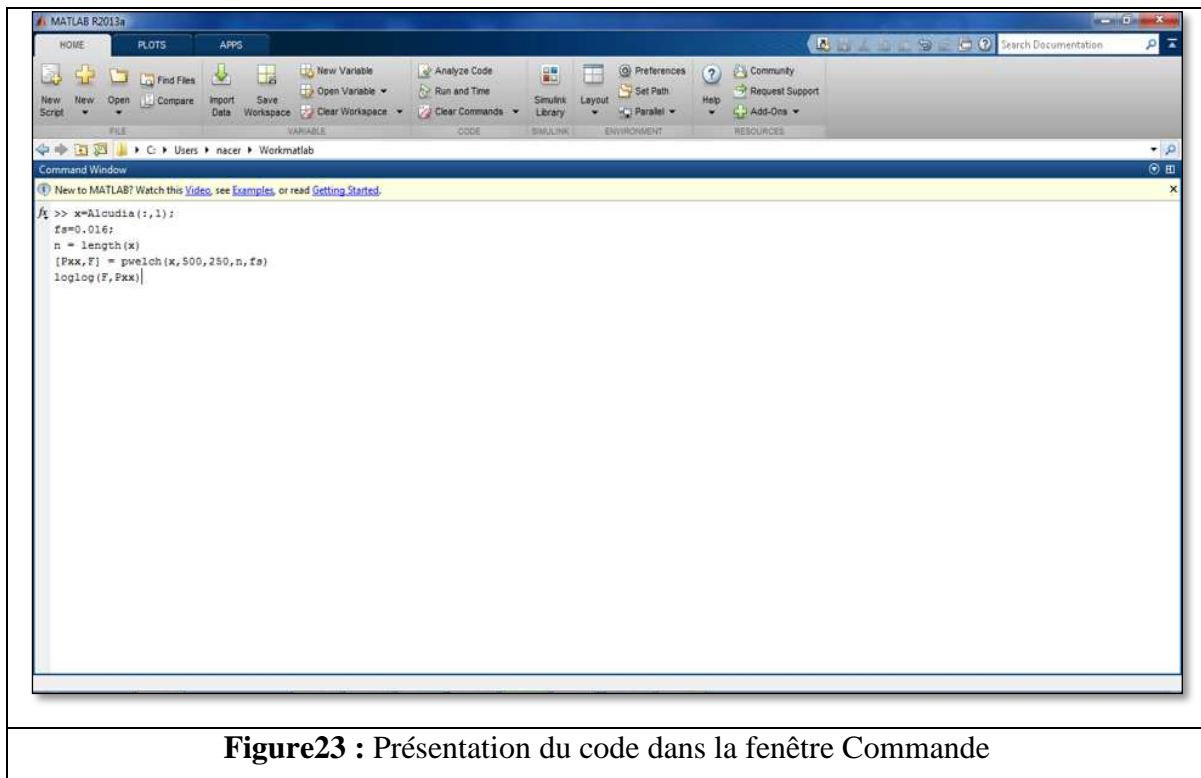


Figure23 : Présentation du code dans la fenêtre Commande

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

4-3-1-2) La procédure utilisée dans le logiciel R :

Il est nécessaire d'indiquer au logiciel R l'endroit où sont stockés les fichiers de données.

Pour connaître le répertoire de travail actuellement utilisé par R, qui est par défaut le répertoire où le logiciel est installé, il suffit de taper l'instruction suivante :

```
>getwd ()
```

```
[1] "C:/Users/nacer/Work R"
```

Les données sont stockées dans un dossier créé préalablement, nommé Work R où le logiciel est installé.

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

➤ **Signal brut de niveau de la mer:**

Premièrement on va programmer un langage qui permet de représenter nos données en fonction de temps, c'est-à-dire le signal brut du niveau de la mer.

```
read.table("Alcudia.txt")
x<-read.table("Alcudia.txt")
x <- ts(x, start=0, end =37330*60, frequency = 1/60,deltat=60)
plot(x)
```

-L'instruction « read.table » permet de lire les données dans le logiciel

- L'instruction « x<-read.table » permet de conserver la table comme un objet

-la fonction ts permet de créer des séries temporelles

- L'instruction « plot(x) » permet de représenter graphiquement les données

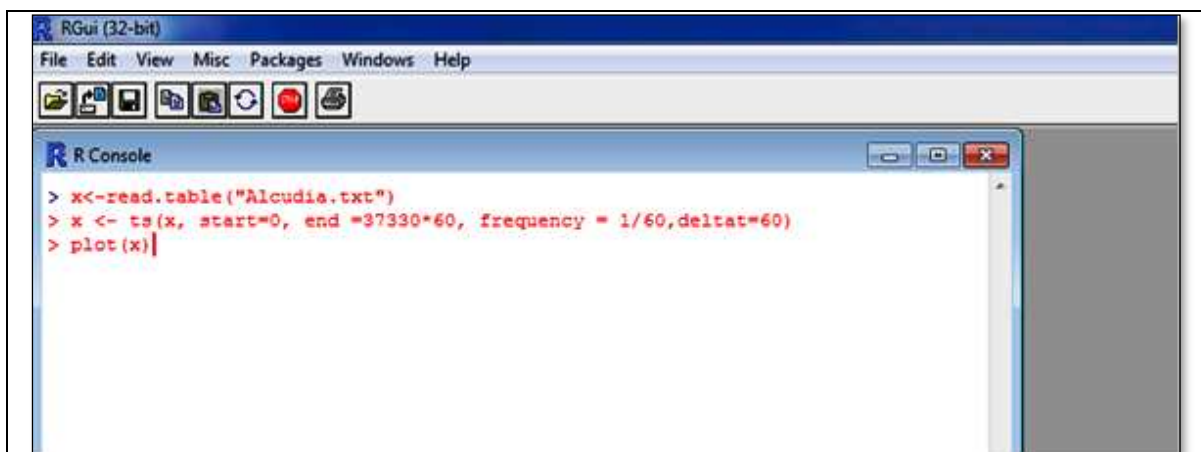


figure24: Présentation du code du signal brut dans la fenêtre R Console

Pour savoir les caractéristiques (moyenne, médiane, minimum,...etc) de nos données il suffit de taper l'instruction suivante :

```
summary(x)
```

➤ **Estimation de la densité spectrale par la méthode de Welch :**

Le langage de programmation qui permet de représenter la densité spectrale par la méthode de Welch est le suivant :

```
x<-read.table("Alcudia.txt")
x<- ts(x, start=0, end =37330*60, frequency = 1/60,deltat=60)
# calculer et tracer le spectre "plat" :
spec1<-empiricalSpectrum(x)
plot(spec1$frequency, spec1$power, log="y", type="l")
# tracer le spectre de Welch en utilisant des segments des secondes de la longueur
250MIN(15000secondes) :
N<-length(x)
spec2<-welchPSD(x, seglength=15000,N,r=1)
lines(spec2$frequency, spec2$power, col="red")
```

Utilité de chaque fonction:

-la fonction ts permet de créer des séries temporelles, Il y a 05 arguments principaux :

- data : les données décrivant la série temporelle (x)
- start : le temps de départ (0)
- end : le temps de fin (37330*60)
- frequency : la fréquence d'échantillonnage ou le nombre d'observations par unité de temps (1/60)
- deltat : la période entre deux observations successives (60)

-la fonction « empirical Spectrum » permet de calculer la puissance empirique (la puissance spectrale) d'une série temporelle par la transformée discrète de fourier.

