



INSTITUT DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DE TOULON ET DU VAR

PROJET – SUJET : ETUDES DES SEICHES DANS LA RADE DE TOULON



2° Année Marine

Février 2009

Aït Amrouche Manon - Berliat Alizée - Lascombes Fanny - Couvelard Laurent - Hermitte Florent -
de Lestang Parade Etienne - Moorria Vaitua - Tréhin Ambre

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord Monsieur Francius, notre directeur de projet, Maître de conférence, qui nous a guidé tout au long de ce projet.

Nous remercions également Monsieur Tedeschi, Monsieur Sambe et Monsieur Trainini qui nous ont accordé quelques moments afin de nous aider et Mr Millot pour ses précieuses informations.

Enfin, nous souhaitons remercier ceux qui nous ont fourni des informations qui nous ont permis de réaliser notre étude.

Les seiches (voir sujet de TP Mécanique des Fluides) sont souvent observées dans les ports, les lacs, les baies et dans presque tout bassin de taille moyenne. Les seiches sont des événements ponctuels et relativement brefs dans le temps, de l'ordre de quelques heures à quelques jours. Celles qui sont souvent observées dans les ports ou les baies peuvent provoquer des dégâts importants à cause des forces horizontales importantes qui sont appliquées sur les bateaux et des inondations qui affectent les structures côtières.

L'objectif de ce projet est de mettre en évidence le phénomène des seiches sur les côtes françaises méditerranéennes du Golfe du Lion et de décrire, éventuellement, les causes possibles de ces oscillations anormales du niveau de l'eau. On s'intéressera plus particulièrement au port de Toulon. Par ailleurs, cette étude reposera sur une triple démarche.

La première étape consiste à la recherche et l'utilisation de données adaptées aux objectifs de ce projet, à savoir des études antérieures, cartes bathymétriques, météorologie de la région, réseaux de bouées dans le Golfe du Lion, etc...

La seconde aura pour but de déterminer les modes propres du port de Toulon à partir de l'analyse fréquentielle de données marégraphiques.

Enfin, on essaiera de développer un modèle numérique simplifié permettant de calculer les caractéristiques des seiches dans un bassin fermé. Ces résultats seront comparés à une analyse fréquentielle.

SOMMAIRE

I – PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES SEICHES **6**

I-1- DEFINITION : QU'EST CE QU'UNE SEICHE ?	6
I-1-1- Bref historique	6
I-1-1-1- Origine du mot « seiche »	6
I-1-1-2- Les seiches en mer et dans les ports maritimes	6
I-1-2- Les seiches dans la grande famille des ondes de gravité	7
I-1-3- Définition	8
I-2- ORIGINE DES SEICHES	9
I-2-1- Considérations préliminaires	9
I-2-2- Circonstances dans lesquelles peuvent se produire des seiches s'amplitude notable	9
I-2-3- Causes initiales des seiches	10
I-2-3-1- Causes quasi périodiques	11
I-2-3-2- Causes particulières fréquentes	12
I-3- PROPRIETES PHYSIQUES	13
I-3-1- Caractérisation des ondes de seiches	13
I-3-2- Longévité	14
I-3-3- Analogie optique	14
I- 4- QUELQUES EXEMPLES	14
I- 5- PROBLEMES ENGENDRES PAR LES SEICHES	17
I-5-1- Les problèmes d'amarrage dans les ports	17
I-5-2- Les problèmes de courant dans les ports	18
I-5-3- Les problèmes générés par les mouvements verticaux	18

II – ANALYSE DES DONNEES **19**

II-1- COLLECTE DES DONNEES	19
II- 2- ANALYSE ET RESULTATS	22
II-2-1- Première approche	22
II-2-2- Second programme : analyse et résultats	23
II-2-2-1- Vérification des données	23
II-2-2-2- Analyse spectrale en Série de Fourier par année	24
II-3- ANALYSE EN ONDELETTES PAR MOIS	28

III - MODELISATION NUMERIQUE	42
III-1- COMPARAISON DES DIFFERENTS LOGICIELS DE MODELISATION HYDRODYNAMIQUE	42
III-1-1- Modèle Mars	42
III-1-2- Logiciel Refonde	46
III-1-3- Avantages et inconvénients	49
III-2- MODELE A UNE DIMENSION	50
III-2-1-Choix du modèle	50
III-2-2-Position du problème	50
III-2-3-Discretisation du problème	51
III-2-4-Codage du problème (voir Annexe 1)	52
III-2-5-Analyse des résultats	53
III-2-6-Application expérimentale (voir Annexe 2)	55
III-2-6-1-Protocole expérimental :	55
III-2-6-2-Etalonnage des sondes, traitement des données	55
III-2-6-3-Fond plat sans obstacle	57
III-2-6-4-Fond avec trois briques	60
III-3- MODELE A DEUX DIMENSIONS	61
III-3-1-Position du problème	61
III-3-2-Discretisation du problème	62
III-3-3-Codage	63
III-3-4-Analyse des résultats	64
CONCLUSION :	65
BIBLIOGRAPHIE	66

I – PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES SEICHES

I-1- DEFINITION : QU'EST CE QU'UNE SEICHE ?

I-1-1- BREF HISTORIQUE

I-1-1-1- Origine du mot « seiche »

Les seiches sont un phénomène connu depuis bien longtemps, notamment pour le Lac de Genève. En effet les bateliers du Lac Léman, désignaient par le mot « seiche » les oscillations lentes du niveau de l'eau. De remarquables seiches ont d'ailleurs été observées dans le lac dont la variation de niveau d'eau au début de la seiche dépassait 1.5m.

En 1730, l'ingénieur suisse DUILLER souligna que certaines causes de ses phénomènes pouvaient être météorologiques.

En 1755, le tremblement de Lisbonne fut à l'origine d'impressionnantes seiches dans les lacs d'Ecosse. En effet, dans le Loch Lomond le niveau de l'eau s'éleva rapidement de 76 centimètres avant de redescendre, après 5 minutes, en dessous des plus bas niveaux observés en été. 5 minutes plus tard l'eau remonta jusqu'au niveau maximum et ainsi de suite. L'oscillation dura près de deux heures en décroissance d'amplitude.

Ce n'est qu'en 1869, grâce au docteur FOREL, que sont faites les premières observations systématiques sur le Lac Léman. En effet celui-ci applique, sur le Lac, et ceci moyennant certaines approximations, la formule de MERIAN, établie en 1828, pour les ondes stationnaires en profondeur constante :

$$T = \frac{2.l}{\sqrt{gh}}$$

Avec :

T la période d'oscillation, h la profondeur moyenne du lac, l sa longueur.

Cette formule fut par la suite affinée et exploitée par CHRYSTAL. En effet en 1907, celui-ci résolut mathématiquement de nombreux cas de mouvements des seiches contenus dans des bassins à profondeur variable, de formes géométriques simples.

Enfin, c'est en 1915 que STERNECK utilisa les premières méthodes de calcul numériques dans les études des seiches.

I-1-1-2- Les seiches en mer et dans les ports maritimes

Ainsi par analogie on a désigné par « seiches » certaines oscillations lentes du niveau de la mer dans les ports ou les baies.

Généralement d'autres phénomènes tels que la marée ou la houle viennent masquer ces « seiches marines » et celles-ci n'ont été l'objet d'observations systématiques que bien après les seiches observées dans les lacs. Toutefois, on retrouve dans le récit de faits très antérieurs des observations de seiche en mer.

En 1818, AIRY étudia un balancement de 21 minutes à Malte. Puis en 1908, l'école japonaise de HONDA applique aux baies les théories inventées par WEIERSTRASS en 1858 et mises au point par Lord RAYLEIGH en 1880, basées sur les principes élémentaires de la

mécanique. Elle réalise ainsi les premiers modèles réduits permettant la reconstitution de seiches marines en étudiant systématiquement toutes les baies du Japon, la baie de San Francisco, etc.

Les études des seiches dans les ports sont encore plus récentes. En effet, c'est seulement en 1864 que Thomas STEVENSON fait une étude sur la rupture des amarres causée par les seiches.

On peut également citer les études approfondies faites par le grand spécialiste des seiches WILSON, sur le port de Table Bay et l'examen du mouvement d'un navire amarré soumis à une seiche.

I-1-2- LES SEICHES DANS LA GRANDE FAMILLE DES ONDES DE GRAVITE

Comme nous venons de le voir il existe divers types de seiches. Nous allons donc voir quelles caractéristiques communes peuvent nous permettre de mettre en évidence leur parenté.

Tout d'abord nous pouvons remarquer le caractère oscillatoire de l'eau. En effet le niveau de l'eau monte et baisse de façon alternative ou alors ce sont les courants qui vont dans un sens puis dans l'autre. Mais cette variation remarquable du niveau de l'eau n'est pas une caractéristique suffisante du phénomène de seiche car on le retrouve également dans d'autres phénomènes tels que les vagues ou encore les marées.

Ainsi le critère qui nous permet de distinguer les seiches à travers tous ces phénomènes est la fréquence.

La figure ci-dessus représente l'énergie oscillatoire de l'océan en fonction des différents types d'ondes qui le parcourent :

Ainsi on retrouve :

- Les ondes de capillarité, petites rides générées par le vent, de période inférieure à 1 seconde, se dissipant rapidement par frottement interne à la masse d'eau,
- Les ondes de gravité, regroupant :
 - la houle et la mer du vent, générant une énergie importante. Leur principale source d'amortissement est la pesanteur;
 - les ondes longues, de période supérieure à 30 secondes, générées principalement par des variations à grande échelle et sensibles à la force de Coriolis.

