



## Rapport de Projet :

Contributions de la marée et du vent sur les niveaux d'eau,  
les surcotes et les oscillations portuaires : Étude à partir de  
données temporelles de niveaux d'eau par un réseau  
d'instruments dans le Var et les Bouches-du-Rhône

DUPONT Ronan  
JOSSE Pierre-Etienne  
MOREL Matthieu  
BUATOIS Léo

# Sommaire

Résumé du projet.....	3
-----------------------	---

Introduction.....	3
-------------------	---

## I) Préambule théorique

1) Définitions des termes importants.....	4
2) Les causes des variations d'eau dans la rade et les îles d'Or.....	7
3) Présentation du système d'acquisition du projet HTMNETO.....	8

## II) Les variations périodiques du niveau de la mer

1) Présentation des données brutes et des traitements préanalyse..	10
2) Analyse fréquentielle.....	13

## III) Un cas de variations apériodiques : le vent

1) Roses des vents et traitements des hauteurs.....	15
2) Programme de recherche d'indépendance.....	18

Conclusion.....	22
-----------------	----

Bibliographie.....	23
--------------------	----

## Annexes :

Glossaire.....	23
Annexe A : Analyse fréquentielle.....	25
Annexe B : Roses des vents.....	27
Annexe C : Traitements des niveaux d'eau.....	30
Annexe D : Programme d'indépendance entre vent et décote/surcote.....	32

# Résumé du projet

Le but de ce projet était de prendre connaissance des phénomènes physiques qui influent sur le niveau d'eau dans la rade de Toulon et des îles d'Or, pour ensuite en sélectionner quelques-uns et tenter de retrouver leur présence grâce aux données de niveau d'eau du projet HTM-NET et aux données de vent de Météo France à notre disposition. Nous nous sommes concentrés sur quelques phénomènes importants. La première étude sur le spectre des données de niveau d'eau de la rade de Toulon (après traitement des données), nous a permis de détecter le signal de marée, et celui des seiches. La seconde étude, sur les vents, nous a permis de connaître les vents dominants sur la côte du Var et de prouver l'influence du vent sur les décotes/surcotes entre Port Cros et Ifremer.

## Introduction

Depuis les années 90, le trafic maritime a explosé. Avec l'ouverture des marchés, et l'industrialisation de la Chine et de l'Asie du Sud Est, le trafic s'est intensifié de 300% dans l'océan Indien, et de 100% à 200% dans l'océan Atlantique, le Pacifique Nord et en Méditerranée [11]. Ces routes maritimes devenant plus sûres avec la connaissance précise des phénomènes marins, pouvoir prédire les variations du niveau d'eau des océans et mers est donc devenu un enjeu planétaire. Ces variations sont d'échelles bien différentes entre océans (de l'ordre du mètre ou même de la dizaine de mètres lors d'événements majeurs) et mers fermées ou quasi fermées comme la Méditerranée (variations de l'ordre du cm à plusieurs dizaines de centimètres). Cependant il reste primordial de pouvoir prévoir ou du moins estimer ces variations, non seulement lorsqu'elles peuvent provoquer des submersions avec dégâts physiques et humains, même aussi lorsqu'elles sont faibles, car une variation de l'ordre de la dizaine de centimètres peut impliquer, par exemple, des forts courants dans les ports ou dans une rade, ce qui gêne alors la bonne manœuvre des bateaux [2],

Les marées sont le premier phénomène auquel on pense lorsqu'on parle de montée du niveau des océans, mais ce n'est pas le seul phénomène et non le plus contraignant puisqu'il est prévisible. Nous allons donc chercher les différentes causes potentielles des variations du niveau de l'eau dans la rade de Toulon et des îles d'Or dans une échelle de temps raisonnable de l'ordre d'une année. Dans un premier temps, nous allons utiliser la bibliographie à notre disposition pour présenter le sujet plus en détail et de déterminer les causes potentielles des variations du niveau d'eau. Ensuite nous allons tenter de les retrouver à l'aide des données chiffrées mises à notre disposition que nous avons traitées sous Matlab, cette recherche s'effectuant en deux temps : les phénomènes périodiques et les phénomènes apériodiques et leurs traitements informatiques mutuels.

# I) Préambule théorique

## 1) Définitions des termes importants

Pour commencer, il nous est paru primordial de définir non seulement les mots importants qui vont apparaître dans l'exposé, mais aussi les mots que l'on peut rencontrer lorsqu'on en vient au phénomène de houle, de vent, marée, etc, même si nous ne traiterons pas ces derniers dans le détail dans la suite de notre travail.

Notre sujet ayant porté sur les variations du niveau de la mer, les premiers mots importants venant à l'esprit sont liés à la houle, aux vagues et aux ondes plus généralement. Une vague est une onde de gravité provoquée par plusieurs phénomènes possibles allant du mouvement d'un bateau à une onde sismique sous-marine. La houle est, elle, une conséquence du vent : en effet lorsque le vent souffle sur une certaine distance sans rencontrer d'obstacle (cette distance est appelée fetch), il crée une agitation dite erratique sur la surface de l'eau, occasionnant des petites vagues irrégulières de périodes très courtes : c'est la mer de vent. Lorsque ces vagues sortent de ce fetch, elles ne sont plus sous l'influence du vent et deviennent plus régulières et leur période grandit pour former ce que l'on nomme la houle. Lorsque la houle ne se déplace pas dans la même direction que ces vagues, on parle de mer croisée.

Afin de découvrir les autres types d'ondes de gravité, voici un schéma assez explicite.

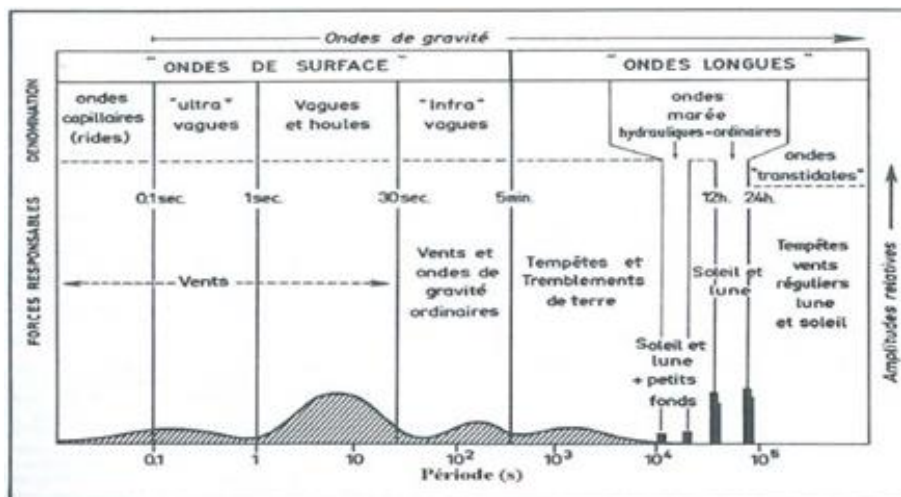


Figure 1.1 Classification des ondes de gravité (Munk 1951)

La houle et les vagues sont classées dans les ondes de surface (de périodes courtes), alors que la marée par exemple est classée dans les ondes longues qui regroupent les ondes de période plus grande. Dans la bibliographie nous avons aussi rencontré souvent le terme d'onde infragravitaire, qui fait référence à une onde longue, un groupe de vagues de même sens de propagation que ces dernières et ayant la particularité de gêner les baigneurs lorsqu'elle mouille les serviettes qui étaient au sec quelques minutes auparavant.

À propos de la pression atmosphérique, plusieurs termes sont aussi à définir. Par exemple le terme de barométrie désigne la mesure de la pression, à ne pas confondre avec la bathymétrie qui désigne la topologie des fonds sous-marins. La pression atmosphérique moyenne est d'environ 1013 hPa en France. Cependant elle connaît des variations, notamment lors d'épisodes de dépression, c'est-à-dire une diminution de la pression atmosphérique, ou à l'inverse lors d'épisodes anticycloniques.

Le vent est le phénomène le plus intéressant. À Toulon, il y a plusieurs vents présents : Mistral, Levant (ou vent d'Est), Marin, Tramontane... [10].

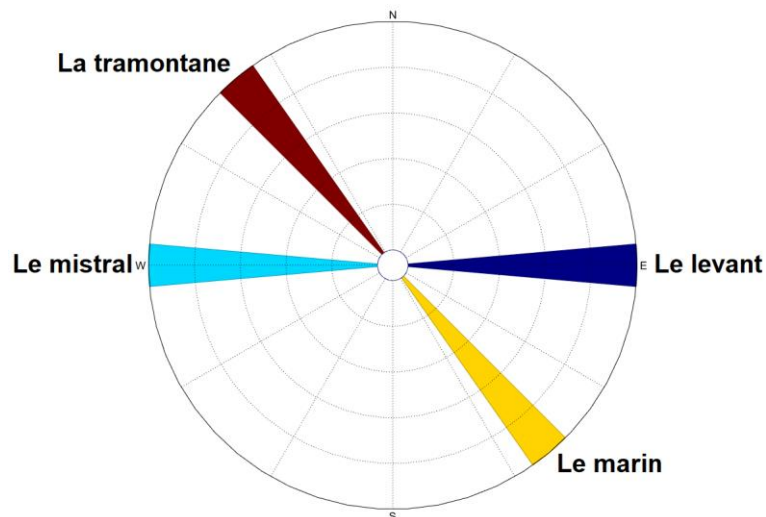


Figure 1.2 Vents Varois

Le vent est à l'origine de la houle. De plus, il est à l'origine de deux autres phénomènes assez complexes qui se produisent assez rarement et qui sont moins connus du grand public. Il s'agit tout d'abord du phénomène de basculement : en soufflant sur la surface de l'eau, le vent crée une force de cisaillement à la surface (windstress) qui va induire un basculement la masse d'eau d'un côté puis de l'autre, donc on remarquera une montée des eaux d'un côté du bassin et une diminution de l'autre côté [8].

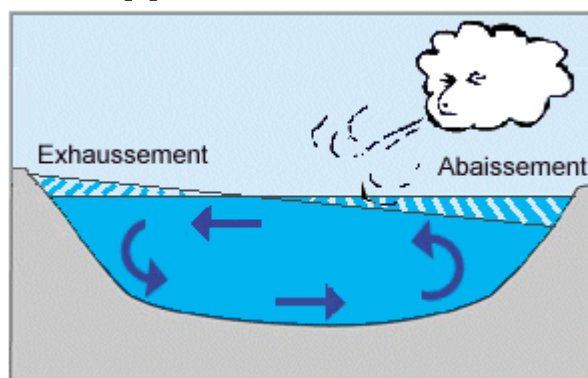


Figure 1.3 Phénomène de basculement

*rhone-mediterranee.eaufrance.fr*

L'autre phénomène concerne les seiches, qui sont des ondes stationnaires se mettant en place dans un bassin fermé ou semi-fermé de géométrie particulière. Celui-ci est provoqué par plusieurs facteurs : la masse d'eau du port est excitée par les composantes à période longue



de la houle, par le vent, la marée... Il y a alors la formation d'une onde stationnaire. Suivant la fréquence de la houle et son amplitude, cette onde stationnaire peut entrer en résonance avec le port ou la rade et cela peut même, dans certains cas, bloquer totalement la navigabilité du port et engendrer des dégâts matériels. Le mot technique associé à ce phénomène revenant régulièrement est le mot nodal : il fait référence aux nœuds de cette onde stationnaire [2]. Voici le schéma de seiches (ondes stationnaires) dans un bassin fermé :

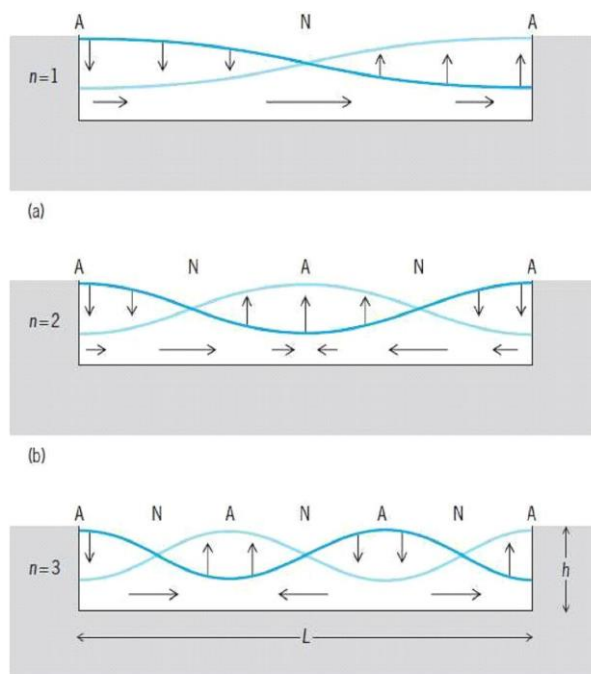


Figure 1.3 Ondes stationnaires dans un bassin fermé  
refmar.shom.fr

Enfin pour finir, nous allons tenter de définir les deux termes qui nous ont le plus posé problème. Il s'agit des termes de surcote et décote. Ils sont habituellement utilisés pour définir toute différence entre le niveau de la mer mesuré et le niveau de la mer prédit. Le niveau de la mer prédit correspond au niveau de la mer impactée seulement par les marées. Donc ces surcotes (dépassement du niveau prédit) et décotes (niveau d'eau prédit non atteint) sont causées par la météo, vent et pression, par les courants présents, la bathymétrie... [1] Si jamais tous ces facteurs entrent en synergie, la surcote ou décote peut devenir très importante et problématique, par exemple la tempête Xynthia aurait été liée à une surcote très importante à cause d'une grande dépression et un coefficient de marée plus important que la normale [5]. Le problème que nous avons rencontré est que cette définition est très large et regroupe beaucoup d'échelles différentes de variation de niveau d'eau, ne comportant donc pas de minimum par exemple.