-l'instruction "plot(spec1\$frequency, spec1\$power, log="y", type="l")" permet de représenter le spectre de la puissance spectrale en fonction de la fréquence.

-la fonction « welchPSD » : pour estimer la densité spectrale de puissance des séries chronologiques en utilisant la méthode de Welch, c'est à dire, en subdivisant les données dans des segments, ensuite on va calculer le spectre de chacun, et faisant la moyenne.

-l'instruction «lines» permet de tracer la densité spectrale de puissance en fonction de la fréquence estimée par la méthode de Welch.

Les données introduites :

- **Alcudia**: le nom de fichier des données dans l'espace du travail

-**.txt**: la nature des données dans le fichier

-**x** : le nom de fichier des données lues par le logiciel R(x le nom des données après la conservation comme un objet dans la mémoire de logiciel) qui représente les variations du niveau de la mer en fonction de temps.

-**N** : nombre total des échantillons

-**seglength** : la longueur des segments de recouvrement (dans des unités de temps)

- **r=1**: le type de la fenêtre (hannwindow, r=1)

-**col="red"**: c'est la couleur de représentation graphique (le rouge)

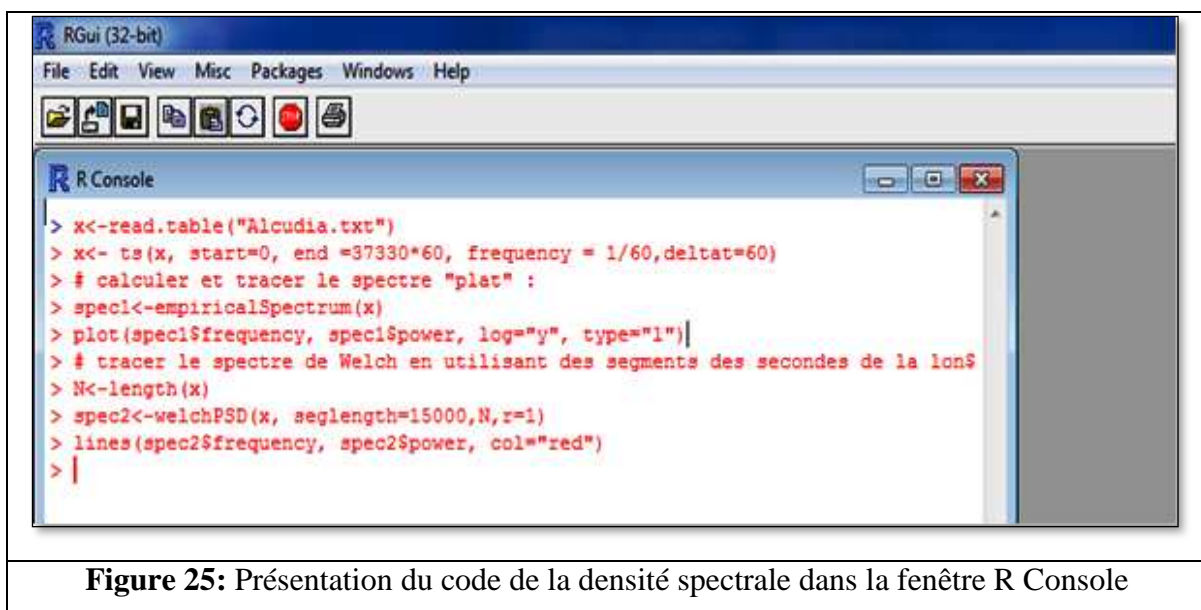


Figure 25: Présentation du code de la densité spectrale dans la fenêtre R Console

Pour exécuter chaque instruction il suffit d'appuyer sur Entrée, les commandes tapées au clavier sont directement exécutées sans qu'il soit besoin de construire un programme complet.

4-3-2) filtrage numérique de signal

En premier lieu, et à l'aide du logiciel SIGVIEW nous avons tracé le graphe qui représente les fluctuations du niveau de la mer au cours du temps, il suffit d'ouvrir le fichier des données, ensuite introduire la fréquence d'échantillonnage.