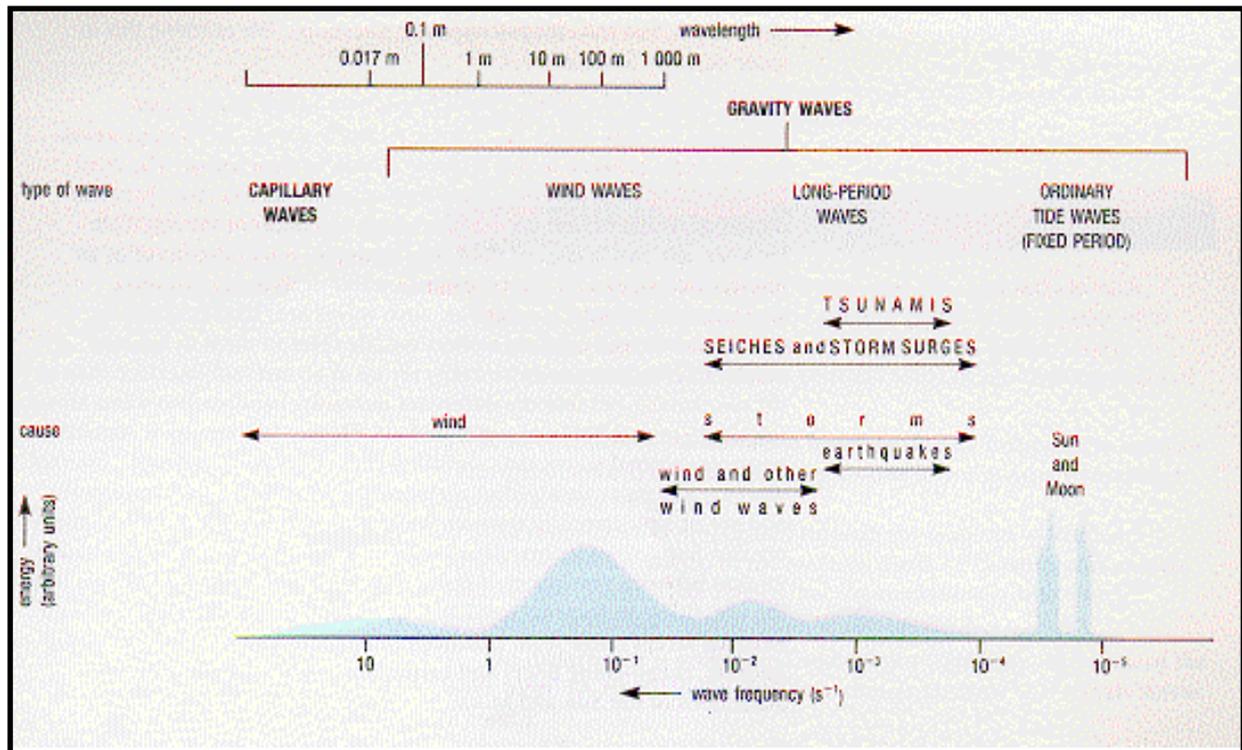


Figure 1: Distribution de l'énergie des ondes à la surface des océans

I-1-3- DEFINITION

Sur la figure ci-dessus, on observe deux groupes dont l'amplitude est normalement importante : les vagues de tempête, dont la période est comprise entre quelques secondes et une demi-minutes, et les ondes de marée dont la période est de l'ordre de la demi-journée.

On place alors, par définition, les seiches entre ces deux types d'onde. Il faudra toutefois aussi faire une distinction entre les seiches à caractère stationnaire, telles que celles que l'on retrouve dans les lacs, les ports et les baies fermées, que l'on appellera « seiches » et les oscillations ayant un caractère d'onde progressive mais dont les fréquences sont du même ordre de grandeur, que l'on appellera « ondes de seiches ».

Plus généralement nous retiendrons comme définition :

« Les seiches et ondes de seiches sont des mouvements oscillatoires des étendues d'eau rentrant dans la catégorie générale des ondes de gravité et dont la période est comprise entre celle des vagues de tempête les plus longues et celles des marées semi-diurnes. Les ondes de seiches sont la forme progressive de ces oscillations, et les seiches la forme stationnaire se produisant dans des étendues d'eau plus ou moins fermées. »

Nous considérons que la limite inférieure des périodes des ondulations considérées comme des seiches est, en mer, d'environ 30 secondes et beaucoup plus faible dans les lacs. Nous pouvons aussi considérer que l'amplitude des seiches est, en général, très faible et n'atteint des valeurs un peu importantes que dans des cas exceptionnels (tremblement de terre, explosion atomique sous marine) ou du fait de la disposition particulière d'une localité (phénomène de résonance).

I-2- ORIGINE DES SEICHES

I-2-1- CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES

Les ondes de seiches qui sont généralement d'amplitude très faible, sont souvent marquées par des phénomènes de plus courtes périodes, en particulier par des vagues dues au vent. Par conséquent, les appareils conçus pour mesurer ces dernières ne peuvent, en général, permettre de déceler la présence des seiches et il est nécessaire d'utiliser des instruments spéciaux pour les mesurer. Cependant, chaque fois que des mesures de ce genre ont été tentées avec des instruments suffisamment sensibles, elles ont confirmé que la zone du spectre comprise entre les houles de tempête et les ondes de marées était généralement occupée par des oscillations de faible amplitude. On peut donc légitimement se demander pourquoi l'amplitude des seiches est en général si faible par rapport à celles des houles de tempêtes ou de marées. On doit donc rechercher les éléments qui jouent en faveur de l'accroissement de ces deux derniers types d'onde et qui ne jouent pas pour les ondes de seiches.

I-2-2- CIRCONSTANCES DANS LESQUELLES PEUVENT SE PRODUIRE DES SEICHES S'AMPLITUDE NOTABLE

Les seiches ne peuvent bénéficier du vent et des forces atmosphériques pour avoir une amplitude notable. Cependant, on a pu observer des mouvements de seiches importants et même dangereux dans certains endroits ou à certaines époques.

Les causes de ces comportements exceptionnels peuvent se diviser en deux catégories :

- les causes qui forment des ondes de seiches d'amplitude importante dès l'origine
- les causes provoquant, à partir d'ondes d'amplitude initialement très faible, des mouvements d'amplitude importante par suite de divers phénomènes de renforcement.

Nous allons donc étudier successivement ces deux types de causes à l'origine de seiches.

- des seiches de grande amplitude à l'origine, ne pourront être formées que par des phénomènes d'amplitude exceptionnelle ou exceptionnellement adaptés à la formation de ce genre d'onde. Ce type d'événement, apparaissant comme de vrai cataclysme, ont pour exemples typiques les tremblements de terre ou les éruptions volcaniques sous-marines qui peuvent mettre en jeu des puissances énormes.

A l'échelle des lacs ou des rades relativement limitées, des phénomènes moins grandioses peuvent cependant prendre une importance suffisante pour créer des seiches dangereuses. Par exemple des éboulements de terrain dans un lac ou des explosions de bombes atomiques dans des rades.

A une échelle encore plus réduite, telle que pour des bassins ou des darses, des effets importants peuvent être produits par des coups de vent violents, ou encore par des adductions d'eau brutales etc.

Ces phénomènes de grande puissance pourront produire des seiches qui seront sensibles dans des régions très étendues.

Quelques exemples impressionnants:

- Le tremblement de terre de Lisbonne en 1755 qui créa une onde longue majoritaire de période 15 minutes
- L'éruption du Krakatoa en 1883 qui créa des ondes longues très diverses. On observa dans la baie de San Francisco des ondes longues de période 24,34 et 47 minutes. A Honolulu, on observa principalement des ondes longues de période 30 minutes tandis qu'à Cap Town on observa des ondes de période 62 et 10 minutes.

- il peut aussi y avoir des circonstances qui peuvent provoquer le renforcement d'ondes de seiches initialement d'amplitude très faible.

Parmi ces phénomènes, le plus connu est celui de résonance. En effet il est connu que lorsqu'on soumet un système ayant une fréquence de résonance à une excitation de fréquence voisine, il peut y avoir une réponse d'amplitude particulièrement grande. Il y a donc de toute évidence, un mécanisme susceptible de multiplier par un facteur important l'effet des ondes de seiche.

On sait également que lorsque le coefficient de majoration dû à la résonance est très élevé, les mouvements sont pratiquement identiques à ceux résultant des modes d'oscillation libre du système considéré. Cette dernière remarque a pour conséquence que l'étude des seiches se ramènera souvent à celle des modes de résonance propre d'étendues d'eau, au moins en ce qui concerne sa partie descriptive.

On peut aussi remarquer que les phénomènes d'amplification par résonance pourront jouer un rôle d'autant plus net que l'excitation aura elle-même une fréquence plus caractérisée, c'est-à-dire que son énergie se concentrera dans une zone plus étroite du spectre. Ainsi, une source d'ondes de seiches même particulièrement faible peut devenir relativement plus dangereuse si elle est approximativement périodique et si cette période est susceptible de coïncider avec une des périodes propres d'un port ou d'un lac.