Dans notre travail, comme nous comparons les niveaux d'eau de différents sites, nous avons utilisé les termes décote/surcote comme des différences de niveau d'eau entre deux lieux géographiques, pour étudier l'effet d'un caractère sur le niveau de la mer. Et donc le principal problème auquel on a été confronté avec cette définition a été de déterminer à partir de quelle différence minimale de niveau on peut dire qu'il y a une réelle surcote/décote et non une faible variation parasite.

## 2) Les causes des variations d'eau dans la rade et les îles d'Or

Les variations du niveau de la mer ont de multiples origines, et nous allons tenter dans cette partie de mettre en lumière la plus grande partie, notamment en ce qui concerne la région de Toulon que l'on étudie en particulier. On peut regrouper une majorité de ces origines en 4 catégories distinctes, mais le plus souvent il y a variation du niveau d'eau à cause de plusieurs facteurs différents qui agissent en synergie. Néanmoins ces 4 catégories sont : la pression, la température, les marées, et enfin le vent. [1]

Premièrement, la température est sûrement le facteur de variation du niveau d'eau auquel on s'attend le moins. En effet les effets sont assez subtils et agissent pour la grande majorité surtout sur une période de l'ordre de l'année. Le procédé est toujours le même : l'effet stérique. À l'échelle nanoscopique, les différents atomes des molécules sont gouvernés par des forces électrostatiques qui permettent d'assurer la cohésion de la molécule notamment au niveau des liaisons. Cependant il y a aussi le revers de la médaille, les noyaux des atomes étant du coup plus proche les uns des autres à cause de ces mêmes liaisons, il y a aussi des forces de répulsions qui apparaissent entre ces noyaux : il s'agit de la gêne stérique. Lorsque l'on apporte de l'énergie à la molécule, les atomes l'utilisent pour s'éloigner les uns des autres afin de se départir de cette gêne. Les molécules occupent donc un volume plus important qu'à l'ordinaire. Pour revenir à notre cas, en été, il y a plus d'énergie thermique à disposition des molécules d'eau, celles-ci augmentent par conséquent leur volume propre, ce qui implique une augmentation totale du volume occupé par l'eau. Il y a donc augmentation du niveau de la mer en été et diminution en hiver, autrement dit il s'agit d'une oscillation du niveau de la mer de période annuelle comme on peut le voir sur ces graphiques (tirés de [1]) :

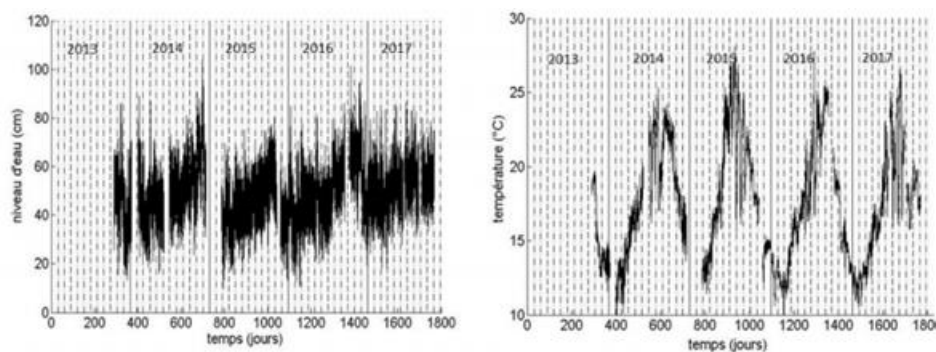


Figure 1.4 Influence de la température (Ifremer)

Dans un second temps, lorsqu'on en vient à la pression, il y a là aussi un seul phénomène qui rentre en jeu. Il s'agit de l'équilibre de pression pour toute interface, dans notre cas il s'agit donc de l'équilibre entre pression de l'eau et pression de l'air. Lors des épisodes de dépression, pour que l'équilibre de pression soit toujours vérifié la pression de l'eau augmente : le niveau d'eau augmente en même temps : c'est ce qu'on appelle l'effet barométrique inverse.

Et inversement lorsqu'il s'agit d'un épisode anticyclonique. La formule qui nous permet de calculer le niveau d'eau à partir de la différence entre la pression de l'eau et de l'air est la suivante :  $\eta = \Delta p / \rho g$  où  $\rho$  est la masse volumique de l'eau et  $g$  l'accélération de la pesanteur [1]. Donc grâce à cette formule on peut voir que si la pression de l'air augmente de 1 hPa, le niveau de

la mer va diminuer de 1 cm. Donc par exemple si la pression atmosphérique descend jusqu'à 980 hPa (ce qui est rare) la mer monte de plus de 30 cm. À noter qu'il existe aussi une marée dite atmosphérique (agissant sur la pression atmosphérique) qui est superposée à la marée astronomique (semi-diurne), mais elle met en jeu des variations de pression trop faibles (de l'ordre de 1 hPa) pour être visible.

En parlant de marée astronomique, cette dernière, bien qu'en méditerranée elle soit peu importante, voire négligeable en comparaison avec celle opérant dans les océans, a quand même bien entendu une influence sur le niveau d'eau. Elle est principalement semi-diurne (de période fondamentale 12h) il y a donc 2 maximum et 2 minimum de niveau d'eau par jour [1]. À noter que les marées principalement diurnes (période fondamentale 24h) sont assez rares, elles sont visibles à quelques endroits particuliers de la planète : Golfe du Mexique ou mer Baltique par exemple. Cette marée dite astronomique est causée par les forces gravitationnelles de la Lune et du Soleil couplées avec la rotation de la Terre. En Méditerranée, l'amplitude de cette marée est de l'ordre de la dizaine de cm [5].

Enfin pour terminer, le facteur le plus intéressant à étudier sur le niveau d'eau, particulièrement dans notre région, est le vent. En effet comme on a pu le voir dans la première partie, il est à l'origine de nombreux phénomènes différents qui font varier le niveau de la mer. On peut relever le phénomène de basculement et les seiches, mais aussi la formation de la houle. Ces deux premiers phénomènes présentent très peu d'intérêt pour la plupart des lieux géographiques. En effet dans l'océan les variations de niveau d'eau liées à des épisodes de vent en particulier (hormis les vagues) sont négligeables devant la marée donc quasiment invisible. De même pour les seiches qui se mettent en place dans des lieux spécifiques (ports, rades avec orientation et bathymétrie particulière) [1-7]. Cependant pour notre travail, nous nous intéressons exclusivement à la rade de Toulon et les environs, donc étudier ces phénomènes prend un sens certain, les seiches se mettant en place dans la rade et les marées étant assez faibles pour distinguer le phénomène de basculement.

### 3) *Le projet d'acquisition de hauteurs d'eau : HTM-NET*

Il reste maintenant à vérifier si ces causes supposées sont bien présentes dans la rade et aux alentours ; pour ceci nous allons utiliser des données mises à notre disposition. Nos données de niveau d'eau sont issues du projet HTM-NET lancé par le laboratoire MIO (Institut Méditerranéen d'Océanographie) qui a pour but d'étudier les dynamiques littorales autour de Toulon, des îles d'Or et plus récemment des côtes provençales et de l'étang de Berre. Pour ceci, ils ont placé un réseau de stations le long des côtes méditerranéennes, qui leur permet de mesurer toutes les 10min (ou plus récemment toutes les 2 min) les paramètres suivants : les pressions et les températures immergées et émergées. Il y a deux capteurs piézoélectriques de la société Keller à chaque station qui mesurent pression et température dans l'eau et hors de l'eau pour en déduire un niveau d'eau en cm. Les incertitudes sont de 1mm pour le niveau d'eau et de 0.5°C pour la température. Le système est autonome en énergie (par batterie) et en mémoire, et il est aussi constitué d'une cellule GSM (pour la majorité) qui permet d'envoyer les données enregistrées par les différents capteurs sur le site web du projet en différé (quelques heures). Voici une photo de la station de Tamaris :





Figure I.5 Capteur HTM-NET de Tamaris  
[htmnet.mio.osupytheas.fr](http://htmnet.mio.osupytheas.fr)

Grâce à ces données collectées sur le site web de ce projet, nous avons donc pu avoir accès aux mesures de niveau d'eau en fonction du temps pour différents sites.

Voici la carte de la région (tirée de [6]) où sont situés les différents capteurs qui sont placés le plus souvent dans des zones assez protégées comme des ports.

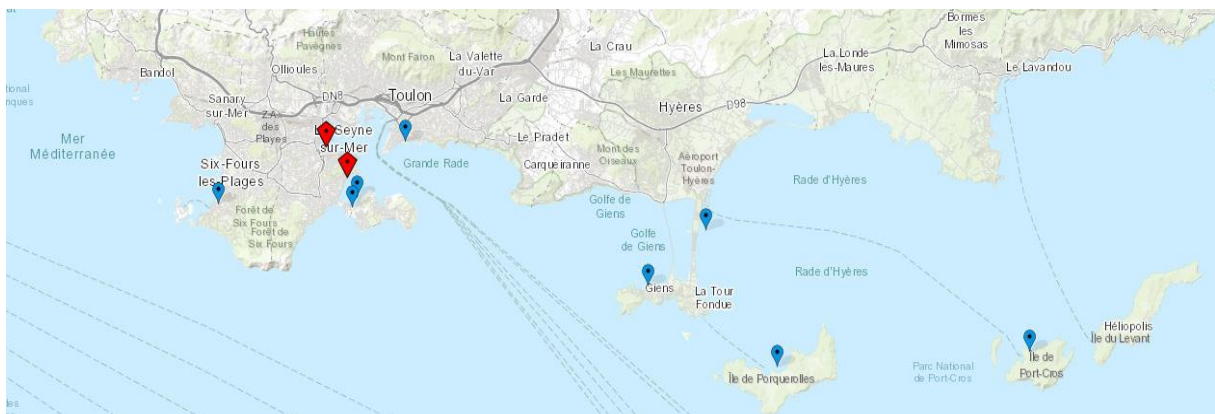


Figure I.6 Localisation des capteurs HTM-NET (HTM-NET)

En récupérant ces données du projet HTM-NET on a pu remarquer que les variations des niveaux d'eau pouvaient se séparer en deux catégories : les variations périodiques et apériodiques.

## II) Variations périodiques

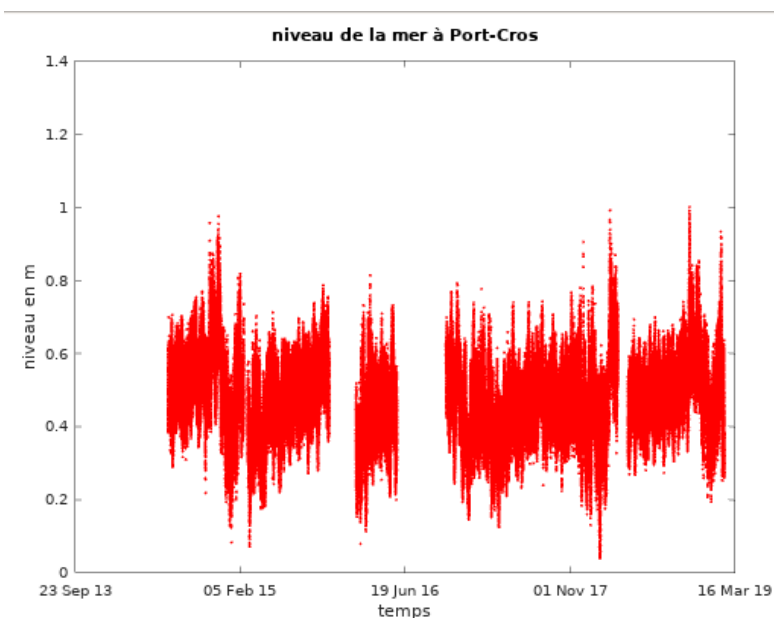
### 1) *Présentation des données brutes et des traitements préanalyse*

Donc dans un premier temps, nous avons voulu nous intéresser aux variations périodiques des niveaux d'eau. Nous avons pour cela à notre disposition les données de niveau d'eau de deux points de la région via les stations HTM-NET: Ifremer (Toulon), et Port-Cros. Ces données avaient déjà subi plusieurs traitements qui ont consisté à remettre les temps à la bonne échelle, c'est-à-dire que suivant les stations les temps n'étaient pas les mêmes (GMT ou pas), et ensuite à appliquer un "filtre manuel" en supprimant les données absurdes. Elles ont été aussi converties en .mat pour pouvoir les traiter avec Matlab.