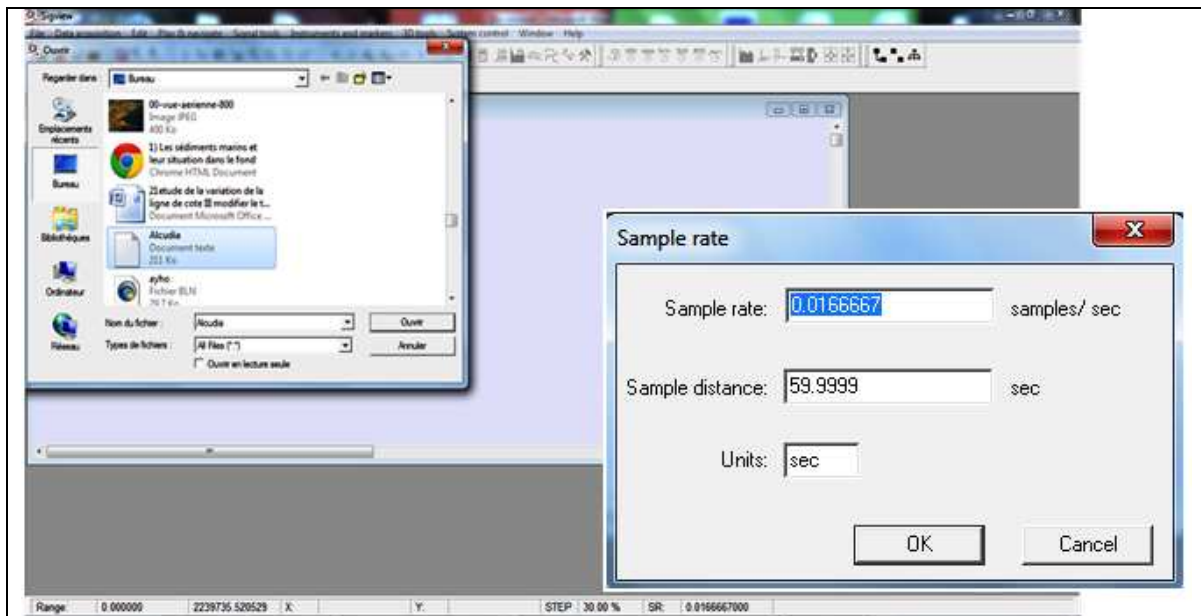


Figure 26 : présentation de la procédure d'importation des données dans SIGVIEW

Ensuite pour filtrer le signal importé, nous procédons à l'analyse de ce dernier en lui faisant subir un filtre band-pass (bande passante). 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.

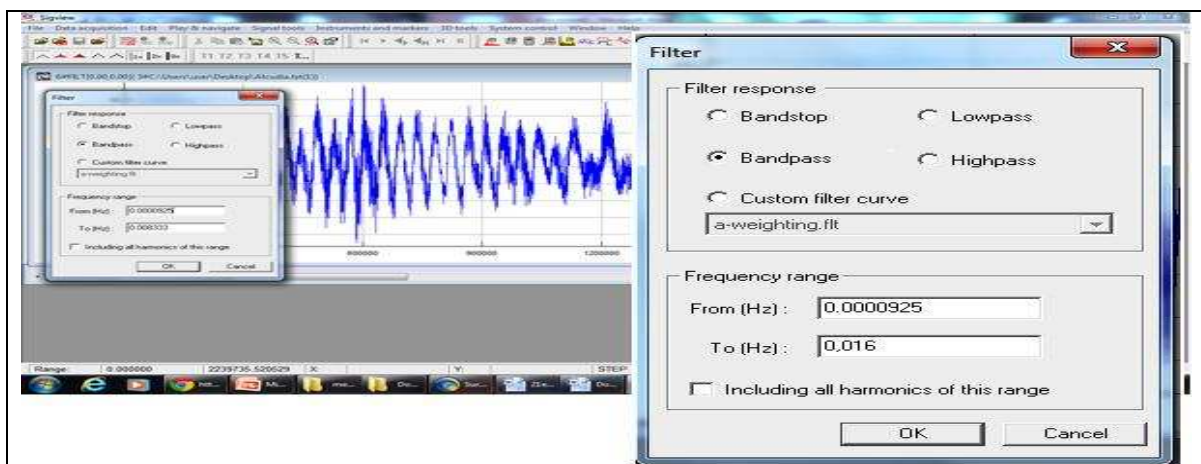


Figure 27 : présentation de la boîte de dialogue du SIGVIEW

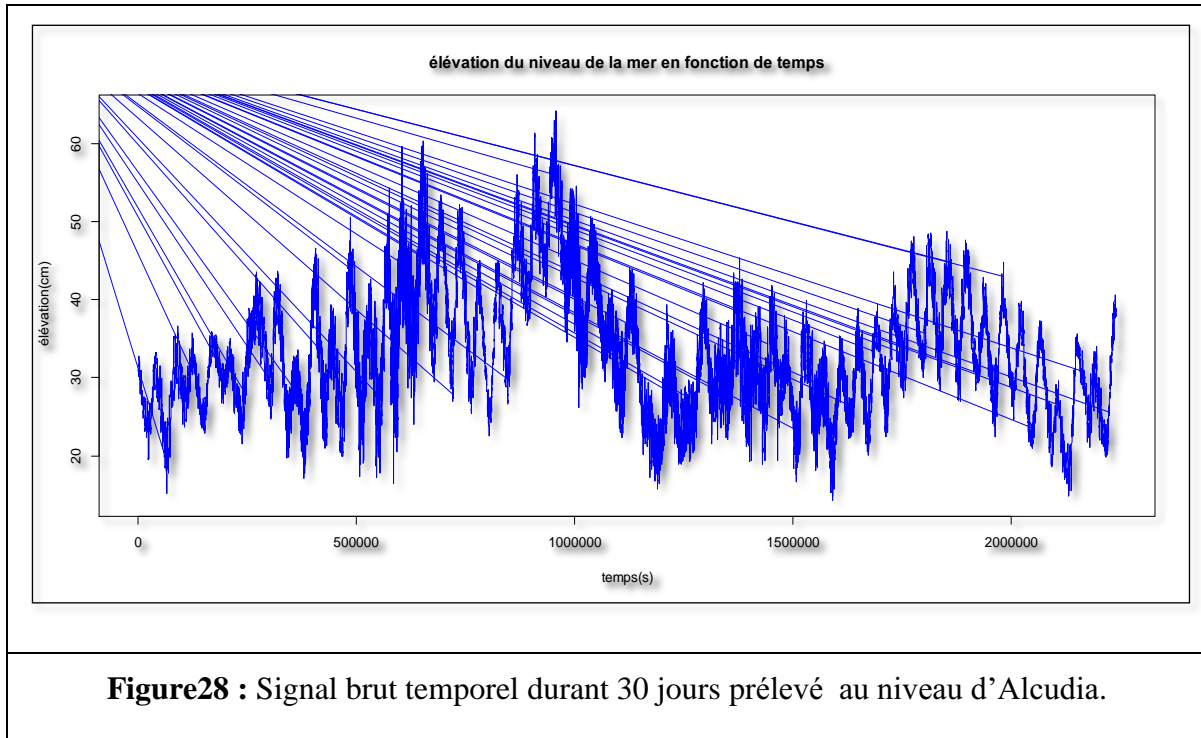
La période de la marée étant comprise entre environ 3h et 24h, avec respectivement, les fréquences de 0.000092 et 0.000011 Hz. Quant à la gamme fréquentielle des autres ondes dues à l'élévation soudaine du niveau de la mer, nous avons retenu celles qui vont de 1 min à 3h, avec respectivement les fréquences de 0.016 et 0.00009 Hz.

Chapitre III

Résultats et Discussions

Cette partie est consacrée à la représentation et l'interprétation des résultats des différents traitements (densité spectrale de puissance et filtrage) effectuées sur nos données (signal brut du niveau de la mer) durant une période de 30 jours.