Le phénomène de résonance n'est pas le seul qui soit susceptible d'amplifier l'effet des ondes de seiche. Il est également important de noter les causes d'amplification suivantes :

- La réflexion des ondes venant du large sur les côtes convenablement disposées peut conduire à une concentration analogue à celle qui se produit au foyer d'un miroir concave. En fait un bon nombre de ports sujets à des seiches importantes se trouvent situés au voisinage de sections de côtes concaves qui pourraient jouer un tel rôle à leur égard.
- La réfraction auxquelles sont soumises toutes les ondes liquides circulant dans des profondeurs variables. Les ondes longues provenant de certaines sources de perturbation peuvent, en effet, se trouver concentrées sur un point de la côte par un phénomène analogue à celui concentrant les rayons lumineux au foyer d'une lentille convergente.

I-2-3- CAUSES INITIALES DES SEICHES

Des ondes de seiches de très faible amplitude sont créées par n'importe quelle perturbation de la surface de l'eau. Par conséquent, il est inutile de tenter une énumération, qui serait longue et certainement incomplète, de toutes les causes imaginables. C'est pourquoi nous allons juste donner une énumération restreinte des causes de seiche que l'expérience ou le raisonnement ont montrées comme étant particulièrement importantes. Ces principales causes

seraient : les variations de pression atmosphérique, les vents et leurs variations d'intensité ou de direction, les

variations éventuelles d'intensité de précipitations, les perturbations sismiques proches ou lointaines, provoquant ou non un tsunami, une adduction d'eau brutale ou une immersion d'un grand volume (éboulement, chute d'un iceberg...), les harmoniques supérieures des ondes de marées, l'irrégularité de la houle, les instabilités de certains écoulements marins et côtiers.

I-2-3-1- Causes quasi périodiques

Les phénomènes de résonance risquent d'être particulièrement importants pour les excitations ayant une périodicité marquée.

Notons tout d'abord les harmoniques des ondes de marée qui sont rigoureusement périodiques.

Il existe ensuite certains phénomène d'instabilité de courants tels que les tourbillons alternés qui, non seulement peuvent être sensiblement périodiques, mais peuvent aussi adapter leurs périodes à celles d'un système résonnant placé au voisinage. Cette forme d'excitation ne saurait être surprenante étant donné qu'il suffit d'une énergie excessivement faible pour provoquer, à la résonance, un mouvement de seiche très violent.

On peut envisager cette excitation sous diverses formes :

- Des tourbillons alternés de périodes excessivement grandes sont provoqués par le courant de marées contournant une île au voisinage d'un port.

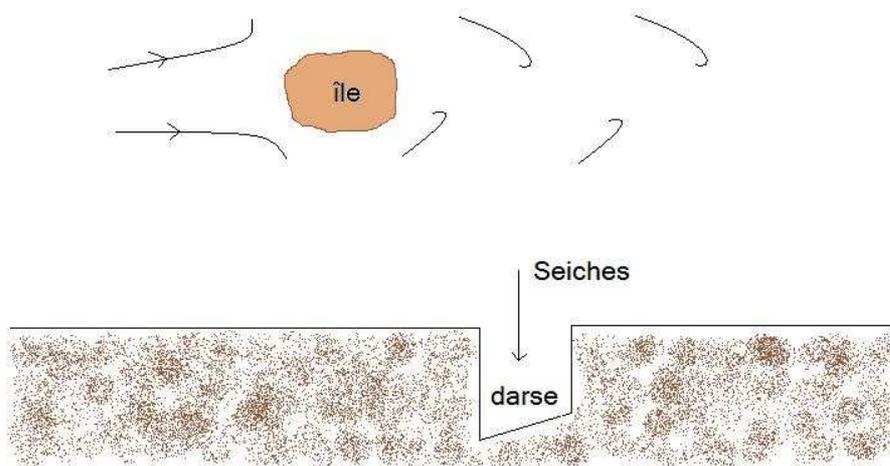


Figure 2: apparition des seiches dans une darse par suite de tourbillons créés par une île.

- La veine fluide passe alternativement de part et d'autre du musoir de la jetée limitant le port.

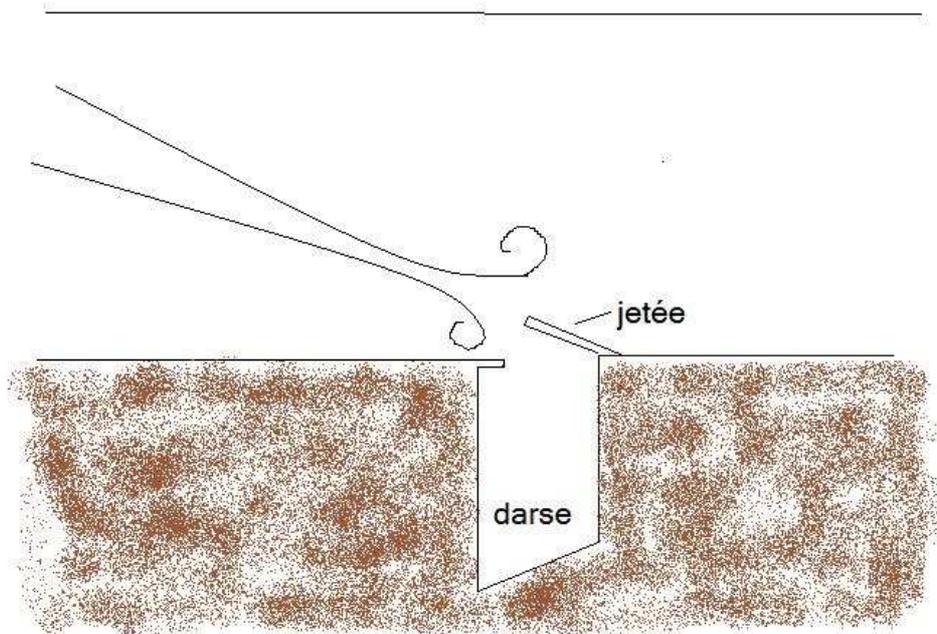


Figure 3: Apparition de seiches dans une darse par suite de tourbillons créés par un musoir de jetée.

Les perturbations atmosphériques peuvent également revêtir une quasi-périodicité par suite de phénomènes analogues. On trouve parfois au dessus d'accidents de reliefs tels que des falaises abruptes des tourbillons alternés provoquant une certaine fluctuation de pression (phénomène bien connu des aviateurs). Ces fluctuations peuvent à leur tour agir sur un plan d'eau et si leur fréquence concorde avec celle de ce dernier, la résonance peut devenir importante. Cependant ce genre d'excitation est beaucoup moins fréquent que le cas des tourbillons alternés provenant d'un courant liquide.

I-2-3-2- Causes particulières fréquentes

Les causes initiales ayant une périodicité moins marquée peuvent néanmoins être importantes si elles se manifestent relativement souvent. Dans cette catégorie il importe essentiellement de mentionner les variations de pression atmosphérique, du vent et de la houle.

➤ Les surf-beats

Le déferlement de la houle sur une plage produit ce que l'on appelle les surfs-beats. Ce sont des ondes longues qui ont la même période que les groupes de lames arrivant au rivage. En effet, chaque vague en déferlant envoie vers la rive une quantité d'eau autant plus importante que son amplitude est forte. En revenant vers la mer, ces paquets d'eau forment un débit saccadé. Ce débit est la somme d'un certain débit moyen et d'oscillations de diverses périodes, en particulier la période de la houle et aussi celle des groupes de lames. Cette dernière période se manifeste par suite de la non linéarité du phénomène de déferlement. Les ondes à longues périodes ainsi engendrées repartent vers le large, une partie pouvant être réfléchiée vers la côte à la lisière du plateau continental. Il y a de fortes chances pour que ces surfs-beats soient responsables des seiches qui se produisent dans les environs, lorsqu'on a pu remarquer, comme par exemple sur la côte nord d'Espagne, une corrélation entre les tempêtes locales et les seiches.

➤ Les groupements de vagues

Des ondes de seiches peuvent aussi apparaître lorsqu'il y a des groupes de vagues fortes (cinq à dix vagues) et des groupes de petites vagues en alternance. Le creux de l'onde de seiche correspond au groupe de grosses vagues, la crête correspond au groupe de petites vagues. Ces ondes de seiche se propagent avec la célérité de groupe des ondes courtes auxquelles elles sont liées. Elles se trouvent libérées près de la côte lorsque les vagues courtes déferlent. Elles se propagent alors avec leur célérité propre, bien supérieure à celle des ondes courtes.

➤ Les variations de pression atmosphérique et du vent

En ce qui concerne les variations de la pression atmosphérique et du vent, il est très difficile de faire des évaluations d'ordre de grandeur faute d'une connaissance suffisante des perturbations atmosphériques usuelles, il faudrait en effet avoir des enregistrements quasi continus des perturbations atmosphériques et ceci en de très nombreux points pour que l'on puisse en tirer une relation valable sur l'importance de cette source d'ondes de seiches.

I-3- PROPRIETES PHYSIQUES

I-3-1- CARACTERISATION DES ONDES DE SEICHES

On peut aisément faire l'analogie entre les ondes de seiches et les vagues de tempêtes qui font toutes deux parties de la famille des ondes de gravité.

Ces deux types d'onde ne diffèrent que par l'ordre de grandeur de leurs paramètres.

Les différents paramètres de ces ondes sont :

- la période
- la longueur d'onde
- la cambrure
- l'amplitude

Pour les seiches, il existe des grandeurs caractéristiques:

- La période $T > 30s$, comme $L = C.T$ on en déduit que les seiches ont des longueurs d'onde beaucoup plus importantes que la houle.
- Leur cambrure est de l'ordre de 10^{-6} au large.