Ces données sont composées de 2 vecteurs de même taille :

- Un vecteur des temps sous forme de "serial date number" : un nombre à virgule qui correspond au nombre de jours depuis le 00/01/0000 (de l'ordre de  $7 \cdot 10^5$  aujourd'hui), on peut retrouver la date correspondante à partir de la commande `datestr(...)`.
- Un vecteur des hauteurs d'eau en mètres.

Voici les graphiques présentant les données telles qu'on les a récupérés :



*Figure II.1.a Niveau de la mer à Port-Cros*

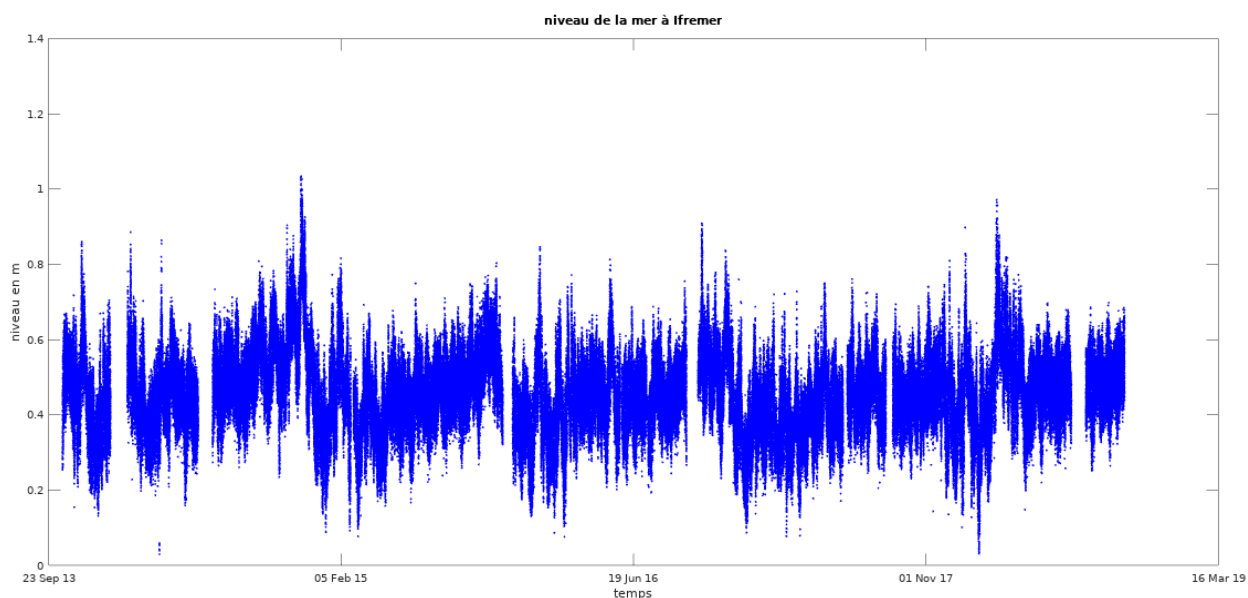
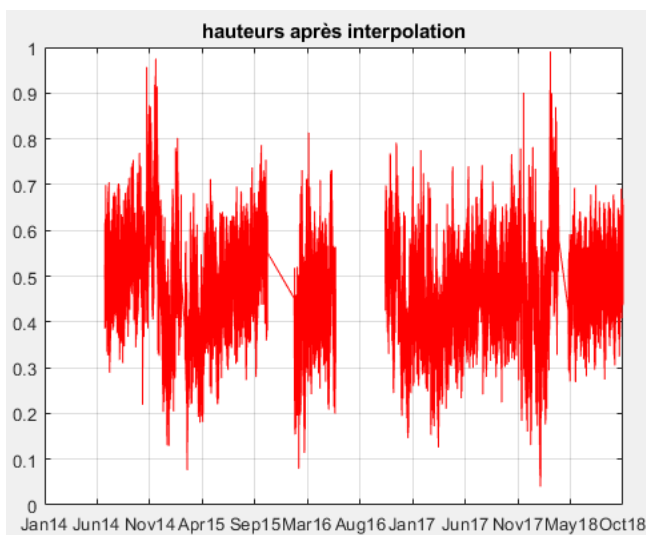
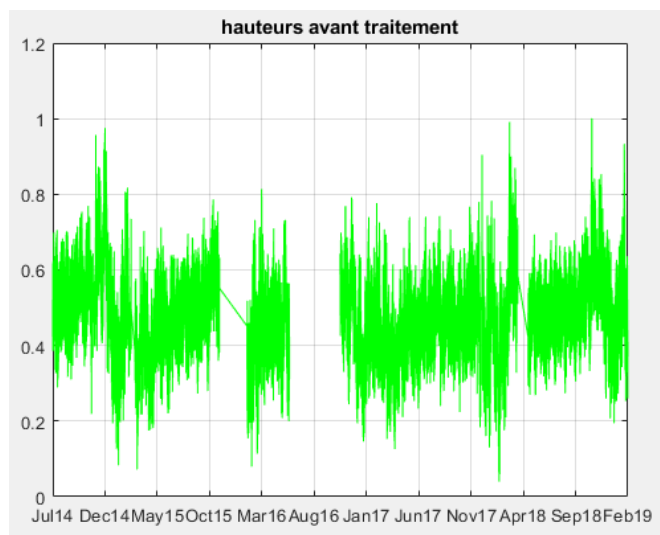
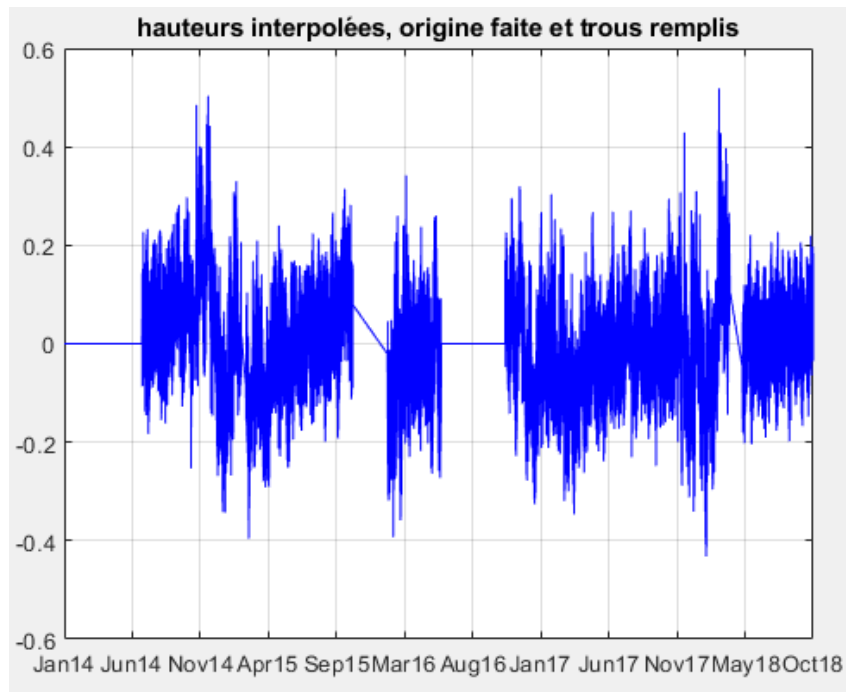


Figure II.1.b Niveau de la mer à Ifremer

Mais ces données posent encore un problème lorsqu'on veut faire une étude de fréquence : elles ne sont pas continues, il y a des trous dans le vecteur des hauteurs d'eau, comme on peut le voir sur les graphiques, et aussi des indices entiers qui manquent dans les deux vecteurs. C'est pourquoi avant de commencer toute analyse il a fallu effectuer plusieurs traitements (voir programme annexe). Dans un premier temps il a fallu créer un vecteur temps "parfait" qui commence et finit comme le vecteur "brut", mais qui ne contient aucun trou (commande `linspace`), pour simplifier les études nous avons fait concorder ces deux vecteurs temps entre les 2 stations. Ensuite nous avons fait une interpolation pour faire correspondre le vecteur des hauteurs d'eau à ce nouveau vecteur des temps. Nous avons calculé la moyenne des hauteurs d'eau pour recentrer le signal à 0, afin d'éliminer la composante continue dans la transformée de Fourier. Enfin pour terminer nous avons créé une fonction pour ajouter des 0 à la place des trous dans le vecteur des hauteurs. Voici les différentes étapes du traitement en image avec les données de Port-Cros :





À noter que les 2 vecteurs temps modifiés de Port-Cros et Ifremer (Toulon) sont compris entre le '01-Jan-2014 10 :10 :00' et le '06-Oct-2018 17 :40 :00'.

Après ces traitements, il ne reste plus qu'à effectuer la Transformée de Fourier discrète sur Matlab pour avoir le spectre en fréquence des hauteurs d'eau, sans oublier de diviser l'amplitude par la fréquence d'échantillonnage  $T_e=600s$ .

On obtient alors :

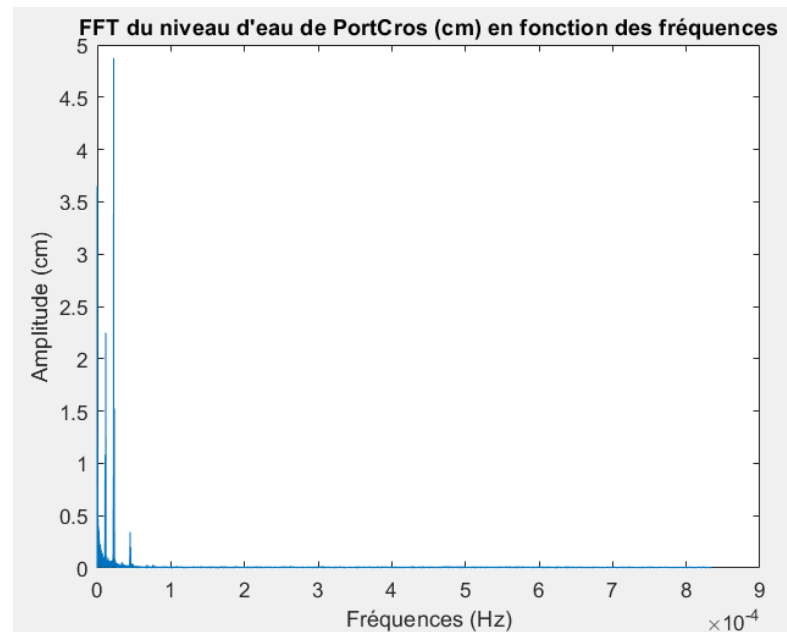
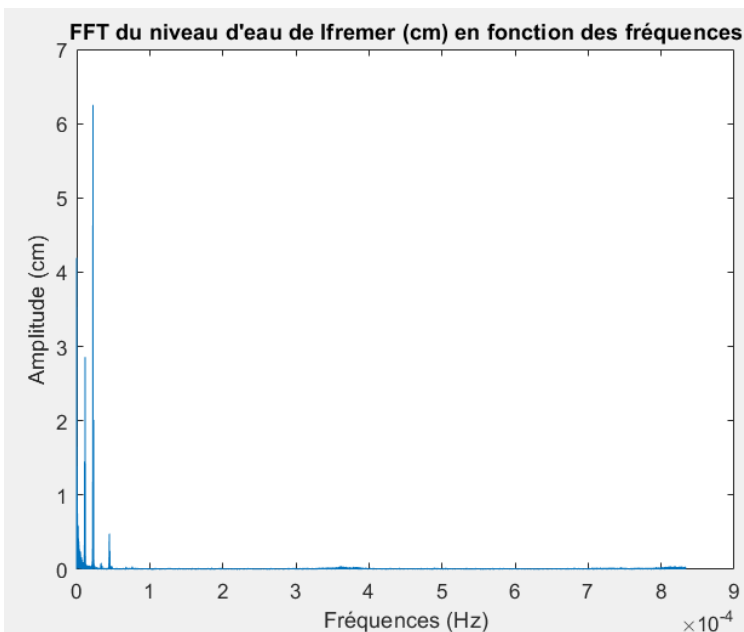