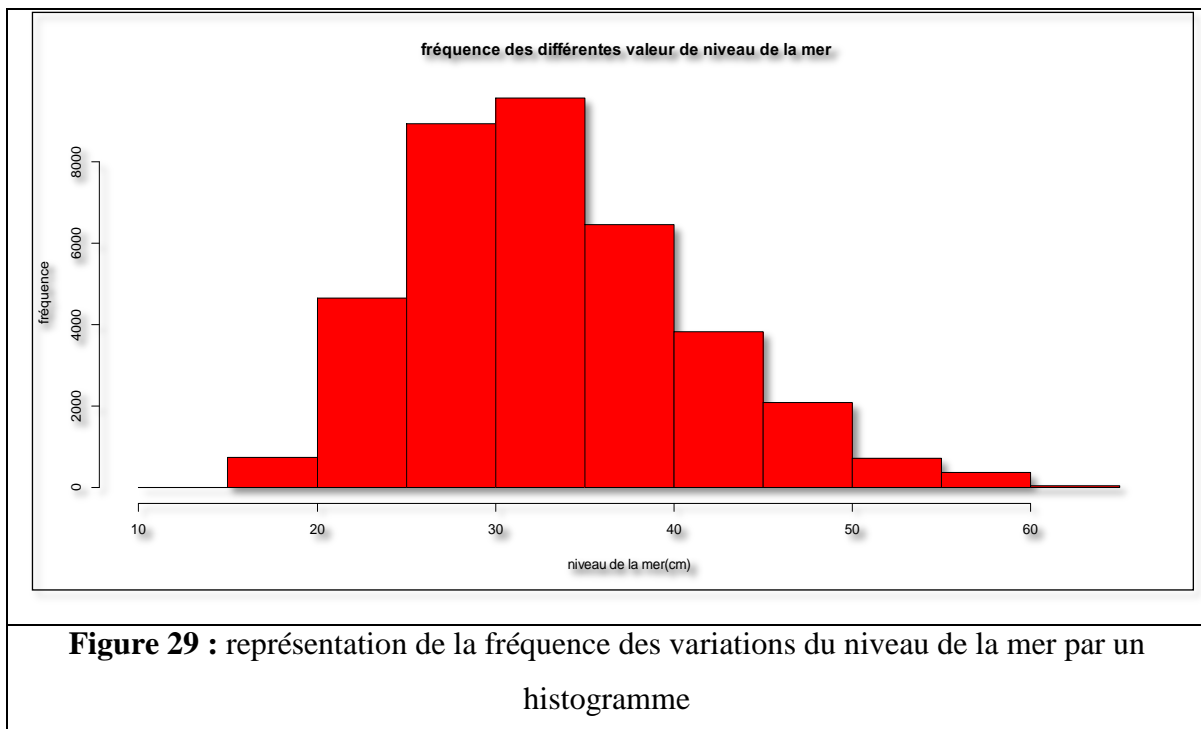
1) signal temporel brut du niveau de la mer



La figure n°28 montre les variations du niveau de la mer mesurées par le marégraphe durant la période qui va du 10/03/2015 jusqu'au 09/04/2015. On peut constater la présence des élévations significatives qui dépassent 50 cm, et arrive jusqu'à 60 cm, ça vers le 20/03/2015. Puis le niveau de la mer baisse et varie entre 25 et 45 cm durant la période entre le 20/03/2015 et 23/03/2015, puis il revient à s'élever et se varie entre 50 et 60 cm, durant la période de 23 et 24/03/2015, là où il va atteindre son maximum.

Durant la période entre le 24/03/2015 et 09/04/2015 le niveau de la mer se varie entre 10 cm et 45 cm.

Pour une meilleure compréhension de signal brut et des variations du niveau de la mer on peut constater la fréquence des différentes valeurs dans le logiciel R par l'instruction suivante : `> hist(x, col="red")`.



La figure n°29 montre la fréquence des variations du niveau de la mer, d'après l'histogramme on peut constater que les variations du niveau de la mer les plus représentatives dans le signal brut sont les variations entre 25 et 40 cm. les variations entre 50 et 60 cm sont des variations à faibles fréquences, les variations les moins contenues dans le signal sont les variations entre 10 et 20 cm.

On peut représenter les différentes caractéristiques statistiques de signal brut par l'instruction suivante : > summary (x).

{

 Min. : 14.30

 1st Qu.:27.50

 Median : 32.10

 Mean : 33.19

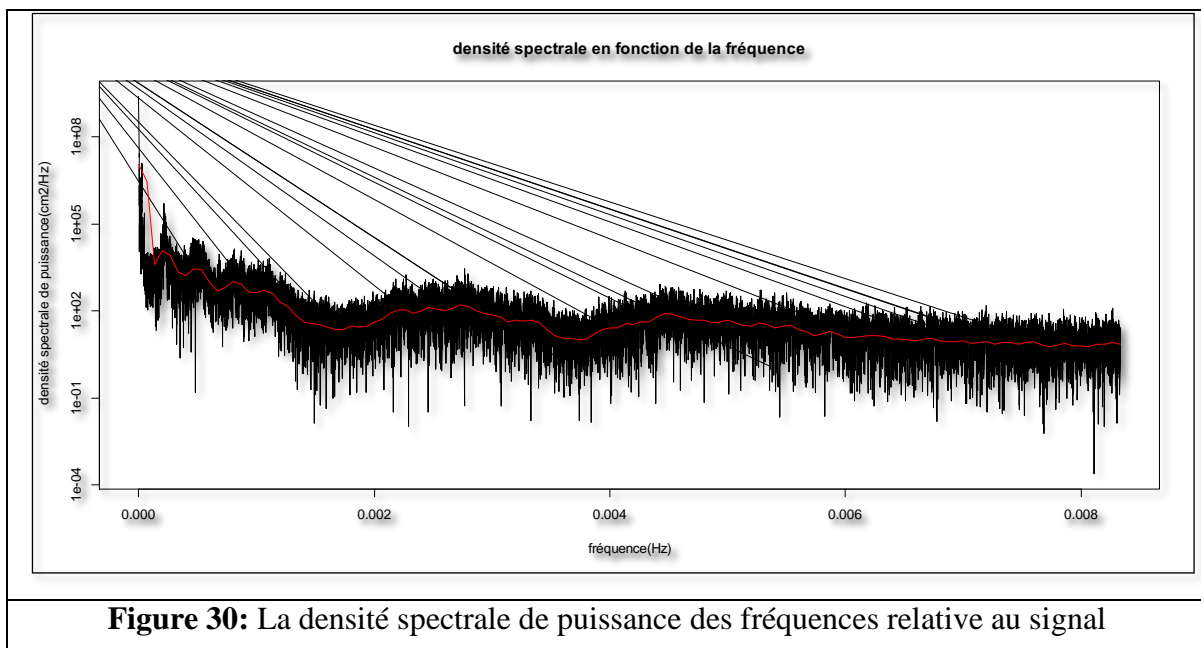
 3rd Qu.:37.90

 Max. : 64.20

La valeur Min : 14.30 représente le minimum des variations du niveau de la mer cette valeur est atteinte le 02/04/2015, le maximum des variations est 64.20 cm cette valeur est atteinte le 24/03/2015, le premier quartile et le troisième quartile, la médiane sont respectivement : 27.50 cm, 37.90 cm et 32.10 cm. la valeur moyenne des variations du niveau de la mer est de 33.19 cm.