- Leurs amplitudes sont faibles car elles ne bénéficient pas d'effets importants comme le vent. Cela les rendant plus difficiles à détecter puisqu'elles sont dissimulées parmi les houles et les marées.

I-3-2- LONGEVITE

Les seiches ont une longévité importante. En effet, ce sont des ondes longues, donc très peu cambrées et qui ne déferlent pas. Elles sont réfléchies avec très peu de dissipation et modifiées par réfraction et diffraction.

Plus leur période est grande moins l'onde est dissipée.

Par théorie, on sait également que plus les ondes sont longues plus leur longévité est grande.

Les ondes de seiches une fois créées sont particulièrement durables et peuvent se réfléchir sur les côtes sans perte notable d'énergie.

I-3-3- ANALOGIE OPTIQUE

Faisons une analogie des ondes de seiche avec le domaine de l'optique.

Tout d'abord, plus la longueur d'onde est grande plus l'intensité de l'onde diffractée est grande.

Comme la lumière, les seiches peuvent se réfléchir sans grande perte d'énergie et peuvent donc entrer au plus profond d'un port par diverses diffractions et réflexions.

Contrairement à la houle, les ondes de seiches sont réfractées même par les plus grands fonds.

Un aspect notable des seiches est aussi l'effet miroir. En effet, si la seiche arrive sur une côte géométriquement prédisposée (côte plane ou concave), elle peut se réfléchir totalement sur cette côte pour pouvoir se concentrer en un autre endroit. Ces ondes réfléchies viennent bien sûr renforcer l'action des ondes incidentes.

I- 4- QUELQUES EXEMPLES

N'importe quel port, lac, ou bassin quasi fermé peut un jour entrer en résonance sous l'effet d'une seiche et cela du fait de la grande variété des seiches que l'on peut rencontrer.



Figure 4 : Carte du lac Léman

Par exemple, le lac Léman est soumis à des seiches quotidiennement. Ces seiches peuvent être observées via le fait qu'à un certain moment l'eau du lac s'abaisse brutalement pour ensuite se soulever. Pour le lac Léman, ces oscillations brusques du niveau de l'eau ont des périodes variant de 30 à 70 min. Les seiches du lac Léman sont dans les premières à avoir été observées et leur explication était controversée jusqu'à ce que Forel en établisse la théorie. En ce qui concerne le lac Léman, ces seiches sont dues à une brusque dépression locale de la surface lacustre, qui se déforme sous l'effet d'un vent ou d'une augmentation de la pression atmosphérique comprimant la nappe comme un large piston. L'eau s'abaisse et il se forme une onde qui traverse le lac jusqu'au bord opposé, où le niveau monte. En raison de l'inertie de la masse liquide, l'équilibre se rétablit par des oscillations rythmiques décroissantes. » (Nature et histoire du Léman. Le Guide du Léman par Paul Guichonnet). Forel, en constatant que les périodes des seiches longitudinales et transversales dans le lac Léman sont différentes, en déduit que la période des seiches dépend donc des dimensions du bassin dans laquelle elles se produisent. Il finit par établir la loi suivante selon laquelle la période des seiches est proportionnelle à la longueur des lacs et inversement proportionnelle à la racine carrée de la profondeur moyenne :

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gh}} \quad (\text{Formule de Forel})$$

- Avec :
- L : la longueur du lac.
 - g : l'accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$)
 - h : la profondeur moyenne.

Le cas où $n=1$ correspond à la seiche fondamentale ou seiche uninodale. Les seiches uninodales voient leur plan d'oscillation se balancer de part et d'autre d'un point fixe, le nœud, situé au centre de la nappe, alors que les seiches binodales montrent deux nœuds, aux premier et troisième quarts du bassin.

Outre les seiches dans les lacs comme le lac Léman, on observe également, à plus grande échelle, des seiches dans les golfes. Ici l'excitation provient essentiellement de la marée. Lorsque la période propre d'un golfe avoisine celle d'une onde de marée on observe alors une amplification du marnage qui peut parfois être conséquent. Ainsi ce dernier peut dépasser 15 mètres dans la Baie de Fundy au Canada (la période fondamentale du bassin est d'environ 13h contre 12h pour la période de l'onde lunaire semi-diurne). A moindre échelle, dans la mer méditerranée où les phénomènes de marée sont très faibles, le Golfe de Gabès en Tunisie a un marnage d'à peu près 2 mètres.

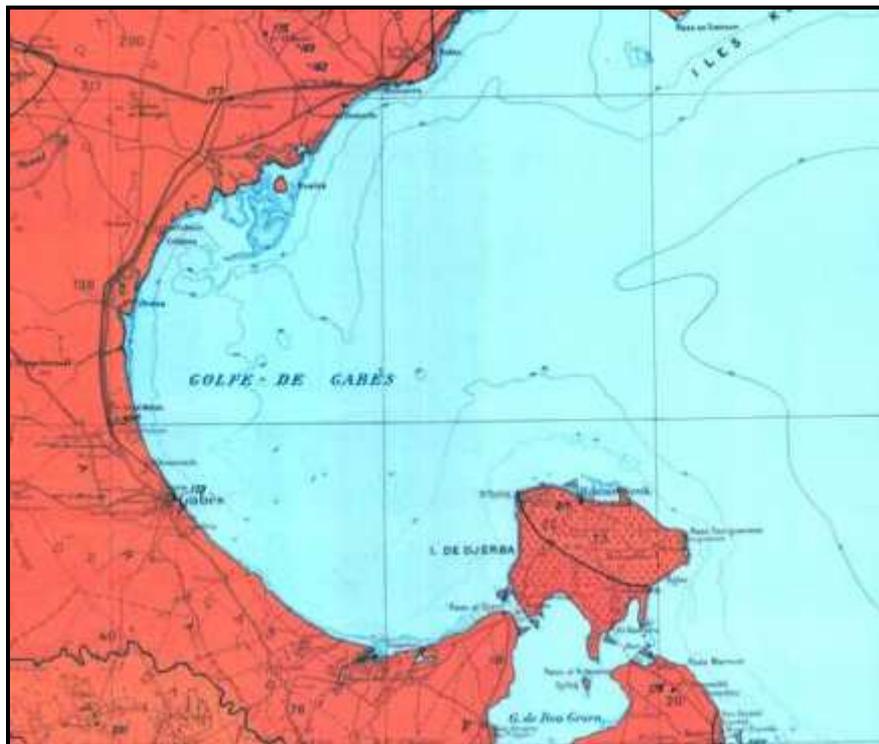


Figure 5 : Carte du Golfe de Gabès (Tunisie)

Certains ports sont également soumis de manière fréquente à des seiches. Dans ce cas l'excitation réside plutôt dans des résonances occasionnées par les trains de vagues. C'est le cas notamment du port de Ploče en Mer Adriatique.

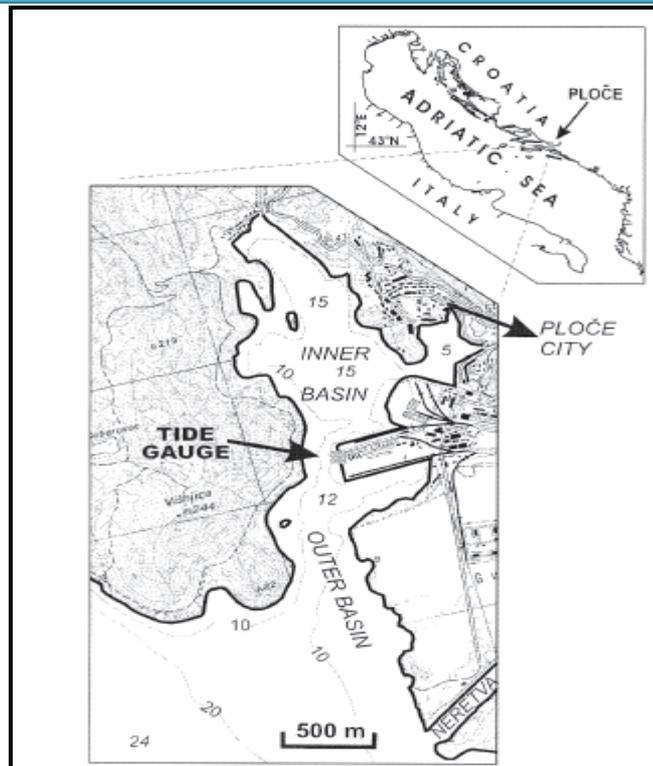


Figure 6 : Carte du port de Ploče (Croatie)

Par ailleurs les brusques oscillations du niveau de l'eau, peuvent, et surtout dans les ports, occasionner des problèmes conséquents.

I- 5- PROBLEMES ENGENDRES PAR LES SEICHES

Les seiches créent des mouvements d'eau caractérisés par des oscillations verticales et horizontales du niveau de l'eau. Les principaux problèmes engendrés par ces oscillations sont essentiellement dus aux mouvements des objets flottants qui oscillent à la période de ces phénomènes.