Figure II.2 FFT du niveau de l'eau à Ifremer et Port-Cros (amplitude en fonction de la fréquence)

## 2) Analyse fréquentielle

On peut donc directement relever quatre pics principaux (classés par ordre d'importance concernant l'amplitude) et ce pour les 2 spectres :

Temps\Amplitudes	Amplitude Ifremer	Amplitude Port-Cros
T1=12h25min13s	6.3 cm	4.9 cm
T2= 348j	4.2 cm	3.7 cm
T3= 23h56min10s	2.9 cm	2.4 cm
T4= 6h12min30s	0.5 cm	0.3 cm

Une observation rapide montre deux spectres quasiment identiques. Par conséquent les composantes périodiques des variations de niveau sont présentes à la fois dans la rade de Toulon (à Ifremer) et à Port-Cros, donc les phénomènes physiques qui sont à l'origine des variations de niveau d'eau à Toulon se retrouvent à Port-Cros. Le pic de plus haute amplitude est situé à 12h25min, ce qui correspond directement aux périodes théoriques de la marée pour la mer Méditerranée, qui est elle aussi semi-diurne. Ensuite viennent 2 autres pics qui semblent être des multiples du pic le plus important. C'est aussi facilement explicable, puisque la marée n'est pas une onde purement sinusoïdale à une composante, c'est une somme de plusieurs ondes. La marée est donc composée d'ondes semi-diurnes, mais aussi diurnes, mensuelles, quadri-diurnes.... Donc les pics à 6h et à 24h sont donc des harmoniques de cette période fondamentale qui est de 12h. De plus le pic avec une période de l'ordre de 348j, qui pourrait ressembler à première vue à une composante continue du signal (ce qui ne serait pas logique étant donné que la marée est une variation du niveau d'eau autour du niveau 0, son point d'équilibre), pourrait lui aussi être assimilé à un pic harmonique de marée, puisqu'il a été aussi démontré que la marée était aussi composée de signaux de période annuelle voir pluriannuelle. Donc pour résumer ces 4 pics visibles sur les 2 spectres de Toulon et Port-Cros sont ceux du signal de marée en Méditerranée, on a donc bien affaire à une perturbation du niveau de la mer périodique. Voici un spectre centré autour des pics diurnes et semi-diurnes avec un axe des fréquences changé en axe des périodes pour plus de lisibilité :

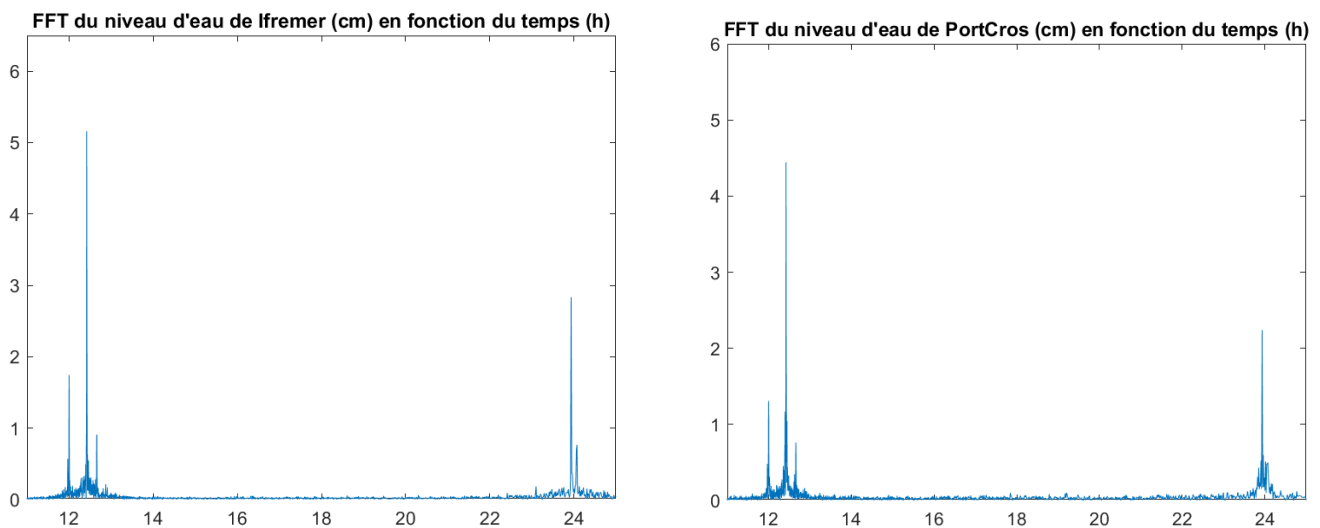
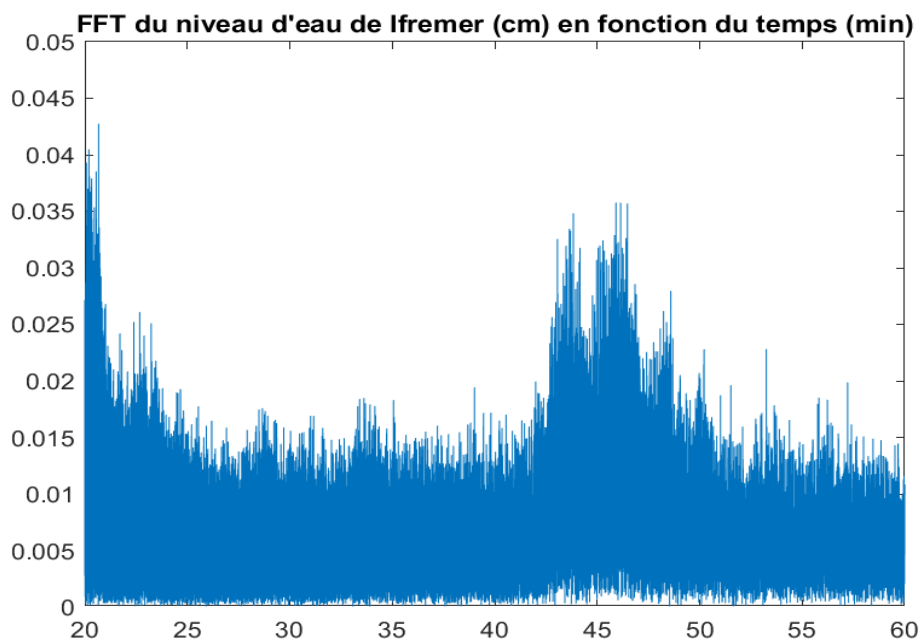


Figure II.3 FFT du niveau de l'eau (amplitude en fonction du temps)

Dans une seconde approche des spectres, on peut remarquer 2 pics de très faible amplitude à fréquence plus élevée seulement sur le spectre de Toulon. Voici le spectre coupé et donc zoomé sur ces deux pics pour Toulon (un axe des abscisses en période toujours) :



*Figure II.4 Zoom sur la FFT d'Ifrermer*

Ces deux pics sont situés à des périodes de 20 et 45 min et sont d'amplitude très faible. Nous pouvons aussi apporter une justification à leur présence sur le spectre. D'après les articles **[1 et 3]** notamment celui de Vincent Rey **[1]**, ces périodes correspondent exactement aux périodes des seiches principales qui sont en place dans la rade de Toulon. Comme ils ne sont pas présents sur le spectre de Port-Cros c'est un second argument en faveur de ce phénomène de seiche, puisque celui-ci ne se forme que dans les ports et rades.

En revanche, on ne détecte pas les autres seiches dont la présence a été montrée par Vincent Rey **[1]**. Cela est sûrement dû à la faible amplitude de ces signaux, on ne pourrait donc pas les détecter sur le spectre sachant que nous avons déjà du mal à voir les pics des seiches principales. Ce souci de faible amplitude est assez étrange (seulement une amplitude de l'ordre du mm), il est sûrement dû au fait que faire une FFT sur un phénomène qui n'est pas présent tous les jours a sûrement tronqué son amplitude. Nous avons réussi à détecter ce phénomène période, mais le manque de temps à notre disposition nous a empêchés de nous pencher plus dans les détails notamment sur ce souci d'amplitude.

Une analyse harmonique de nos données nous a donc permis d'étudier les phénomènes périodiques (ou quasi-périodiques) de variation de niveau d'eau, ici les marées et les seiches. Cependant ce manque de temps nous a contraints de laisser de côté l'intéressant phénomène des seiches au profit d'autres facteurs de perturbation du niveau de la mer cette fois-ci a périodique.



### III) Un cas de variations apériodiques : le vent

#### 1) Roses des vents et traitements des hauteurs

Les événements ayant une influence apériodique sur le niveau de la mer sont assez nombreux et divers, entre les bateaux, les séismes sous-marins et les courants par exemple. Nous allons donc nous attarder sur le facteur qui nous semble le plus intéressant étant donné notre situation géographique et notre échelle de temps : le vent. De plus, il est à l'origine de beaucoup de phénomènes différents.

Dans un premier temps, afin d'étudier cette influence entre le niveau de la mer et le vent, nous avons dû nous pencher plus en détail sur les données de vent qui nous ont été fournies avec celles du niveau de la mer. Ces données proviennent de météo France, pour 4 stations en particulier : Hyères, Toulon, Porquerolles et l'île du Levant.

Les données brutes étaient présentées de la manière suivante :

- Un vecteur TIME de temps au format "sériel date number".  
(Par exemple : le premier élément de notre vecteur Temps est : 735508 ce qui correspond à la date suivante : '01-Oct-2013'.)
- Un vecteur dir indiquant la direction du vent en degrés.
- Un vecteur spd indiquant la vitesse du vent en m/s.

Notre premier objectif avec ces données a été de le visualiser graphiquement pour pouvoir les comprendre. La meilleure visualisation graphique pour des données de vent comprenant direction et vitesse est la rose

Nous avons trouvé un programme sur Internet nommé « WindRose » [9], nous permettant de tracer ces roses des vents.

Nous avons donc essayé de tracer directement la rose des vents de Porquerolles pour toute la durée de la liste à notre disposition et nous avons obtenu la rose des vents suivante :

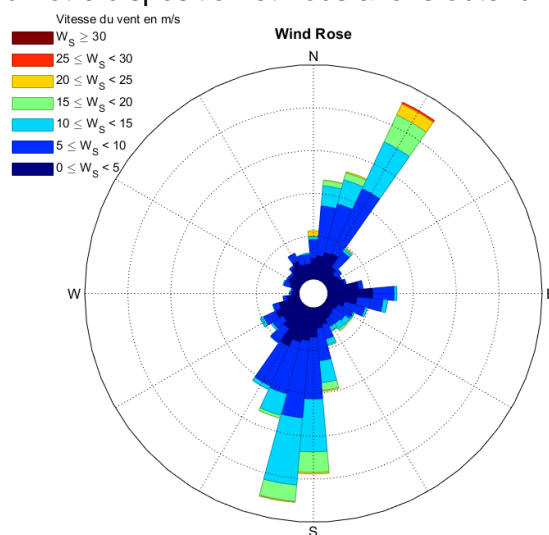


Figure III.1 Rose des vents de Porquerolles

Ceci ne correspondait pas du tout aux données de vent réel. Nous avons la configuration de vents suivants (à gauche) et nous voulions la configuration réelle (à droite) :

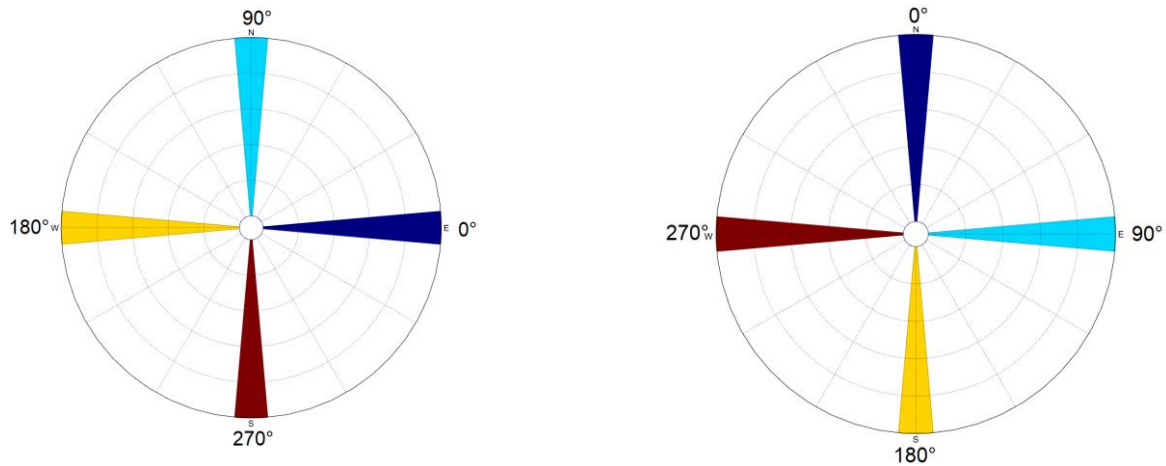


Figure III.2 Changement d'origine

Nous avons donc appliqué une opération dans le programme WindRose [9] pour ajuster les roses : nous avons donc inversé la direction puis lui avons ajouté 90 degrés de la manière suivante :  $direction = \text{mod}(90 - direction, 360)$