L'analyse spectrale et les filtres appliquées au signal nous aideront à comprendre la cause de ces élévations soudaines du niveau de la mer.

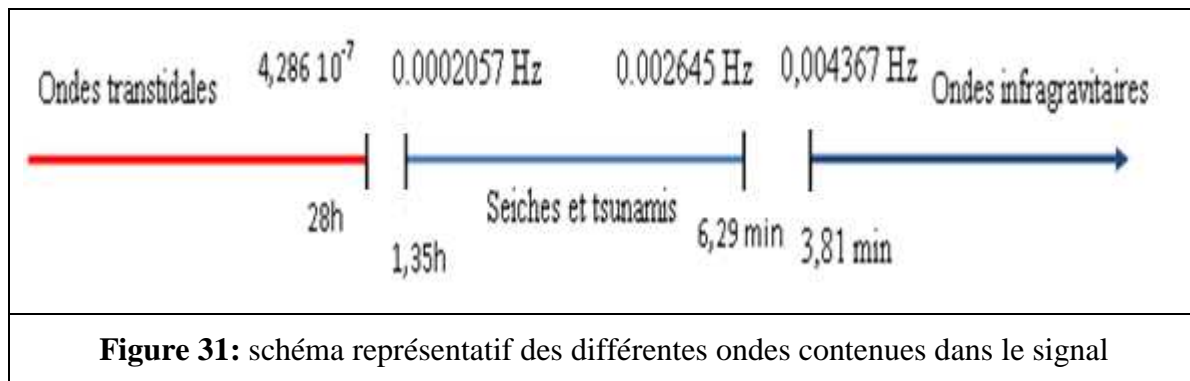
2) Résultats de la densité spectrale de puissance appliquée au signal



Sur la figure n°30, représente la densité spectrale en fonction de fréquence, on constate la présence des différentes ondes marines, avec une dominance d'ondes à basses fréquences (28h) relative aux ondes transtidale et ondes tidale. Mais on constate aussi la présence des ondes marines de hautes fréquences. Ainsi on peut remarquer l'apparition d'autres pics englobant l'intervalle compris entre 0.0002057 Hz soit (1,35h) et 0.002645 Hz correspondant à une période de 6,29 min. Ces fréquences pourraient être induites par les seiches et les météotsunamis. On constate aussi vers les hautes fréquences la présence d'un pic à une fréquence de 0,004367 Hz correspondant à une période de 3,81 min comprise entre 33 secondes et 5 min ce qui explique la présences des ondes infragravitaires

qui pourrait être générées, entre autres, par le battement du point de déferlement des vagues et les oscillations dues aux trains d'ondes. (HEMDANE., 2006).

Pour une meilleure compréhension des résultats de la densité spectrale de puissance appliquée sur notre signal, j'ai réalisé un schéma qui représente les différentes ondes contenues dans le signal.