I-5-1- LES PROBLEMES D'AMARRAGE DANS LES PORTS

Le problème le plus récurrent est celui de l'amarrage dans les ports. Chaque port possède une ou plusieurs fréquences propres de résonance. L'excitation de la surface à ces fréquences peut provoquer par résonance des agitations de très forte amplitude. Les navires amarrés au niveau des nœuds de la résonance sont soumis à d'importants déplacements horizontaux de l'eau. Ces mouvements sollicitent fortement l'amarrage pouvant parfois conduire à leur rupture. En effet, si les amarres sont trop tendues elles cassent plus facilement, mais si elles sont trop lâches, les navires peuvent se heurter mutuellement ou heurter les pontons. On remarque que plus la longueur d'onde est grande, plus le déplacement horizontal est important, et plus la profondeur est faible, plus le déplacement est fort. De plus le système « navire+amarre » peut être assimilé à

un système oscillant. Des calculs approximatifs ont montré que la période d'oscillation était d'environ 2 à 3 minutes. Dans certains bassins, cela peut correspondre à la période des seiches qui feront alors entrer les navires en résonance. Les forces exercées sur les amarres sont ainsi amplifiées et les risques de rupture des amarres ou de choc des navires sont augmentés.

I-5-2- LES PROBLEMES DE COURANT DANS LES PORTS

Les mouvements horizontaux cités précédemment sont aussi gênants car ils créent de violents courants dans les zones où la section est plus petite comme dans les passes ou à l'entrée des ports. Ces courants de remplissage et de vidange des bassins modifient la sédimentologie de ces zones ; en effet ces forts courants de remplissage arrachent les matériaux recouvrant le fond et les déposent dans des zones plus calmes, où ils ne pourront plus être repris par les courants de vidange. Ce phénomène contribue à l'envasement des ports mais aussi à une érosion prématurée au pied des ouvrages limitant les passes. Mais ces courants sont aussi gênant lors des manœuvres des navires d'autant plus qu'ils sont inattendus ; ils peuvent atteindre exceptionnellement les 8 nœuds par exemple à Port-Tudy sur l'île de Groix et rendre ainsi tout accostage impossible.

I-5-3- LES PROBLEMES GENERES PAR LES MOUVEMENTS VERTICAUX

En général, l'amplitude verticale des seiches est de l'ordre de quelques dizaines de centimètre. Les conséquences des oscillations verticales sont donc moins gênantes que les oscillations horizontales. Cependant lorsque plusieurs conditions sont réunies, leurs impacts ne peuvent pas être négligés :

Lors des tempêtes, une augmentation de la profondeur due à une seiche retarde le déferlement des vagues qui viennent alors s'écraser sur les infrastructures portuaires. Cela représente donc une menace pour la stabilité de ces ouvrages.

Mais dans certains ports ces oscillations peuvent prendre des proportions bien plus importantes comme à Bayonne et à Port-Tudy (sur l'île de Groix), où l'amplitude des seiches est de l'ordre de grandeur du mètre. Ces seiches créent d'importantes surcotes du niveau de l'eau et peuvent donc provoquer des inondations des fronts de mer et gêner les aménagements portuaires en faisant par exemple sortir les appontements flottants de leurs rails de guidage.

Les seiches sont des phénomènes ponctuels mais pouvant parfois avoir des conséquences extrêmement gênantes. Très peu d'études ont été effectuées à ce sujet et il est donc assez difficile d'envisager des solutions pour diminuer ce phénomène. En effet, les seiches font partie des ondes de gravité dont les caractéristiques leur permettent de se réfracter et de se diffracter très facilement. Elles sont donc difficilement arrêtables une fois qu'elles se sont établies. Le meilleur moyen de limiter leur nombre est de connaître les périodes des houles incidentes et des vents dominants et de construire les bassins de telle manière que ces phénomènes n'entre pas en résonance. Mais ceci nécessite de longues études au préalable.

II – ANALYSE DES DONNEES

II-1- COLLECTE DES DONNEES

La première étape de notre travail consistait à récolter les données adaptées aux objectifs de ce projet, à savoir mettre en évidence les seiches dans le Golfe du Lion ainsi que développer un modèle numérique simplifié permettant de calculer les caractéristiques des seiches dans le port de Toulon.

Ainsi nous recherchions des études antérieures, des données bathymétriques, des données météorologiques de la région du Golfe du Lion et des données marégraphiques.

- Documents et études antérieures :

En ce qui concerne les documents et études antérieures que nous avons utilisé afin de réaliser cette étude, nous les avons mis en référence dans la bibliographie.

- Données bathymétriques :

Nous avons utilisé la bathymétrie du port de Toulon pour développer un modèle numérique simplifié permettant de calculer les caractéristiques des seiches dans ce port et ainsi corroborer les résultats avec ceux que nous obtiendrons après analyse des données. En réalité, le modèle numérique que nous souhaitions étant trop complexe à coder au vu des informations et des délais dont nous disposions, nous nous sommes restreints à un modèle numérique plus simple et qui ne nécessitait pas la bathymétrie du port de Toulon. (Voir partie III de cette étude).

- Données météorologiques :

Ces données étaient sensées nous permettre d'expliquer l'origine des éventuelles seiches que nous constaterions lors de l'analyse des données. Cependant il s'avère que nous n'avons pu en obtenir et cela malgré les nombreux organismes que nous avons contactés. Aussi nous avons alors fait la démarche inverse. A partir de dates et heures de séismes ou autres excitations pouvant être à l'origine des seiches, nous avons cherché à savoir s'il y avait eu des seiches. (Voir partie II – 4).

- Données marégraphiques :

Les marégraphes côtiers fournissent des mesures de hauteur d'eau du niveau de la mer, parfois depuis près de deux siècles. A l'origine déployés pour la navigation et la prédiction de la marée, leur champs d'application s'est considérablement élargi de l'ingénierie côtière et l'aménagement du littoral à la connaissance précise des variations du niveau de la mer liées aux événements extrêmes (tempêtes, tsunamis...) et aux changements climatiques, dont le niveau de la mer est un paramètre essentiel.

En ce qui nous concerne nous avons utilisé les données des marégraphes afin de faire leur analyse pour mettre en évidence les caractéristiques des seiches que nous voulions observer. (Voir partie II – 2).

Les données dont nous nous sommes servis sont celles du réseau de marégraphes RONIM (Réseau d'Observation National du Niveau Marin) ainsi que celles données par des Directions Départementales de l'Équipement (données pour le port de Sète et Port Vendres en 2007). Le pas de temps est de 10 min et les données disponibles dans la région du Golfe du Lion sont celles :

- du port de Marseille. Années 1998 à 2008
- du port de Toulon. Années 1998 à 2008
- du port de Sète. Années 2007 et 2008
- de Port Vendres. Années 2007 et 2008.

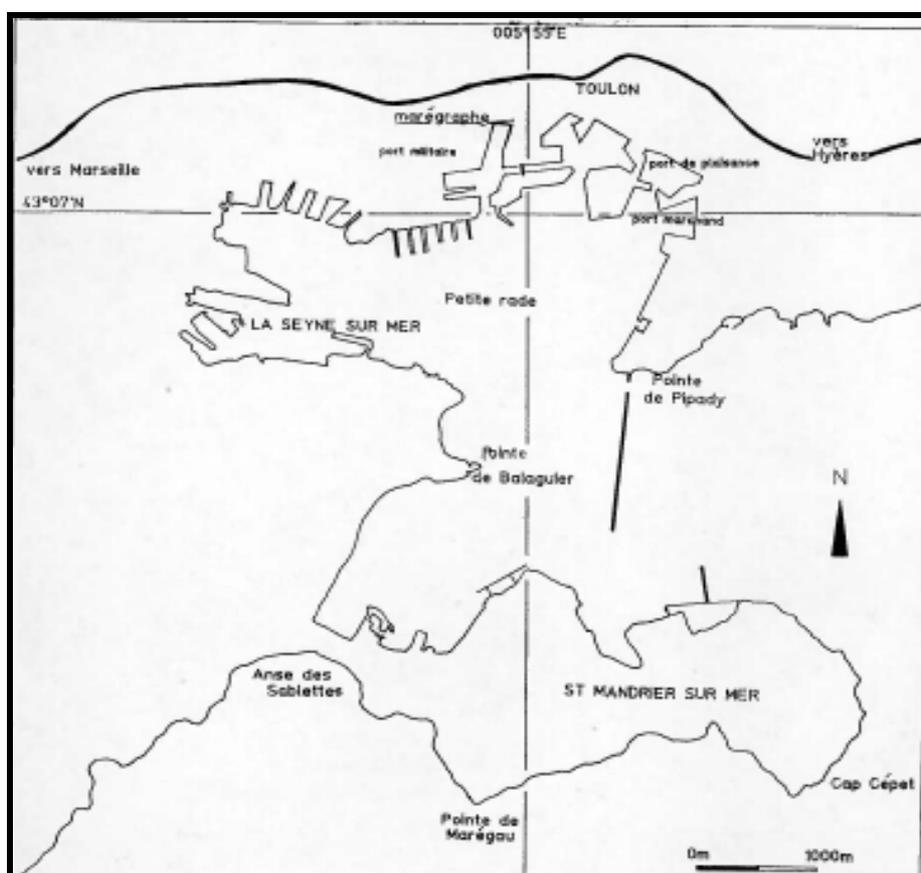


Figure 7 : Localisation du marégraphe dans le port Toulon.

Marégraphe du
port de Marseille

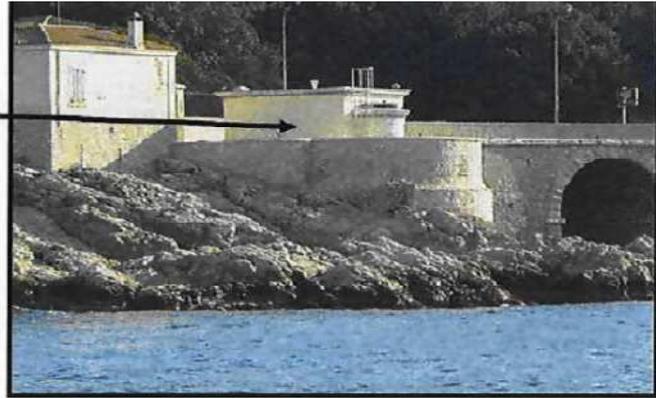


Figure 8 : Marégraphe du port de Marseille.