Nous avons par conséquent obtenu donc la rose des vents suivante pour Porquerolles par exemple :

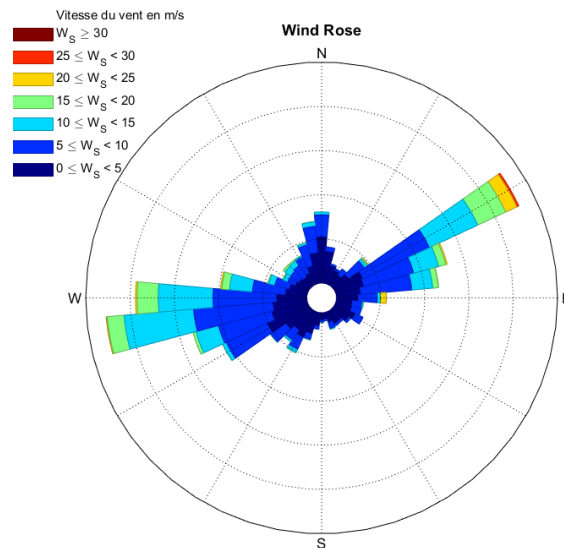


Figure III.3 Nouvelle rose des vents de Porquerolles

Cependant, faire une rose sur toute la totalité du vecteur temps n'est pas très intéressant dans notre cas. Nous avons donc cherché à construire les roses des vents sur des périodes de temps plus réduites dans un objectif futur de les comparer avec les niveaux d'eau.

Nous avons donc cherché à tracer les différentes roses tous les mois de l'intervalle de temps, pour chacune des stations. Pour ce faire, nous avons créé un programme optimisé permettant d'enregistrer automatiquement toutes les roses sur tous les mois de l'intervalle (Annexe).

Dans un second temps, le vent étant à l'origine de multiples phénomènes faisant varier la hauteur de la mer, nous avons décidé de nous concentrer sur un phénomène en particulier : celui dit de basculement.

Il nous a, pour cela, fallu traiter de nouveau les données de niveau d'eau afin de supprimer les effets, parasites pour notre étude, des marées, et ainsi obtenir des hauteurs d'eau directement exploitables.

Après les premiers traitements de la partie 2, les données étaient sous la forme suivante :

- Un vecteur *TS* au même format que le vecteur *TIME* que nous avons sur les vents.
- Un vecteur *WL* indiquant le niveau d'eau en mètre.

Nous avons donc écrit un programme permettant de traiter les données de niveau d'eau en retirant les composantes de marées à l'aide d'une moyenne glissante : les principales composantes de la marée étant de périodes 6,12 et 24h, notre moyenne glissante sera effectuée sur 24h. Le principe est simple, nous prenons un point de hauteur d'eau situé dans l'intervalle [début+12h ; fin-12h] du vecteur des temps. Nous lui soustrayons ensuite la moyenne des hauteurs comprises entre 12h avant ce point et 12h après. Cela permet de supprimer toutes composantes périodiques de période inférieure à 24h et garder l'influence du vent, qui elle, est apériodique.

Nous avons ensuite cherché à tracer sur le même graphique les niveaux d'eau de Port-Cros et Ifremer par mois. Pour ce faire, nous avons utilisé le même contenu que le programme qui traçait les différentes roses des vents par mois. **(Annexe)**

Pour mettre en lumière le lien vent/basculement, nous devons comparer directement les graphiques de niveau d'eau de nos deux stations et les roses des vents par mois ou par semaine.

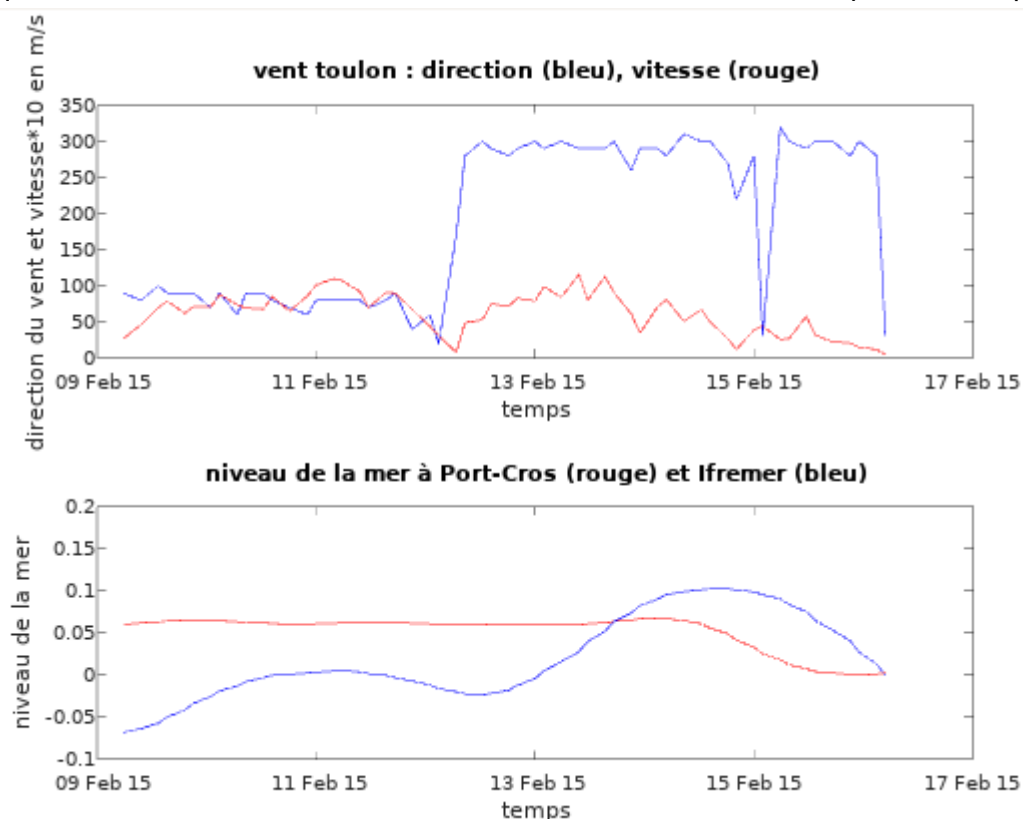


Figure III.4 Influence du vent sur le niveau de l'eau

Ce travail de comparaison de graphique pouvant être long et fastidieux, il nous a paru intéressant d'automatiser ce traitement.

## 2) Programme de recherche d'indépendance

Pour rendre compte du lien entre le phénomène de basculement et le vent, nous allons le caractériser avec un outil mathématique : la notion d'indépendance en probabilité. Nous devons ainsi étudier l'indépendance (dans notre cas on cherche la dépendance ou non-indépendance) entre l'événement "il y a du vent" (noté V) et l'événement "il y a une surcote (ou décote)" (noté S).

Pour notre étude, on se concentrera uniquement sur les deux vents principaux dans la région : le vent d'est et le mistral (ouest, nord-ouest). À noter que ce dernier est un vent dépressionnaire, donc il induit aussi une augmentation du niveau d'eau par équilibre de pression. Cependant cela ne va pas parasiter notre étude puisque nous allons travailler en niveau d'eau relatif entre les deux stations.

Les données de vent qui seront utilisées par la suite seront uniquement celles de la station de Toulon, on suppose en effet, pour alléger le programme et simplifier l'étude, que le vent à Toulon et Port-Cros est sensiblement le même.

Détaillons maintenant les paramètres choisis pour l'étude :

- L'événement V dépend de l'angle  $\alpha$  d'où provient le vent, une marge d'erreur  $\varepsilon 1$  sur  $\alpha$  et une vitesse de vent minimum  $v0$ .
- L'événement S dépend d'une surcote minimum  $\sigma$ .
- Les deux événements sont liés entre eux par un paramètre  $\tau$ , l'inertie du vent sur l'eau, et de  $\delta\tau$  la marge sur l'inertie.

Notre programme sera chargé de vérifier la dépendance avec les paramètres que l'on posera, la méthode sera expliquée par la suite. Ce programme sera divisé en trois parties.

La première étape est de lister tous les indices qui concernent un vent qu'on appellera intéressant, c'est à dire où sa direction est comprise entre  $\alpha-\varepsilon 1$  et  $\alpha+\varepsilon 1$  avec une vitesse supérieure à  $v0$  (cette liste est appelée I dans l'annexe). On a alors  $V(\alpha, \varepsilon 1, v0, \tau)$ .

Ensuite, on fait de même avec les données de niveaux d'eau, où l'on fera une disjonction de cas : si on étudie un vent d'est on va calculer la différence entre le vecteur Water Level à Ifremer (noté WLifr) et le vecteur Water level à Port-Cros (WLpc). Si on étudie le vent d'ouest, on va calculer WLpc-WLifr. On va garder la liste des indices de ce vecteur pour lesquels les valeurs dépassent le paramètre  $\sigma$ . (liste appelée i dans l'annexe). Cela nous donnera  $S(\sigma, \tau)$ . Et enfin, on va chercher tous les indices qui correspondent, en prenant en compte l'inertie, on obtiendra alors  $V(\alpha, \varepsilon 1, v0, \tau) \cap S(\sigma, \tau)$ .

On va donc avoir :

$$\begin{aligned}
 - P(S(\sigma, \tau)) &= \frac{\text{card}(S(\sigma, \tau))}{\text{card}(\Omega)} \\
 - P(V(\alpha, \varepsilon 1, v0, \tau)) &= \frac{\text{card}(V(\alpha, \varepsilon 1, v0, \tau))}{\text{card}(\Omega)} \\
 - P(V(\alpha, \varepsilon 1, v0, \tau) \cap S(\sigma, \tau)) &= \frac{\text{card}(V(\alpha, \varepsilon 1, v0, \tau) \cap S(\sigma, \tau))}{\text{card}(\Omega)}
 \end{aligned}$$

On pourra alors calculer  $P(S(\sigma, \tau) | V(\alpha, \varepsilon_1, v_0, \tau))$  et  $P(V(\alpha, \varepsilon_1, v_0, \tau) | S(\sigma, \tau))$  (en notant  $P(A|B)$  la probabilité de l'évènement A sachant B)

Pour vérifier notre hypothèse de dépendance, on vérifiera si on a :

- $P(V(\alpha, \varepsilon_1, v_0, \tau) \cap S(\sigma, \tau)) \neq P(V(\alpha, \varepsilon_1, v_0, \tau))P(S(\sigma, \tau))$
- $P(S(\sigma, \tau) | V(\alpha, \varepsilon_1, v_0, \tau)) \neq P(S(\sigma, \tau))$
- $P(V(\alpha, \varepsilon_1, v_0, \tau) | S(\sigma, \tau)) \neq P(V(\alpha, \varepsilon_1, v_0, \tau))$

Notre étude portera donc uniquement sur les vents d'est ( $\alpha=90^\circ$ ) et d'ouest ( $\alpha=270^\circ$ ), avec une vitesse minimum  $v_0$  de 5 m/s, 10 m/s et 15m/s, pour des surcotes  $\sigma$  de 5cm et de 10cm.