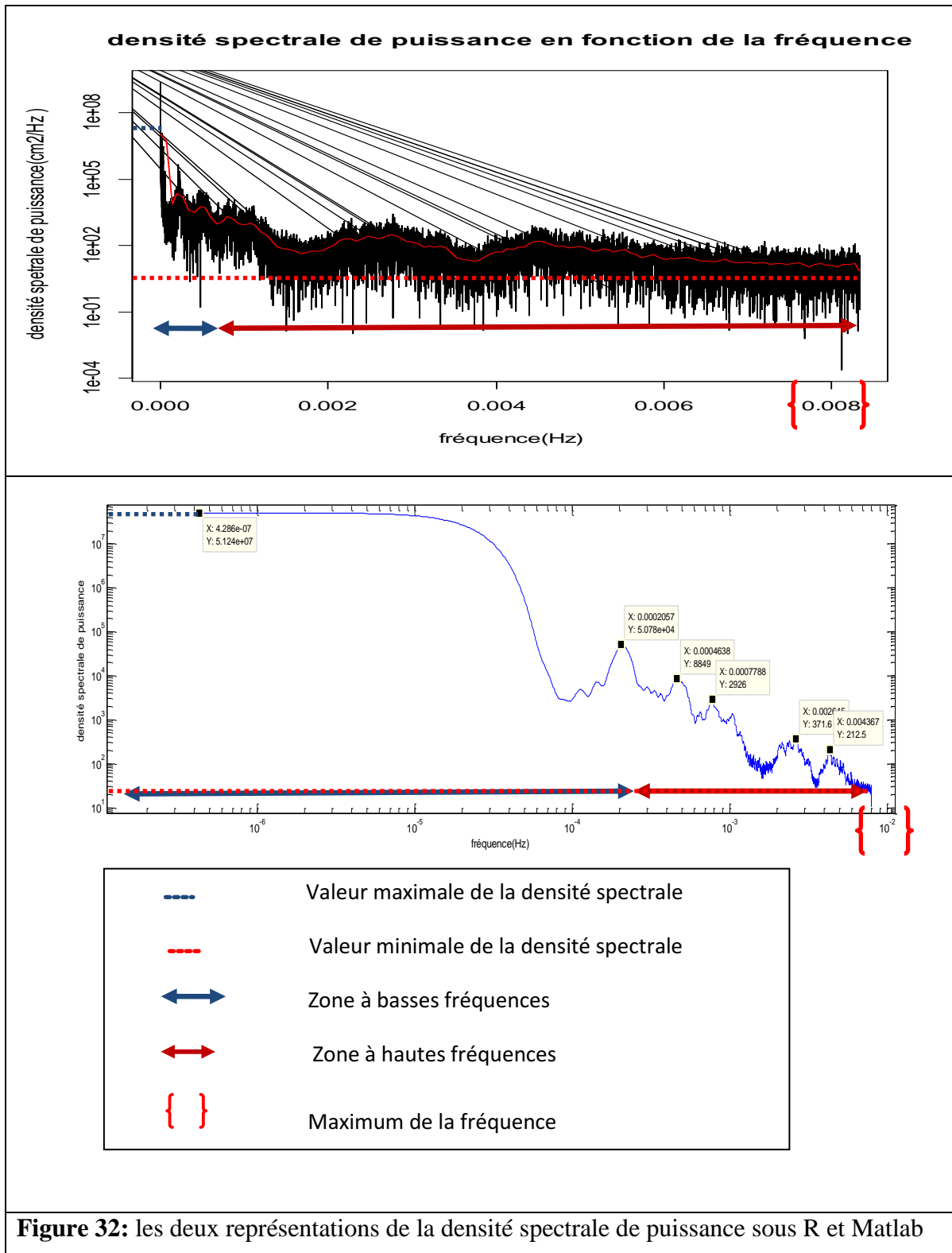


3) Comparaison des deux résultats de la densité spectrale sous R et Matlab

Dans le but de tester l'efficacité de logiciel R de représenter la densité spectrale de puissance, on a calculé cette dernière dans Matlab.

La figure n°32, montre les deux représentations graphiques de la densité spectrale en fonction de la fréquence sous R et Matlab. Les axes qui représentent la densité spectrale dans R et Matlab sont les mêmes, c'est-à-dire la valeur maximale de la densité spectrale est de l'ordre de $\sim 10^8$ et la valeur minimale est de l'ordre de $40 \text{ cm}^2/\text{Hz}$ dans les deux représentations graphiques. En ce qui concerne l'axe des fréquences c'est la même chose puisque la valeur minimale de la fréquence tend vers 0 Hz, et la valeur maximale est de l'ordre de $\sim 0,009 \text{ Hz}$ dans les deux représentations R et Matlab. Les deux représentations montrent 05 pics principaux identiques.

Enfin, la seule différence entre les deux représentations, Matlab offre une représentation plus claire dans l'intervalle des basses fréquences, et le logiciel R montre une meilleure représentation dans l'intervalle des hautes fréquences.



4) résultats des filtres band pass opérés sur le signal temporel

4-1) Filtre band pass entre 4h et 24h

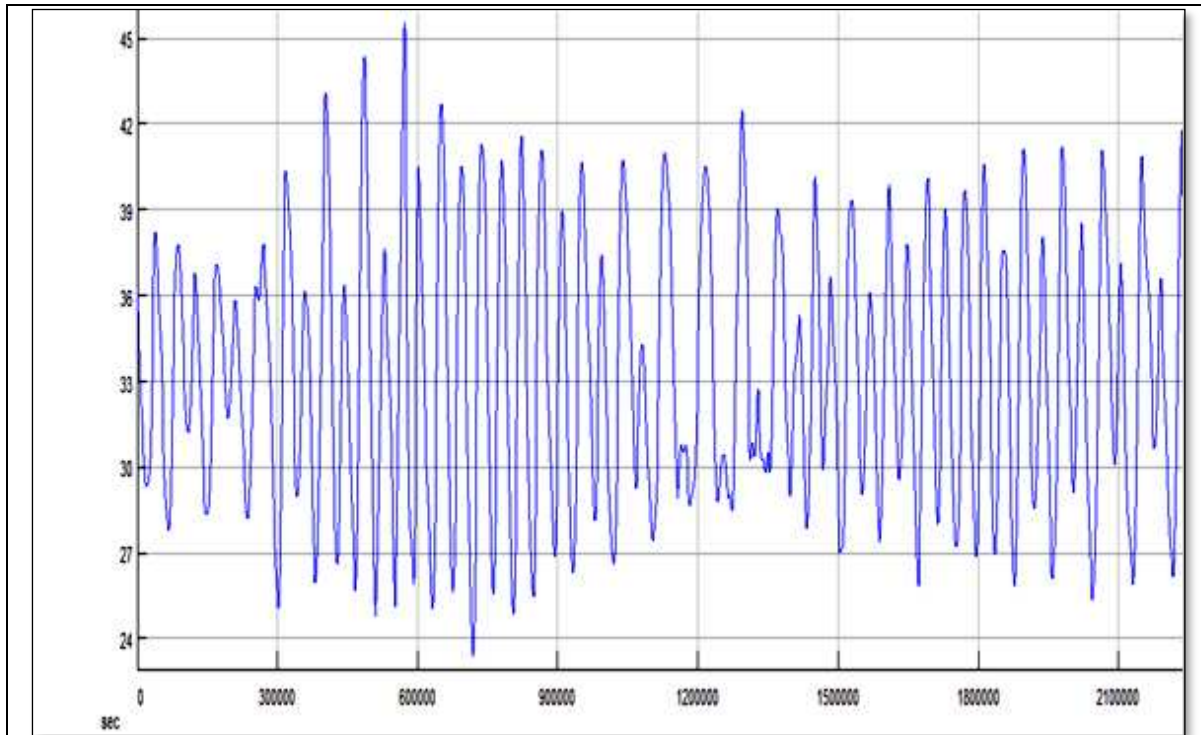


Figure 33: Résultats du filtre band pass entre 3h et 24h appliqué sur le signal

La figure n° 33, illustre les résultats du signal du niveau de la mer filtré par *band pass* entre 3h et 24h et ce, pour la période allant du 10/03/2015 au 09/04/2015. Les hauteurs enregistrées s'échelonnent entre 24 cm et 45 cm.

La marée qui domine notre région d'étude est de type mixte (succession de la marée diurne et semi diurne), avec une hauteur maximal d'ordre de 45 cm et une hauteur minimale de 24 cm, ce qui donne un marnage maximal d'ordre de 21 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 3h pour la marée semi diurne.