Dispositif du
marégraphe



Figure 9 : Photographie du marégraphe de Marseille.

Par ailleurs, afin de pouvoir traiter les fichiers tel que nous le voulions nous avons du modifier les fichiers sources.

- Où trouver de telles données ?

Le travail de collecte des données demandant beaucoup de temps et de démarches, nous avons mis en annexe des informations permettant de savoir où trouver certaines données ainsi que la liste des organismes que nous avons contacté. Un site internet que nous avons créé comprend aussi ces informations afin de les rendre accessibles à quiconque effectuerait de telles recherches. Il est disponible à l'adresse suivante : <http://isityprojetseiche.e-monsite.com/>

II- 2- ANALYSE ET RESULTATS

II-2-1- PREMIERE APPROCHE

Notre première approche pour l'analyse des données résidait dans un programme Matlab qui procédait de la manière suivante :

- Choix du port dont on souhaitait étudier le cas.
- Interpolation des données. En effet le pas de temps étant de 10 min, la période maximum que nous pouvions observer sur le spectre d'énergie était de 20 min. Or, ayant lu différentes publications quant aux modes propres des différents ports que nous voulions étudier, il nous fallait pouvoir retrouver des périodes allant jusqu'à 15 min. Aussi nous avons fait une interpolation linéaire des données, réduisant ainsi le pas de temps à 5 min ce qui nous permettait d'observer des périodes allant jusqu'à 10 min.
- Application d'un filtre passe-bande à nos données. Et cela pour atténuer les basses fréquences où on retrouvait les périodes des marées et amplifier la bande de fréquence correspondant à un intervalle allant de 1h30 à 10 min, où on était susceptible d'observer des seiches.
- Représentation des spectres d'énergie mettant en évidence les modes propres des différents ports.

Cependant, ce premier programme, comportait quelques problèmes. En effet nous ne nous étions posé aucune question quant à l'impact de l'interpolation des données sur les résultats, la vérification des données s'effectuait de manière visuelle en observant d'éventuelles anomalies sur la représentation du niveau de l'eau en fonction du temps, ce qui ne permettait pas de déceler toutes les erreurs de manière exhaustive. Enfin le traitement des données par analyse

fréquentielle, même s'il nous permettait de retrouver les modes propres des ports que nous étudions, ne traitait pas les données de façon rigoureuse.

Ce premier programme est disponible en annexe.

II-2-2- SECOND PROGRAMME : ANALYSE ET RESULTATS

II-2-2-1- Vérification des données

Notre étude fréquentielle porte sur les variations du niveau de la mer. Ces données nous sont fournies par les marégrammes. Il est donc essentiel de s'assurer de la validité de ces données. En effet, toute notre étude se base sur ces enregistrements. Il est donc impératif que ces mesures soient continues dans le temps et effectuées avec une période d'échantillonnage constante. La première étape à effectuer avant l'analyse fréquentielle est donc la vérification des données. Nous avons utilisé des programmes informatiques développés sous environnement MATLAB pour dépouiller les données. Cette analyse est effectuée année par année afin de détecter d'éventuelles anomalies. Nous obtenons alors les figures suivantes :

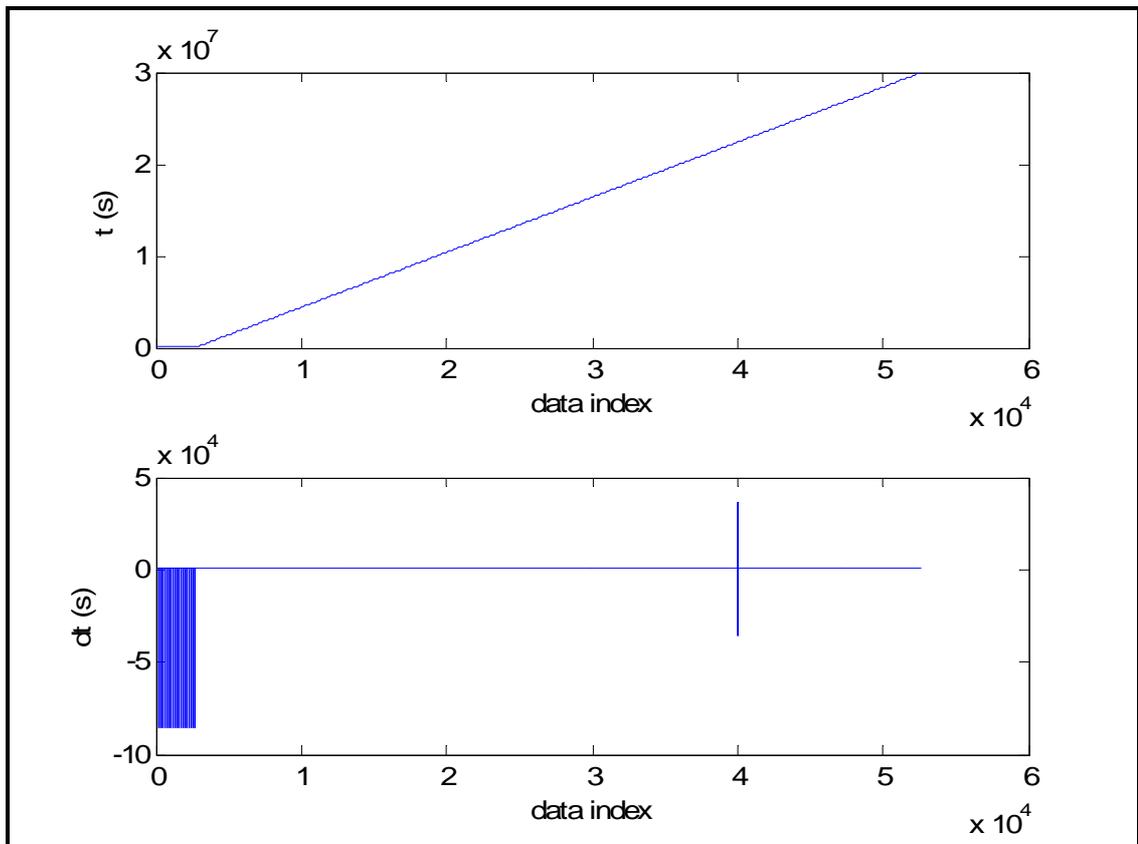


Figure 10 : Toulon 2003 : présence d'anomalies d'enregistrement

Le premier graphique nous permet de vérifier que l'évolution du temps est bien linéaire lorsque l'on parcourt le fichier. Nous remarquons ici qu'il existe une anomalie au début du fichier. On

retrouve cette anomalie sur le deuxième graphique qui représente la période d'échantillonnage au cours du temps. Sur ce deuxième graphique nous retrouvons également une deuxième anomalie. Cela nous montre que la période d'échantillonnage n'est pas constante. Il faut donc restreindre l'analyse fréquentielle seulement à la période pour laquelle il n'y a pas d'anomalie, c'est-à-dire ici il faut ignorer les données antérieures à la 2737^{ème} ligne et postérieurs à la 39995^{ème} ligne du fichier. Pour les analyses mensuelles, cela revient à ignorer les mois de janvier et d'octobre.

Un fichier sans anomalie donne les figures suivantes :