Pour les autres paramètres on les pose en observation avec la rose des vents :

$\tau = 24h$

$\delta\tau=24h$

$\varepsilon_1=40^\circ$

On obtient alors les figures suivantes

$v_0$ (m/s)	5		10		15	
$\sigma$ (cm)	5	10	5	10	5	10
$P(V \cap S)$ (%)	5.9	3.5	0.68	0.39	0.014	0,01
$P(V)$ (%)	15.8	15.8	1.5	1.5	0.027	0.027
$P(S)$ (%)	40	25.1	40	25	40	25
$P(V S)$ (%)	14.9	14	1.7	1.5	0.034	0.05
$P(S V)$ (%)	37,5	22	45	26	50	50
$P(V)*P(S)$ (%)	6,5	4	0.6	0.38	0.01	0.0067
indépendant	oui	oui	oui	oui	non	non
erreur relative indé moyenne	7%	12%	12%	3%	23%	16%

Figure III.5.a Dépendance entre le vent d'Ouest ( $\alpha=270$ ) et la surcote  
Influence de  $v_0$  et  $\sigma$

$v_0$ (m/s)	5		10		15	
$\sigma$ (cm)	5	10	5	10	5	10
$P(V \cap S)$ (%)	1.9	1.3	0.4	0.26	0.027	0.027
$P(V)$ (%)	9.9	9.9	1.7	1.7	0.04	0.04
$P(S)$ (%)	26.5	12.3	26.5	12.3	26.5	12.3
$P(V S)$ (%)	7.3	10.5	1.6	2.1	0.1	0.22
$P(S V)$ (%)	19.6	13.1	25	15.3	67	67
$P(V) \cdot P(S)$ (%)	2.6	1.2	0.44	0.21	0.01	0.049
Indépendant	non	oui	oui	oui	non	non
Erreur relative indépendance moyenne	26%	7%	7%	14%	61%	69%

Figure III.5.b Dépendance entre le vent d'Est ( $\alpha=90$ ) et les surcotes. Influence de  $v_0$  et  $\sigma$

Aux vues de ces valeurs, on peut supposer que la dépendance entre l'événement V et l'événement S augmente si  $v_0$  et  $\sigma$  augmente. Ce qui est physiquement acceptable : plus le vent est fort, plus il va entraîner une surcote. A l'inverse, un vent faible n'a que peu de chance de créer une surcote, elle est donc liée à un autre phénomène, par conséquent V et S sont indépendants.

L'étude suivante est consacrée à l'influence des paramètres  $\tau$  et  $\delta\tau$ . On va prendre pour cela deux cas, un vent faible et une surcote importante, et un vent fort et une surcote importante :

$\tau$	3h	6h	24h		72h	
$\delta\tau$	3h	6h	6h	24h	12h	24h
$P(V \cap S)$ (%)	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.1
$P(V)$ (%)	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9
$P(S)$ (%)	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3
$P(V S)$ (%)	10.4	10.5	10	10.5	9.7	9.5
$P(S V)$ (%)	13.0	13.1	12.5	13.1	12.0	11.8
$P(V) \cdot P(S)$ (%)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Indépendant	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Erreur relative indépendance moyenne	6%	6.5%	0.87%	7%	0.15%	5.4%

Figure III.6.a Dépendance entre le vent et les surcotes ( $v_0=5\text{m/s}$ ,  $\sigma=10\text{cm}$ , et  $\alpha=90$ )  
Influence de l'inertie



$\tau$	3h	6h	24h		72h	
$\delta\tau$	3h	6h	6h	24h	12h	24h
$P(V \cap S)$ (%)	0.2	0.2	0.19	0.26	0.23	0.26
$P(V)$ (%)	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
$P(S)$ (%)	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3
$P(V S)$ (%)	1.6	1.7	1.5	2.1	1.9	2.1
$P(S V)$ (%)	12.1	12.1	11.3	15.3	12.7	15.3
$P(V) \cdot P(S)$ (%)	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
Indépendant	oui	oui	oui	oui	oui	non
Erreur relative indépendance moyenne	4%	2%	9.8%	14%	7.4%	22%

*Figure III.6.b Dépendance entre le vent et les surcotes ( $v_0=10\text{m/s}$ ,  $\sigma=10\text{cm}$ , et  $\alpha=90^\circ$ )  
Influence de l'inertie*

On suppose que V et S sont indépendants lorsque l'erreur relative indépendance moyenne est inférieure à 15%.

Ces deux tableaux nous confortent dans nos hypothèses. Dans le cas d'un vent faible et d'une forte surcote, sont deux événements indépendants peu importe les valeurs d'inertie que l'on prendra, alors qu'un vent moyen et une forte surcote est un événement qui devient dépendant lorsque l'inertie augmente.

# Conclusion

Puisqu'il est important de pouvoir prédire avec le plus de précision possible les variations de hauteur d'eau, nous avons essayé de mettre en lumière les différentes influences des phénomènes naturels sur la hauteur d'eau durant notre étude. Nous en avons quatre : la température, la pression atmosphérique, les marées et le vent. Nous nous sommes plus particulièrement penchés sur les deux derniers phénomènes.

La température influe de manière périodique sur la hauteur d'eau suite à l'effet stérique. Alors que la pression agit de manière plus occasionnelle suivant l'effet barométrique inverse.

Pour étudier le phénomène des marées, nous avons récupérés les données du programme HTM-NET de hauteur d'eau. Le but étant d'isoler les marées grâce à la fonction Fast Fourier Transform (FFT) du logiciel Matlab, nous avons dû dans un premier temps faire un rapide traitement des données, c'est-à-dire compléter les vides de données par des zéros. On a pu ensuite lancer la FFT. On obtient alors un pic à 12h qui est le plus important en amplitude et ce qui correspond bien à ce qu'on devait obtenir puisqu'on a affaire à une marée semi-diurne. De plus, on observe plusieurs harmoniques. Cependant, on a pu observer des pics beaucoup moins significatifs de période de 20min et 45min, ce qui correspond à la période des seiches (ondes stationnaires) de la rade de Toulon.

Enfin, nous avons voulu montrer l'influence du vent sur la hauteur d'eau. Pour cela nous avons décidé de faire une étude mathématique qui montre la dépendance ou non du vent sur les surcotes. Nous avons commencé par faire une moyenne glissante de la hauteur d'eau pour enlever toutes les variations périodiques d'eau, c'est-à-dire la marée et les seiches. Ainsi nous pouvons isoler le plus possible le facteur vent. Une fois ce traitement des données, nous avons défini deux événements : l'événement « il y a du vent » et l'événement « il y a une surcote ». Notre étude regarde la dépendance de ces deux événements. Nous arrivons à la conclusion que les événements ont tendance à dépendre l'un de l'autre quand la surcote et le vent sont forts et plutôt quand le vent vient d'est. A l'inverse, ils sont indépendants lorsque le vent et la surcote sont faibles. De plus nous avons pris en compte l'inertie que le vent pouvait avoir sur le niveau de l'eau. Plus nous estimons cette inertie grande, plus les événements sont dépendants.

En conclusion, nous avons pu étudier et prouver que chaque phénomène que nous avons étudié a bien une influence sur le niveau d'eau. Néanmoins, tous ces phénomènes n'agissent jamais seul. En fait ils agissent tous en synergie ce qui rend difficile la possibilité de dire à quel phénomène naturel est dû cette variation d'eau.

Pour prolonger ce projet, nous aurions pu exploiter plusieurs pistes de travail. Parmi celles-ci, il y a le phénomène de seiches dans la rade de Toulon qui peut être traité plus en profondeur, notamment concernant son analyse fréquentielle qui, comme nous avons vu, est incomplète avec une simple FFT. Nous aurions pu effectuer un travail en temps-fréquence, notamment à l'aide d'une transformée de Fourier à court terme qui convient plus dans le cas des seiches qui sont des phénomènes périodiques mais dont leur fréquence d'apparition est, elle, apériodique. Une représentation aura donc pu nous permettre d'étudier le lien entre apparition de seiche et épisode de vent.

# Bibliographie

- 1) V.REY, G. ROUGIER, D. MALLARINO C. DUFRESNE, I. TAUPIER-LETAGE  
*Apport d'un réseau de mesures des niveaux d'eau et de température à la compréhension de la dynamique côtière : Exemple du littoral de l'agglomération toulonnaise* XVèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil La Rochelle, 29 au 31 mai 2018
- 2) F. ARDHUIN, E.DEVAUX, L. PINEAU-GUILLOU *Observation et prévision des seiches sur la côte Atlantique française* XIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Les Sables d'Olonne, 22-25 juin 2010
- 3) C. Millot, R. Broyard, O. Metais, J.Time *Les oscillations propres de la rade de Toulon* Oceanologica acta 1981 vol 4 N°3
- 4) A.B. Rabinovich *Seiches and Harbor Oscillations* Handbook of Coastal and Ocean Engineering. World Scientific Singapore 2009 chap 9
- 5) [www.shom.fr](http://www.shom.fr) site du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine consulté 06.2019
- 6) [htmnet.mio.osupytheas.fr](http://htmnet.mio.osupytheas.fr) site du projet HTM NET consulté 06.2019
- 7) N.Jarry *Etudes expérimentales et numérique de la propagation des vagues au dessus de bathymétries complexes en milieu côtier* 16.dec.2019
- 8) L. Pineau-Guilou F.Ardhuin, M.-N. Bouin, J.-L. Redelsperger *Ocean-Atmosphere Interaction Improvement of wind stress for coastal physical modelling*
- 9) Daniel Pereira  
<https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47248-wind-rose>
- 10) <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-vents-regionaux>
- 11) [https://wwz.ifremer.fr/content/download/82896/1041242/file/14\\_12\\_10\\_trafic-maritime-mondial.pdf](https://wwz.ifremer.fr/content/download/82896/1041242/file/14_12_10_trafic-maritime-mondial.pdf)

## Annexes :

### Glossaire

- *Anticyclone* : système météo qui correspond à une augmentation de la pression atmosphérique. C'est souvent annonciateur de beau temps
- *Barométrie* : étude de la pression
- *Basculement* : basculement de la masse d'eau observée suite à l'action du windstress. Dans un bassin fermé on va alors observer une montée des eaux d'un côté et une baisse du niveau d'eau de l'autre côté
- *Bathymétrie* : topologie des fonds sous-marins
- *Décote* : niveau d'eau prédit non atteint
- *Dépression* : système météo qui correspond à une diminution de la pression atmosphérique. Une dépression entraîne souvent une dégradation du temps (fort vent...)
- *Effet barométrique inverse* : annulation de la marée lunaire dû à la pression atmosphérique
- *Fetch* : distance où le vent souffle sans rencontrer d'obstacle
- *Houle* : Mouvement ondulatoire de grande amplitude qui agite la surface de la mer en y formant des ondes dont les crêtes s'arrondissent sans déferler. (CNRTL) C'est une conséquence de vague créée par le vent qui se sont harmonisés en s'éloignant du vent
- *Levant* : vent d'est modéré à fort qui souffle sur les Alpes du Sud et le littoral méditerranéen jusqu'en Corse
- *Marin* : vent de sud-est souvent accompagné de pluie
- *Marée (semi)diurne* : marée d'une période de (12h) 24h
- *Mer du vent* : vagues irrégulières de périodes très courtes créées par le vent
- *Mistral* : vent fort de secteur ouest dans la région varoise
- *Ondes longues* : ondes de très grande période (exemple : marée)
- *Ondes de surface* : ondes de période courte (exemple : houle, vagues...)
- *Ondes infragravitaires* : onde longue ou groupe de vagues de même sens de propagation que ces dernières
- *Pression* : Force exercée normalement sur une surface par un fluide, un corps pesant ; mesure de cette force rapportée à l'unité de surface. (CNRTL) la pression de l'atmosphère est en moyenne en France de 1013 hPa
- *Seiches* : phénomène d'onde stationnaire dans un port, une rade qui peut rentrer en résonance et ainsi bloquer la navigation. C'est la houle qui est à l'origine de ce phénomène
- *Surcote* : dépassement du niveau d'eau prédit
- *Nodal* : Qui concerne les nœuds d'une surface vibrante ou d'une corde (CNRTL) ici de la seiche
- *Tramontane* : vent fort de secteur nord-ouest qui souffle sur la côte méditerranéenne
- *Vagues* : une onde de gravité provoquée par plusieurs phénomènes possibles allant du mouvement d'un bateau à une onde sismique sous-marine
- *Windstress* : force de cisaillement à la surface de l'eau suite à l'action du vent.