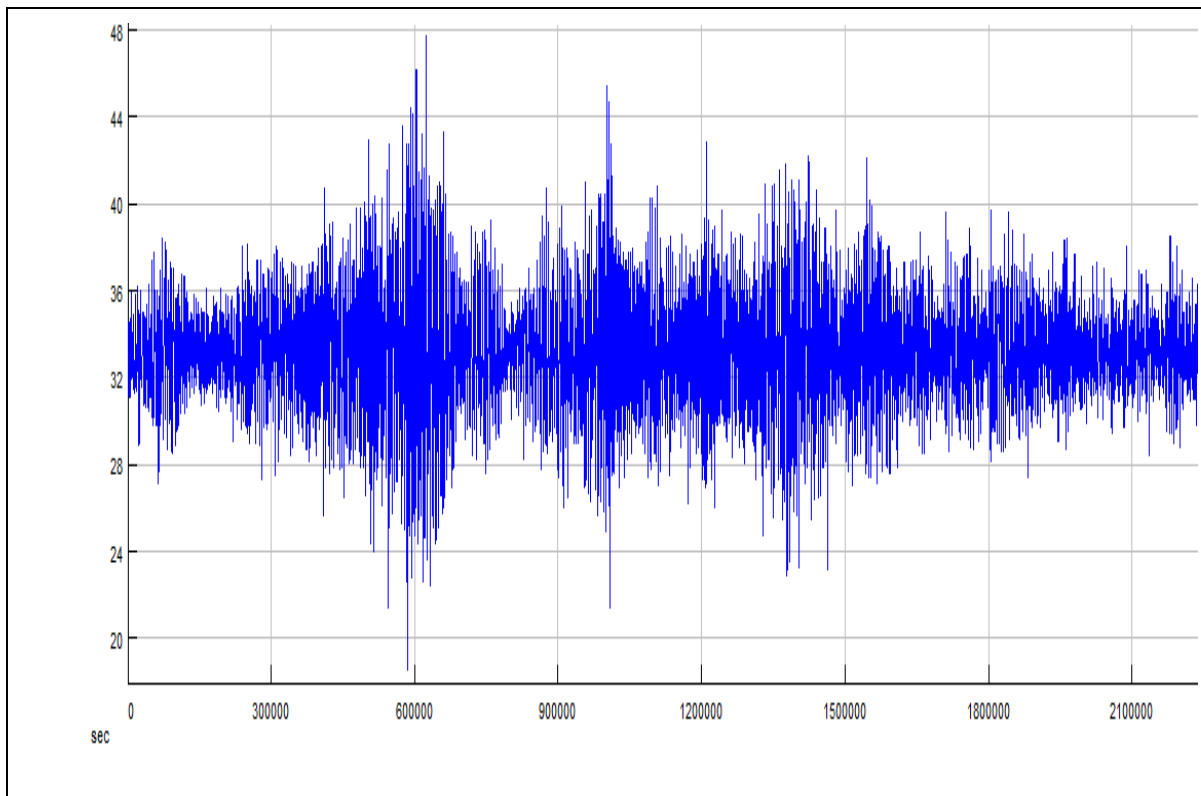
4-1) Filtre band pass entre 1min et 3h

Figure 34: Résultats du filtre band pass entre 1min et 3h appliqué sur le signal

La figure n°34 montre les résultats du filtre bande passante entre 1 min et 3h opéré sur le signal temporel. On y remarque la présence des ondes dont l'amplitude fluctue entre 10 cm et 48 cm. Ces ondes de basses fréquences peuvent provoquer des élévations soudaines du niveau potentiellement à l'origine 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 qui ont été observées dans les fréquences suivantes : 0.0002057 Hz (1,35 heure), 0.0004638 Hz (35.93 min), et 0.002646Hz (6.29 min). Ces fréquences sont propres aux tsunamis et météotsunamis. Cependant, en l'absence de séismes susceptible de générer un tsunami pendant cette période, on peut conclure que ces ondes pourraient être imputées aux perturbations atmosphériques.

Conclusion

Ce travail est une contribution pour déterminer l'importance de l'outil informatique dans la compréhension de phénomène de la hausse soudaine du niveau ainsi essayé de déterminer les différentes oscillations contenues dans le signal brut du niveau de la mer. 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.

La densité spectrales des puissances mis en évidence la présence de pics fréquentiels qui appartiennent aux différentes ondes, ce qui va nous permettre de déterminer la type d'ondes contenues dans le signal, Les résultats des filtres que nous avons appliqués au signal temporel brut ont permis de séparer les différentes ondes contenues dans le signal.

Les résultats des filtres que nous avons appliqués au signal temporel brut ont permis aussi de constater la présence des ondes ont des amplitudes qui peuvent atteindre 40 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. Ainsi, 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 La marée mixte (diurne et semi diurne), avec des amplitudes qui dépassent 45 cm et un marnage d'ordre de 21 cm.

De plus, cette étude vise à montrer l'intérêt de l'outil informatique, afin d'étudier et de comprendre les causes des variations du niveau de la mer, et l'importance de l'utilisation des logiciel autorisés (licenciés ou open source). 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

- 1) **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.
- 2) **Allen, J.B. (1997).** Short-Time Spectral Analysis, Synthesis, and Modification by Discrete Fourier Transform. IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing. pp. 235-238.
- 3) **Andruccioli, B. (2006).** Traitement statistiques et informatique. Utilisation du logiciel R -IUT Bordeaux Montesquieu-Département Tech.37p.
- 4) **Atoub, K. (2013).** optimisation de la FFT à virgule fixe basée sur les algorithmes génétiques, mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières.288p.
- 5) **Baudoin, G. et Bercher, J-F. (1998).** Éléments de traitement du signal, Ecole Supérieure d'Ingénieur en Electrotechnique et Electronique. pp.22-51
- 6) **Bercher, N. (2008).** Précision de l'altimétrie satellitaire radar sur les cours d'eau : développement d'une méthode standard de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques et applications, Thèse doctorat. 358p.
- 7) **Bertrand, F. (2013).** Mesures et Analyses Statistiques des Données, Master 1 GSI - Mentions ACCIE et RIM - ULCO, La Citadelle. pp.13-35
- 8) **Bonnefille, R. (2011).** Mouvements de la mer et leurs risques, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées(France), 25p.
- 9) **Cazenave, A. et Nerem, R.S. (2004).** Present-day sea level change: Observations and causes. Reviews of Geophysics 42(RG3001). 234p.
- 10) **Chiquet, J. (2012).** Introduction au logiciel R, et à la pratique des statistiques en vue de l'analyse de données issues de la biologie, École doctorale « du génome aux organismes », Université d'Évry. pp.07-14.
- 11) **Clark, M.P. et Mullis C.T. (1993).** Quadratic Estimation of the Power Spectrum Using Orthogonal Time-Division Multiple Windows. IEEE Transactions on Signal Processing. pp.222-231.
- 12) **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. pp.90-277.
- 13) **FLEURY, G. (2001).** Analyse spectrale méthodes non-paramétriques et paramétriques, ellipses édition marketing S.A. pp.10-34.