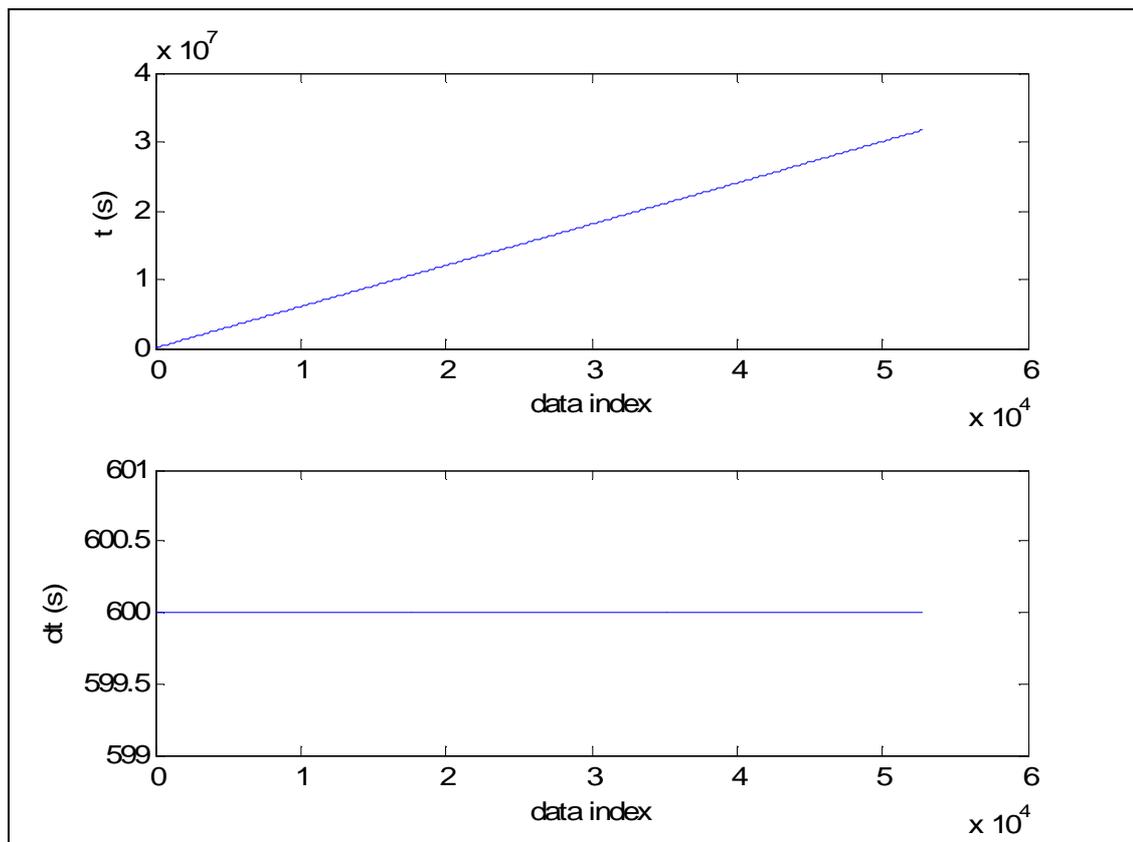


Figure 11 : Toulon 2007 : pas d'anomalie

II-2-2-2- Analyse spectrale en Série de Fourier par année

Nous avons effectué l'analyse spectrale sur 1 an des données entre 1998 et 2008.

Sur le premier graphe, nous traçons l'évolution de la densité d'énergie en fonction de la fréquence.

A l'aide de Matlab, nous avons effectué un filtre passe haut sur le signal.

On note ensuite sur chaque figure à quelles fréquences nous observons des pics de densité c'est à dire lorsqu'une grande quantité d'énergie est délivrée.

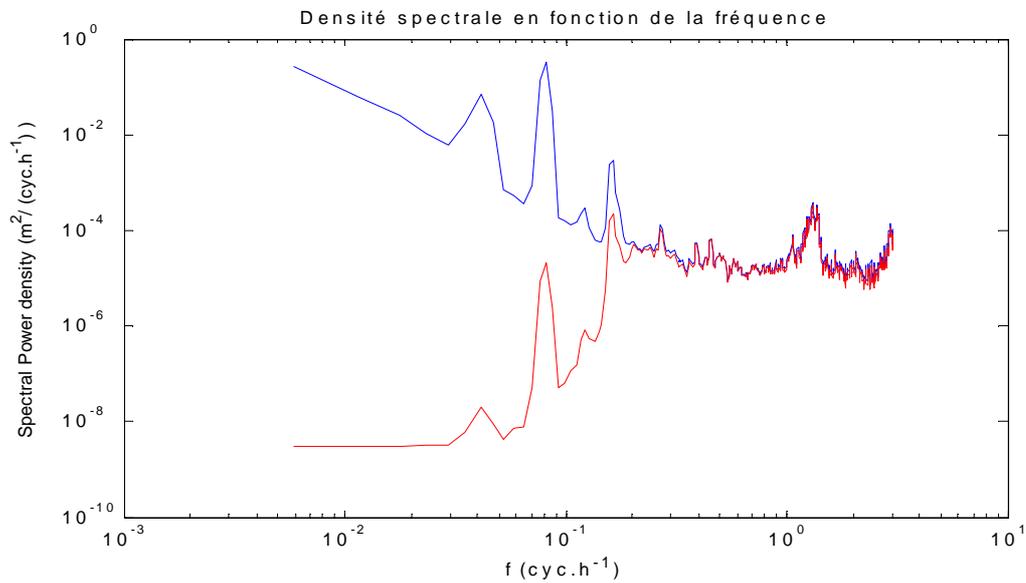


Figure 12 : Analyse pour l'année 1998 (fichier Toulon 01)

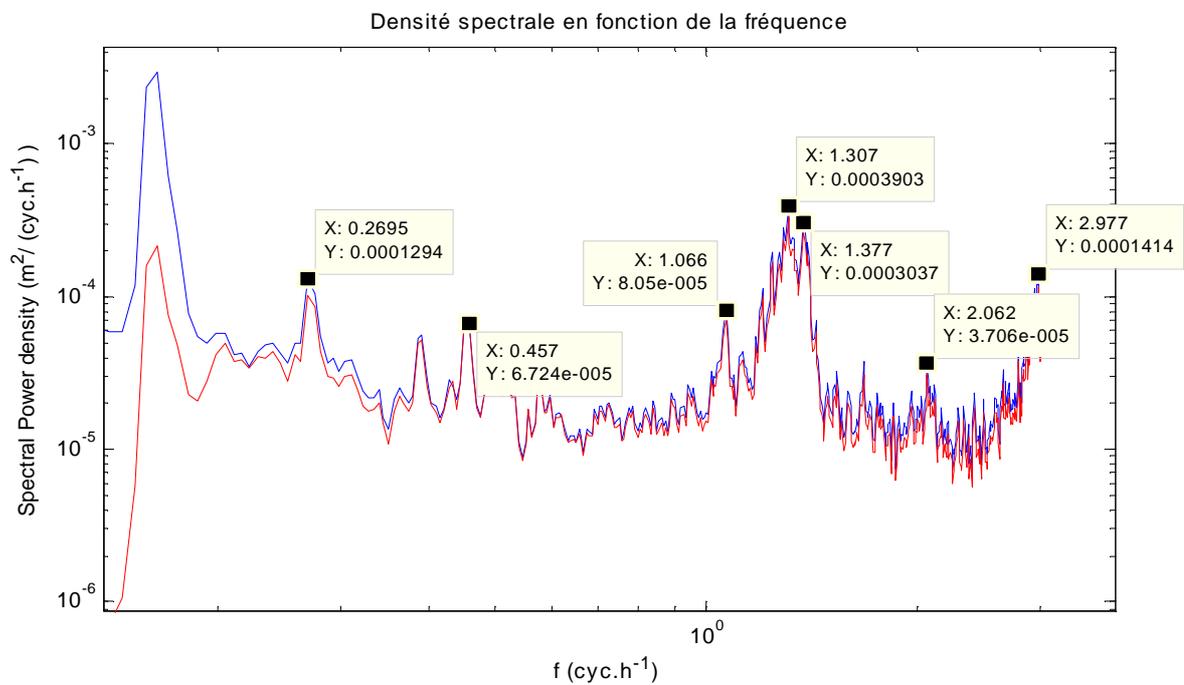


Figure 13 : Analyse pour l'année 1998 (fichier Toulon 01)

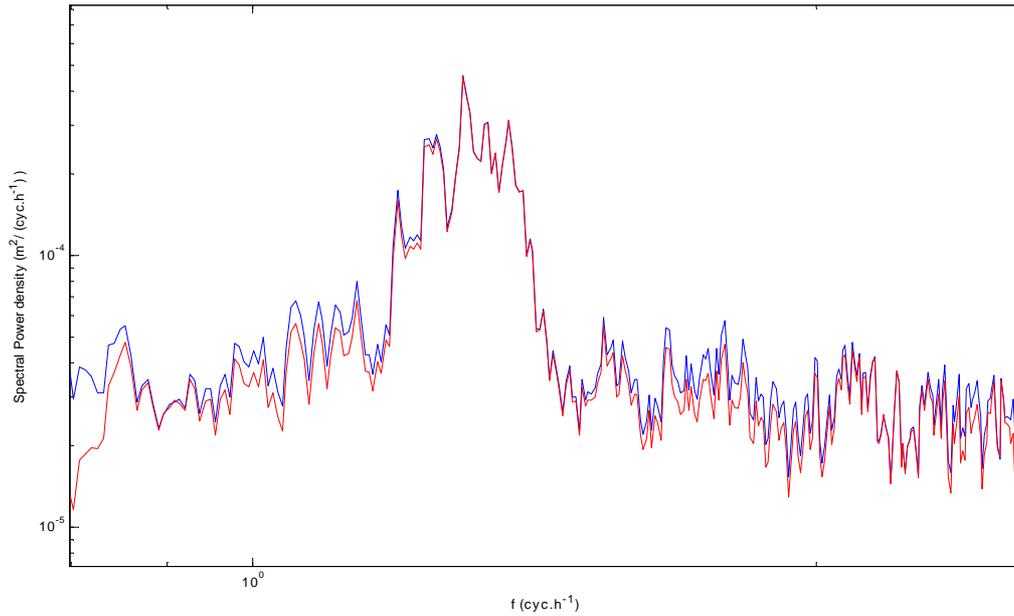


Figure 14 : Analyse pour l'année 2003 (fichier Toulon 06)

On observe que pour l'année 2003 contrairement à celle de 1998 les pics de densité sont moins prononcés que pour les autres années mais globalement la densité d'énergie est plus élevée.

Cela pourrait s'expliquer par l'existence d'un séisme cette année là.

Nous approfondirons cette théorie dans la suite de ce rapport lors de l'analyse en ondelettes par mois.

Ces fréquences sont alors converties en période ($T = \frac{1}{f} * 60$) en minute.