## Annexe A : Analyse fréquentielle

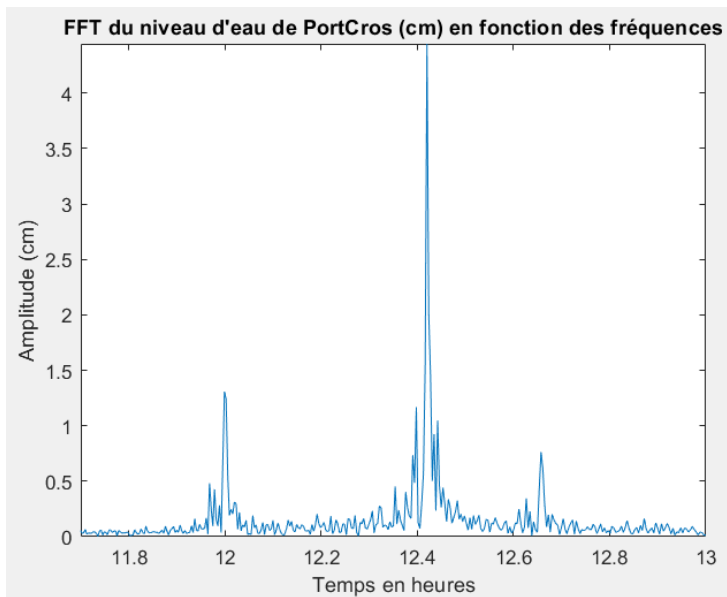
```
% Travail FFT

Y=fft(wlz); %Transformé de Fourier de wlz : niveau d'eau traité : trous + interpolé
T=600; %Nous avons des données toutes les 10 minutes ie 600s
Fe=1/T;
L=length(wlz); %Taille du vecteur wlz : niveau d'eau traité
P2 = abs(Y/L); %spectre bilatéral P2
P1 = P2(1:L/2+1); %spectre unilatéral P1
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fe*(0:(L/2))/L;

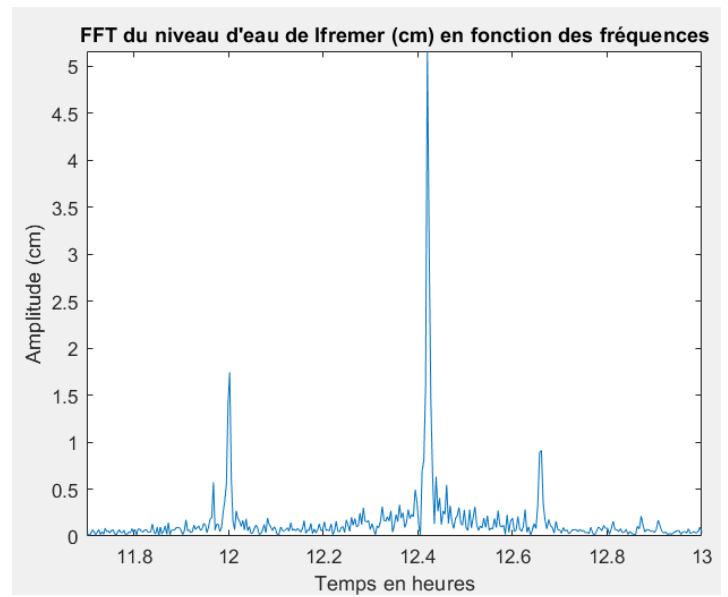
plot(f,P1*100)
title("FFT du niveau d'eau de Ifremer (cm) en fonction des fréquences");
xlabel("Fréquences (Hz)")
ylabel("Amplitude (cm)")

plot(1./(3600*f),P1*100)
axis([5 25 0 inf])
title("FFT du niveau d'eau de Ifremer (cm) en fonction des fréquences");
xlabel("Temps en heures")
ylabel("Amplitude (cm)")
```

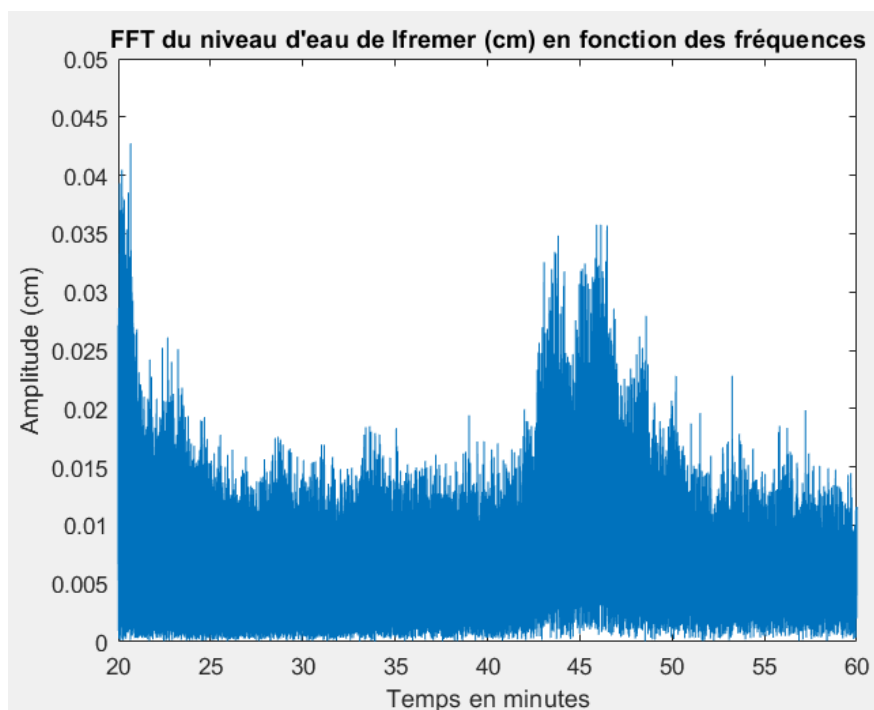
*Figure A.1 : Programme de transformé de Fourier pour tracer les fft en fonction des fréquences, du temps.*



*Figure A.2 : Pic de FFT de marré de PortCros*



*Figure A.3 : Pic de FFT de marré d'Ifremer*



*Figure A.4 : Pic FFT de seiche d'Ifremer*



## Annexe B : Roses des vents

```
i=1;
L=zeros(63,1);
L(1)=i;
for j=1:62 %On récupère les indices des différents sauts de mois
    k=i;
    datei=datestr(TIME(i));
    dateii=datestr(TIME(i+1));
    while datei(4:6)==dateii(4:6) %datei(4:6) correspond au mois, ex='Jun', on regarde quand il y a un saut de mois
        datei=datestr(TIME(i));
        dateii=datestr(TIME(i+1));
        i=i+1;
    end
    L(j+1)=i;
    WindRose(dir(k:i-1),spd(k:i-1)) %On trace et enregistre les différentes roses
    title("Toulon-"+datei(4:11));
    saveas(j,"Toulon-"+datei(4:11)+".png")
end
```

*Figure B.1 : Programme traçant les roses des vents au format :  
mois - années - station*

```
i=1;
L=zeros(6,1);
L(1)=i;

for i=1:size(dir) %On élimine une composante parasite sur les données de vents de Toulon
    if (i>=3196)&(i<=3196)
        dir(i)=NaN
    end
end

for j=1:6 %On récupère les rangs des passages d'une année à une autre.
    k=i;
    datei=datestr(TIME(i));
    dateii=datestr(TIME(i+1));
    while datei(8:11)==dateii(8:11) %datei(8:11) correspond au texte de l'année
        datei=datestr(TIME(i));
        dateii=datestr(TIME(i+1));
        i=i+1;
    end
    i;
    L(j+1)=i;
end

for i=1:6 %On trace et on enregistre les différentes roses des vents
    DIR=dir(L(i):L(i+1)-1);
    SPD=spd(L(i):L(i+1)-1);
    figure(i)
    datei=datestr(TIME(L(i)));
    WindRose(DIR,SPD)
    title("Toulon-"+datei(8:11));
    saveas(i+1,"Toulon-"+datei(8:11)+".png")
end
```

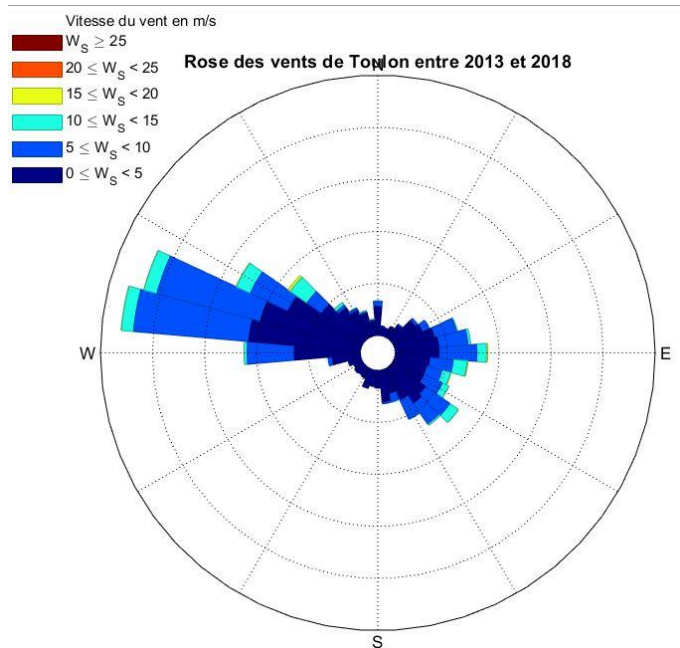
*Figure B.2 : Programme traçant les roses des vents au format : années - station*

```
DirJan=[];DirFeb=[];DirMar=[];DirApr=[];DirMay=[];DirJun=[];DirJul=[];DirAug=[];DirSep=[];DirOct=[];DirNov=[];DirDec=[];
SpdJan=[];SpdFeb=[];SpdMar=[];SpdApr=[];SpdMay=[];SpdJun=[];SpdJul=[];SpdAug=[];SpdSep=[];SpdOct=[];SpdNov=[];SpdDec=[];
```

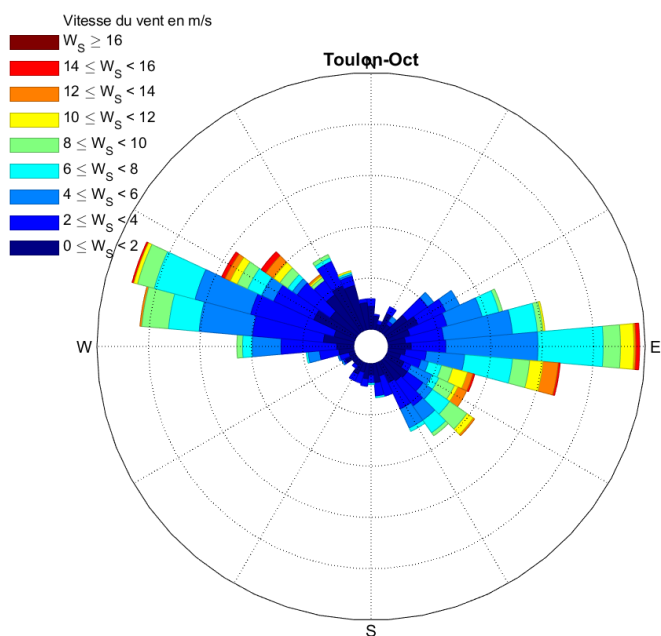
```
for i=1:size(TIME)
    datei=datestr(TIME(i));
    if datei(4:6)=="Jan"
        DirJan=[DirJan dir(i)];
        SpdJan=[SpdJan spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Feb"
        DirFeb=[DirFeb dir(i)];
        SpdFeb=[SpdFeb spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Mar"
        DirMar=[DirMar dir(i)];
        SpdMar=[SpdMar spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Apr"
        DirApr=[DirApr dir(i)];
        SpdApr=[SpdApr spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="May"
        DirMay=[DirMay dir(i)];
        SpdMay=[SpdMay spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Jun"
        DirJun=[DirJun dir(i)];
        SpdJun=[SpdJun spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Jul"
        DirJul=[DirJul dir(i)];
        SpdJul=[SpdJul spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Aug"
        DirAug=[DirAug dir(i)];
        SpdAug=[SpdAug spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Sep"
        DirSep=[DirSep dir(i)];
        SpdSep=[SpdSep spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Oct"
        DirOct=[DirOct dir(i)];
        SpdOct=[SpdOct spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Nov"
        DirNov=[DirNov dir(i)];
        SpdNov=[SpdNov spd(i)];
    end
    if datei(4:6)=="Dec"
        DirDec=[DirDec dir(i)];
        SpdDec=[SpdDec spd(i)];
    end
end
```

```
WindRose(DirJan,SpdJan)
title("Toulon-"+Jan);
saveas(1,"Toulon-"+Jan+".png")
WindRose(DirFeb,SpdFeb)
title("Toulon-"+Feb);
saveas(2,"Toulon-"+Feb+".png")
WindRose(DirMar,SpdMar)
title("Toulon-"+Mar);
saveas(3,"Toulon-"+Mar+".png")
WindRose(DirApr,SpdApr)
title("Toulon-"+Apr);
saveas(4,"Toulon-"+Apr+".png")
WindRose(DirMay,SpdMay)
title("Toulon-"+May);
saveas(5,"Toulon-"+May+".png")
WindRose(DirJun,SpdJun)
title("Toulon-"+Jun);
saveas(6,"Toulon-"+Jun+".png")
WindRose(DirJul,SpdJul)
title("Toulon-"+Jul);
saveas(7,"Toulon-"+Jul+".png")
WindRose(DirAug,SpdAug)
title("Toulon-"+Aug);
saveas(7,"Toulon-"+Aug+".png")
WindRose(DirSep,SpdSep)
title("Toulon-"+Sep);
saveas(8,"Toulon-"+Sep+".png")
WindRose(DirOct,SpdOct)
title("Toulon-"+Oct);
saveas(9,"Toulon-"+Oct+".png")
WindRose(DirNov,SpdNov)
title("Toulon-"+Nov);
saveas(10,"Toulon-"+Nov+".png")
WindRose(DirDec,SpdDec)
```