Références bibliographiques

- 14) **GIEC, (2007)**. Changements Climatiques 2007, Rapport de synthèse Un rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- 15) **Gouriou, T. (2012)**. Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18^e siècle en Charente-Maritime. Thèse de doctorat. Université de la Rochelle. pp.32-44.
- 16) **Grasso, F. et Michallet, H. et Barthélemy, E. (2007)**. Infragravity waves in mobile-bed laboratory experiments. In Coastal Sediment 07, ASCE. pp.235-247,
- 17) **Haddad, M. (2012)**. Modélisation et filtrage du signal altimétrique des satellites topex/posidon et jason-1 en vue de l'étude de la dynamique de la méditerranée : validation avec les données marégraphiques. Thèse de doctorat en science .128p.
- 18) **Hemdane, Y. (2006)**. Dynamique hydrosédimentaire de l'avant-cote d'un environnement macrotidal: exemple du nord-Pas-de-Calais.mer du nord. Thèse doctorat. université du littoral.
- 19) **Hemdane, Y. (2015)**. Le risque d'un tsunami en Méditerranée existe, econostrum.info.
- 20) **Llovel, W.** Depth-dependent temperature change contributions to global mean thermosteric sea level rise from 1960 to 2010.pp.10-13.
- 21) **Marin, J-M. (2006)**. Initiation au logiciel R, Université Paris Dauphine.pp. 02-03.
- 22) **Maumy et Bertrand, F. (2009)**. Initiation au logiciel R, Formation à R- Ecole Doctorale. pp.03-10.
- 23) **Mezari, R. (2006)**. GENERALITES SUR LA TRANSMISSION DES DONNEES, Edition Hachette technique. pp.12-20.
- 24) **Mokhtari, M. (2000)**. Matlab 5.2 et 5.3 et simulink 2 et 3 pour ingénieurs. Édition springer.246p.
- 25) **Muller, j-p. (2002)**. Analyse spectrale.28p.
- 26) **MUNK, W.H. (1951)**. Origin and generation of waves. Proc. First Coastal Engineering Conference, Long Beach, Calif.pp.1-4.
- 27) **Nicolle, A. (2006)**. Modélisation des marées et des surcotes dans les Pertuis Charentais, thèse doctorat, Spécialité : Océanologie, météorologie et environnement. pp.15-35.
- 28) **Ollivier, F. (2014)**. Analyse des signaux aléatoires et identification des systèmes linéaires en vibrations et acoustique, UPMC Sorbonne université. pp.24-35.

Références bibliographiques

- 29) **Paradis, E. (2005)**. R pour les débutants, Institut des Sciences de l'Evolution Université Montpellier II.81p.
- 30) **Parrenin, F. (2013)**. les calottes polaires, laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement CNRS, université Joseph Fourier, Grenoble.84p.
- 31) **Paskoff, R. (1993)**. Cotes en danger. Paris: Masson.pp.14-18.
- 32) **Paskoff, R. (1998)**. Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution, 2^e édition : Masson géographique. pp.03-23.
- 33) **Petrenko, A. (2004)**. Initiation à Matlab, université Aix Marseille II. pp.03-12.
- 34) **Phillips O.M. (1977)**. The Dynamics of the Upper Ocean, 2nd ed., Cambridge University Press.
- 35) **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.235p.
- 36) **Rami, A. (2012)**. Traitement du signal d'altimétrie spatiale pour la détermination des paramètres affectant la mesure altimétrique : analyse des données du satellite Jason-1 en Méditerranée occidentale, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. pp.04-13.
- 37) **UNESCO, (1985)**. Manuel et guide sur la mesure et l'interprétation du niveau de la mer, COI. pp.07-18.
- 38) **Zekkour, N. (2013)**. Traitement des données marégraphiques pour la détermination d'une référence altimétrique nationale, Centre des techniques spatiales 1, avenue de la Palestine BP 13 Arzew Algérie, journée REFMAR.

Mémoires :

- 1) **Zemmour, A. et Limam, M. (2010)**. analyse d'un signal du niveau de la mer en présence d'un Tsunami, mémoire d'ingénieur, ENSSMAL.
- 2) **Bouldja, S. et Rami, N. (2011)**. Etude des élévations soudaines du niveau de la mer, mémoire d'ingénieur, ENSSMAL.

Sites internet :

- 1) COI. (2015).sea level monitoring.[en ligne]. consulté le [10-01-2015]. Disponible à l'adresse:< <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=alcu>>.

Références bibliographiques

- 2) Metzger, J. (2011). Circulation in the Philippine Archipelago Simulated by 1/12° and 1/25° Global HYCOM and EAS NCOM.[en ligne]. consulté le [13-03-2015]. Disponible à l'adresse:<http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_dt_corssh_dt_sla.pdf>
- 3) NOAA(national oceanic and atmosphéric administraion,la propagatio des tsunamis).(2010).propagation d'un tsunami.[en ligne]. consulté le [18-04-2015].Disponible à l'adresse:<http://www.prh.noaa.gov/itic_pr/Les%20Grandes%20Vagues/tsunami_great_waves_4.html>.
- 4) SHMO.(2011). 10 ans de la vigilance Météo-France.[en ligne]. consulté le [02-05-2015]. Disponible à l'adresse:< http://www.shom.fr/fr-page/frshom/focus_xynthia.pdf.1-2p>
- 5) Wagner, N. Appareil dit marégraphe, pour mesurer la hauteur des marées, inventé par M. Chazallon et construit. [en ligne]. consulté le [02-03-2015]. Disponible à l'adresse:< <http://cnum.cnam.fr/CGI/fpage.cgi?4KY28.34/151/100/432/0/0>>

Annexes

Liste des données traitées :

Tide gauge at Alcudia	
Time (UTC)	rad(m)
2015-03-10 22:24:00	0.308
2015-03-10 22:25:00	0.311
2015-03-10 22:26:00	0.311
2015-03-10 22:27:00	0.306
2015-03-10 22:28:00	0.307
2015-03-10 22:29:00	0.307
2015-03-10 22:30:00	0.308
2015-03-10 22:31:00	0.307
2015-03-10 22:32:00	0.305
2015-03-10 22:33:00	0.302
2015-03-10 22:34:00	0.302
2015-03-10 22:35:00	0.305
2015-03-10 22:36:00	0.308
2015-03-10 22:37:00	0.312
2015-03-10 22:38:00	0.315
2015-03-10 22:39:00	0.316
2015-03-10 22:40:00	0.315
2015-03-10 22:41:00	0.315
2015-03-10 22:42:00	0.318
2015-03-10 22:43:00	0.318
2015-03-10 22:44:00	0.318
2015-03-10 22:45:00	0.317
2015-03-10 22:46:00	0.317

• •
• •
• •

2015-04-09 23:13:00	0.389
2015-04-09 23:14:00	0.389
2015-04-09 23:15:00	0.387
2015-04-09 23:16:00	0.386
2015-04-09 23:17:00	0.385