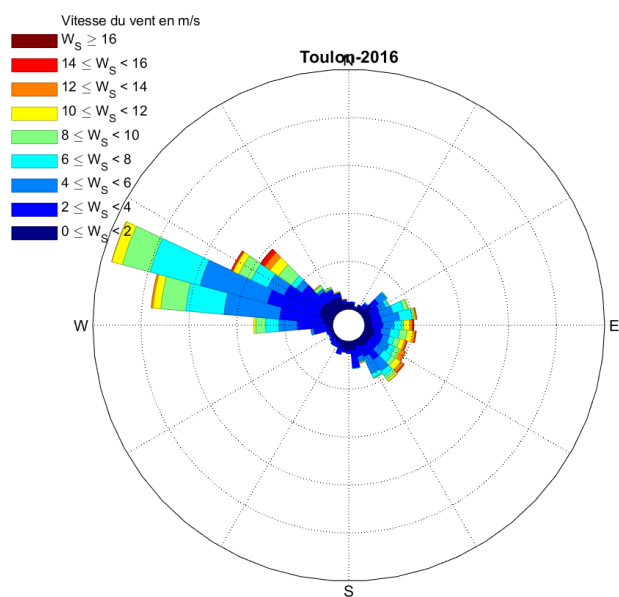
*Figure B.3 : Programme traçant les roses des vents au format :  
mois – station*



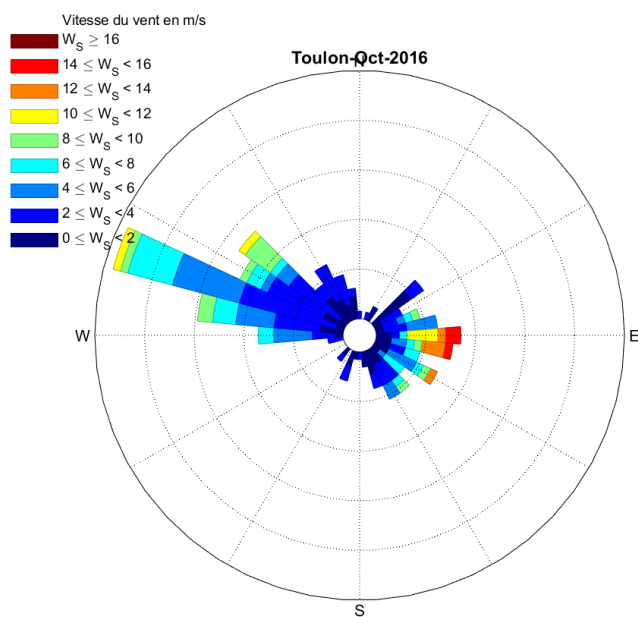
*Figure B.4 : Rose Toulon  
sur 2013-2018*



*Figure B.5 : Rose Toulon  
de tous les mois  
d'octobres de 2013 à  
2018*



*Figure B.6 : Rose Toulon  
de 2016*



*Figure B.7 : Rose Toulon  
d'octobre 2016*

## Annexe C : Traitement des niveaux d'eau

```
TS1=TS;
tsy = [datetime(2014,01,1,10,10,0):datetime(0,0,0,0,10,0):datetime(2018,10,6,17,40,0)]'; %création du bon vecteur tp
[TS, index] = unique(TS); %triage des temps
wly = interp1(TS,WL(index),tsy,'linear'); %interpolation
wlz=progLeo3(wly); %remplissage avec des 0 et soustraction de la moyenne
```

Figure C.1: Programme d'interpolation

```
function [WL] = progLeo3(WL) % fonction qui remplit de 0 et enlève la moyenne
    WL(isnan(WL)) = [0];
    c=0;
    s=0;
    for i=1:length(WL)
        if WL(i)~=0
            c=c+1;
            s=s+WL(i);
        end
    end
    m=s/c;
    for i=1:length(WL)
        if WL(i)~=0
            WL(i)=WL(i)-m;
        end
    end
end
```

Figure C.2: Programme qui remplit de 0 et enlève la moyenne

```
W=[];
T=[];
pas=72;
for (i=pas+1 : length(tsy)-pas)
    W=[W mean(wlz(i-pas:i+pas))];
    T=[T tsy(i)];
end
WL=W;
TS=T;
```

Figure C.3: Programme de moyenne glissante pour retirer la composante de marré

```

load('mgiCOUPE>Ifremer_TS_WL.mat')
TIME=TS;
i=1;
L=zeros(63,1);
L(1)=i;
for j=1:63
    k=i;
    datei=datestr(TIME(i));
    dateii=datestr(TIME(i+1));
    while datei(4:6)==dateii(4:6)
        datei=datestr(TIME(i));
        dateii=datestr(TIME(i+1));
        i=i+1;
    end
    L(j+1)=i;
figure(j)
TSi=TS(L(j):L(j+1)-1);
WLi=WL(L(j):L(j+1)-1);
load('mgiCOUPE>PortCros_TS_WL.mat')
TSp=TS(L(j):L(j+1)-1);
WLP=WL(L(j):L(j+1)-1);
plot(TSi,WLi,'r',TSp,WLP,'b')
load('mgiCOUPE>Ifremer_TS_WL.mat')
datetick('x','ddmmm','keepticks')

title("PortCros (bleu) - Ifremer (rouge)" + datei(4:11));
saveas(j,"PortCros (bleu) - Ifremer (rouge)" + datei(4:11) + ".png")
end

```

Figure C.4: Programme traçant les niveaux d'eau de PortCros, Ifremer sur tous les mois entre le 24 décembre 2014 et 6 juillet 2017.

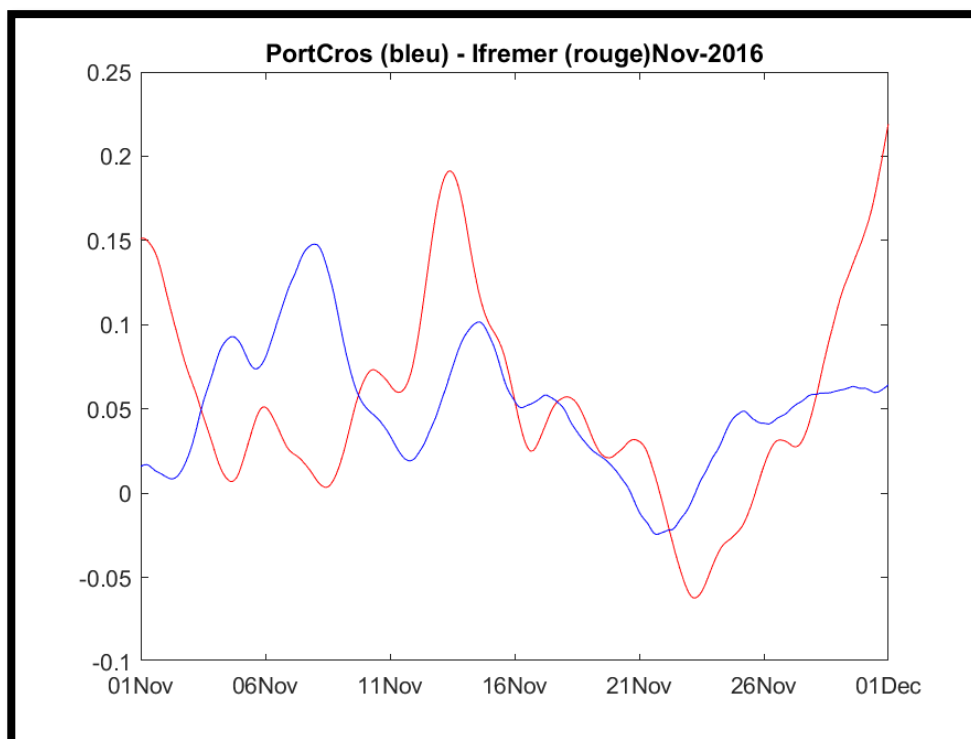


Figure C.5 : Niveaux d'eau (cm) d>Ifremer et PortCros en fonction du temps

## Annexe D : Programme d'indépendance entre vent et décote/surcote

```
1 clear all
2 %on charge des données traitées au préalable
3 %traitement : moyenne glissante, interpolation, même date debut et fin
4 tic(); %calcul du temps d'execution
5
6 load toulon_dir_spd.mat;
7
8 load mgiCOUPE_PortCros_TS_WL.mat
9 WLpc=WL;
10 load mgiCOUPE>Ifremer_TS_WL.mat
11 WLifr=WL;
```

*Figure D.1: Changement des données*

```
13 %
14 % parametres de recherche
15 %
16 eps1=0.1; %decote en mètre
17 t0=3; %inertie de la mer en heure
18 tp=3; %marge sur l'inertie en h
19
20 v0=5; %alpha minimum m/s
21 eps=40; %erreur angulaire en deg
22 alpha=90; %provenance du vent en deg
23 %
```

*Figure D.2: Définition des paramètres*

```
23 %
24
25 %on recrée la liste de temps
26 TIME=[datenum(2014,12,24,15,0,0):datenum(0,0,0,3,0,0):datenum(2018,12,31,21,0,0)];
27
28 %on remet TIME a la bonne fin, le début est déjà bon
29 e=length(TIME);
30 while TIME(e)>TS(end)
31     e=e-1;
32 end
33 TIME=TIME(1:e+1);
34 dir=dir(1:e+1);
35 spd=spd(1:e+1);
36
```

*Figure D.3: Création de la nouvelle liste de temps*



```

37 %
38 %             recherche de vent
39 %             Nb de fois où il y a un vent intéressant
40 %
41
42 I=[];          %liste des indices de TIME qui ont un vent "intéressant"
43 for i=1:length(TIME)
44     if and((alpha-eps)<dir(i),dir(i)<(alpha+eps), spd(i)>v0)
45         %si le vent vient de alpha+/-eps avec une vitesse supérieur a v0
46         I=[I i];
47     end
48 end

```

*Figure D.4 : Recherche du vent supérieur à  $V_0$  et de la bonne direction*

```

50 %
51 %             recherche de décotes
52 %             Nb de fois où il y a une décote
53 %
54
55 %on ne garde que 1 valeur toutes les 3h, les indices de TSr et TIME
56 % correspondront aux mêmes heures
57 pas=3*6; %le pas de sur-échantillonnage
58 WLpcr=WLpc(1:pas:end);
59 WLifrr=WLifr(1:pas:end);
60 TSr=TS(1:pas:end);
61
62 %si le vent vient globalement d'ouest, on recherche les surcotes en faveur
63 %de port -cros
64 if and(alpha<360, alpha>180)
65     [m,i]=sort(WLpcr-WLifrr);
66 elseif and(alpha>0, alpha<180)
67     [m,i]=sort(WLifrr-WLpcr);
68 end
69
70 %on garde que les e dernières (plus grade de eps1)
71 e=length(m);
72 while m(e)>eps1;
73     e=e-1;
74 end
75 m=m(e:end);
76 i=i(e:end);

```

*Figure D.5 : Recherche des surcotes*

```

80 % vent intéressant et surcote
81 %
82 i=sort(i, 'ascend');
83 I=sort(I, 'ascend');
84
85 A=[];
86 for e=i
87     for k=(-t0-tp)/3:(-t0+tp)/3
88         if find(I==k+e)
89             A=[A e+k];
90             break; %on ne compte qu'une fois
91         end
92     end
93 end
94 A=unique(A); %permet d'enlever les doublons : les vents qui influent
95 nb_decote_vent=length(A); %plusieurs surcotes

```

Figure D.6 : Recherche de vent et surcote (intersection de S et V)

```

97 nb_vent=length(I);
98 nb_surcote=length(i);
99 nb_total=length(TIME);
100 PVIS=nb_decote_alpha/nb_total %probabilité de V et S
101 PV=nb_vent/nb_total %probabilité de V
102 PS=nb_surcote/nb_total %probabilité de S
103 PVS=PVIS/PS %probabilité de V sachant S
104 PSV=PVIS/PV %probabilité de S sachant V
105 PVxPS=PV*PS
106
107 toc()

```

Figure D.7 : Calcul des probabilités