Nous avons retenu comme pics de densité et donc de fréquences intéressants :

1998		1999		2000		2001	
Fréq (cyc.h ⁻¹)	Période (min)						
2.924	20	2.965	20.23	2.965	20.23	2.936	20.436
2.08	28.8	2.08	28.848	2.0882	28.732	2.115	28.37
-	-	-	-	1.7	35.294	1.751	34.247
-	-	1.535	39.09	-	-	-	-
1.377	43.6	1.371	43.764	-	-	1.307	45.91
1.307	45.9	1.301	46.11	1.301	46.118	-	-

2002		2003		2004		2005	
Fréq (cyc.h ⁻¹)	Période (min)						
2.924	20.52	2.965	20.14	2.918	20.33	2.941	20.4
2.098	28.6	-	-	2.086	28.45	2.074	28.92
-	-	-	-	1.807	33.20	0.0297	33.69
-	-	-	-	1.535	39.36	1.535	39.09
1.307	45.91	1.371	43.45	-	-	-	-
-	-	1.301	46.07	1.307	45.54	1.301	46.12

2006		2007		2008	
Fréq (cyc.h ⁻¹)	Période (min)	Fréq (cyc.h ⁻¹)	Période (min)	Fréq (cyc.h ⁻¹)	Période (min)
2.906	20.64	2.924	20	2.941	20.4
2.092	28.59	2.086	28.76	2.092	28.68
1.782	33.68	-	-	-	-
1.541	38.93	1.535	39.08	1.535	39.0879
1.371	43.76	1.371	43.76	1.377	43.573
1.307	46	1.295	46.33	1.307	45.9

Nous avons alors mis en relation nos données et les fréquences propres de la rade de Toulon soulignées par la Publication « Les oscillations propres de la rade de Toulon » :

« L'analyse spectrale des mesures de niveau et de courant permet de montrer l'existence de quatre modes propres d'oscillation de la rade de Toulon, de période 44, 29, 20 et 14 min. »

On remarque que les périodes $T \sim 20$ min, $T \sim 28,6$ min et $T \sim 46$ min sont prédominantes pour toutes les années.

Ces périodes correspondent donc toutes à des oscillations propres de la rade de Toulon.

Ces ondes de périodes propres caractérisent différentes oscillations :

- Pour $T \sim 45$ min : premier mode d'oscillation de l'ensemble "petite rade et grande rade".

- Pour $T \sim 30$ min : le premier mode d'oscillation de la petite rade.
- Pour $T \sim 20$ min : oscillation de la petite Rade.

Dans cette publication, il est également signalé que l'on détecte une onde à $T \sim 15$ min que nous ne pouvons obtenir avec notre programme. En effet, la période d'échantillonnage que nous déterminons est de 10 min, nous obtenons donc des fréquences inférieures à 3 Hz.

L'onde à 15 min définit l'oscillation du système baie de Toulon-baie de La Seyne.

L'amplitude de ces signaux présente une forte variabilité non périodique, ce qui exclut l'excitation des seiches par les ondes de marée, et aucune relation n'existe avec la manifestation des coups de vent. Il est par contre évident que ces oscillations propres sont déclenchées principalement par des variations de la pression atmosphérique à petite échelle.

D'autres fréquences apparaissent et ne sont pas reconnues comme des oscillations propres de seiches.

Plusieurs explications sont envisagées :

- cette publication date de 1981, les appareils de mesures et d'analyse étaient donc moins performants qu'aujourd'hui, on a donc sûrement plus de données qu'à cette date là
- de plus, la publication étudie seulement les fréquences propres dans la rade de Toulon, on peut donc envisager la possibilité d'oscillations propres venant d'autres bassins tel que le port de Toulon par exemple.
- des impulsions très forte ont pu être données à un moment précis cela entraînant un phénomène de résonance, cependant sauf dans le cas d'un séisme il n'existe pas vraiment de phénomènes suffisamment fort pour causer une telle résonance.

Cette analyse nous permettra de connaître une partie des fréquences importantes et d'effectuer pour chaque mois de chaque année une analyse en ondelette sur un intervalle de fréquence autour de chacune de ces fréquences caractéristiques.

II-3- ANALYSE EN ONDELETES PAR MOIS

L'analyse annuelle nous a donc permis de mettre en évidence plusieurs fréquences caractéristiques qui sont particulièrement excitées certaines années.

Afin d'affiner l'analyse annuelle réalisée précédemment, nous avons utilisé une nouvelle série de programmes Matlab obtenus sur le site de l'Université du Colorado (disponibles à

l'adresse suivante : <http://paos.colorado.edu/research/wavelets>) et légèrement modifiés afin de s'adapter au mieux à notre problème.

Cette série de programmes nous permet de traiter mois par mois les données du marégraphe. Les données de chaque mois sont représentées tout d'abord en terme d'élévation du niveau de la mer. Cette élévation est filtrée (filtre passe bande) et représentée pour la fenêtre fréquentielle liée aux seiches. Une analyse en ondelettes (analyse temps/fréquence) dans la gamme de fréquence des seiches (entre 1 h et 20 minutes) est ensuite appliquée à ces données. Enfin, une dernière courbe présente la variance, c'est-à-dire la significativité des événements qu'on observe durant le mois.

L'intérêt de l'analyse en ondelettes est assez simple. En effet, lorsqu'on observe un signal $s(t)$ au cours du temps, on est en mesure de connaître son début et sa fin et de constater ses éventuelles variations qualitativement. Cependant, il est moins évident de se faire une idée de ses périodicités (ie ses fréquences). La transformée de Fourier permet de décomposer le signal en une fréquence fondamentale accompagné de ses harmoniques (le spectre). Chaque fréquence correspond à une fonction sinusoïdale (dépendante du temps) et nous donne une information sur la régularité globale du signal. Il est donc difficile d'obtenir une information localisée dans le temps. Qui plus est, on ne peut pas étudier des signaux dont la fréquence varie au cours du temps.

L'idée de l'analyse en ondelettes consiste à représenter notre signal en fonction du temps et de la fréquence. On a donc une description directe et une description fréquentielle. Les fonctions sinusoïdales qui servent à décomposer le signal dépendent à la fois du temps et de la fréquence. L'un des premiers à avoir appliqué ce principe aux transformées de Fourier est le physicien Dennis Gabor en 1940 (pour la culture, c'est celui qui inventa le procédé de l'holographie). On parle alors de transformées de Fourier à fenêtre glissante. L'idée de base consiste à découper le signal en plages temporelles. On réalise sur chaque plage, une analyse de Fourier. Cette analyse est donc dépendante de la localisation de la plage.

Dans notre étude, nous avons tout d'abord lancé cette série de programme pour chaque mois de chaque année d'études, dans la fenêtre fréquentielle [1h-20min]. Cette première série nous a permis d'observer les tendances globales mensuelles, et nous a permis de relever les événements significatifs ayant eu lieu dans cette gamme de fréquence.

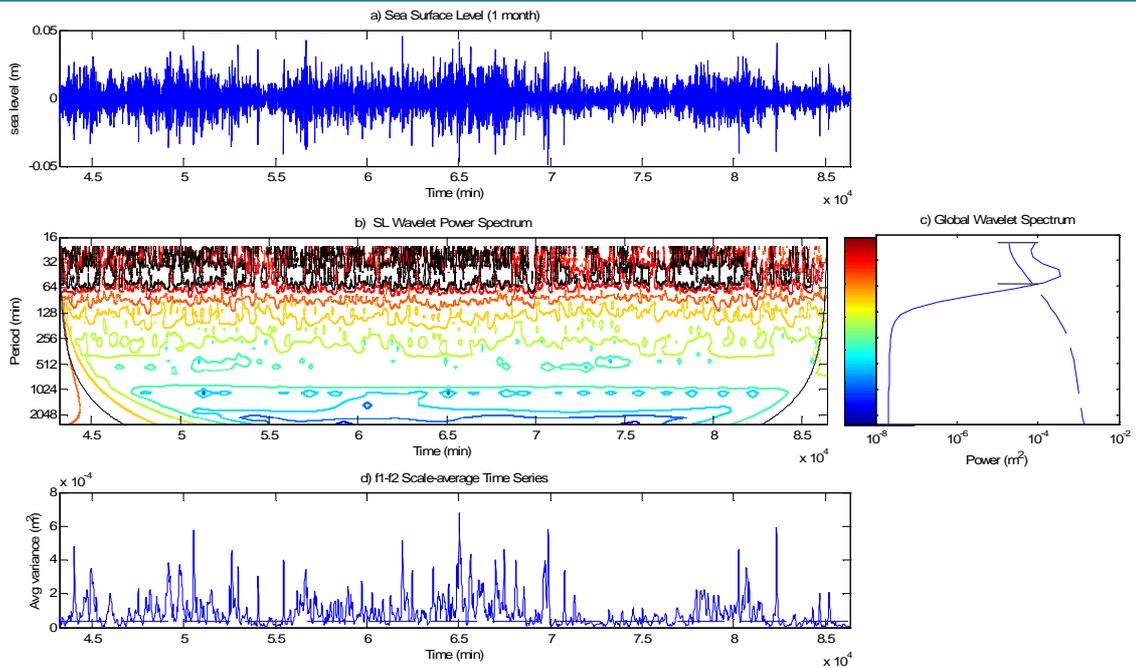


Figure 15 Traitement en ondelettes du mois de mai 2008, site de Toulon:

Dans une deuxième partie, nous avons affiné cette étude en relançant ce même programme légèrement modifié, afin de réaliser 2 séries de filtrage. Le premier filtrage présente le signal initial filtré dans la fenêtre des seiches. Le deuxième filtrage, présenté sur la même figure, en dessous, visualise le signal filtré précédemment et focalisé autour d'une fréquence que l'analyse annuelle nous avait permis d'associer à une fréquence de seiche.

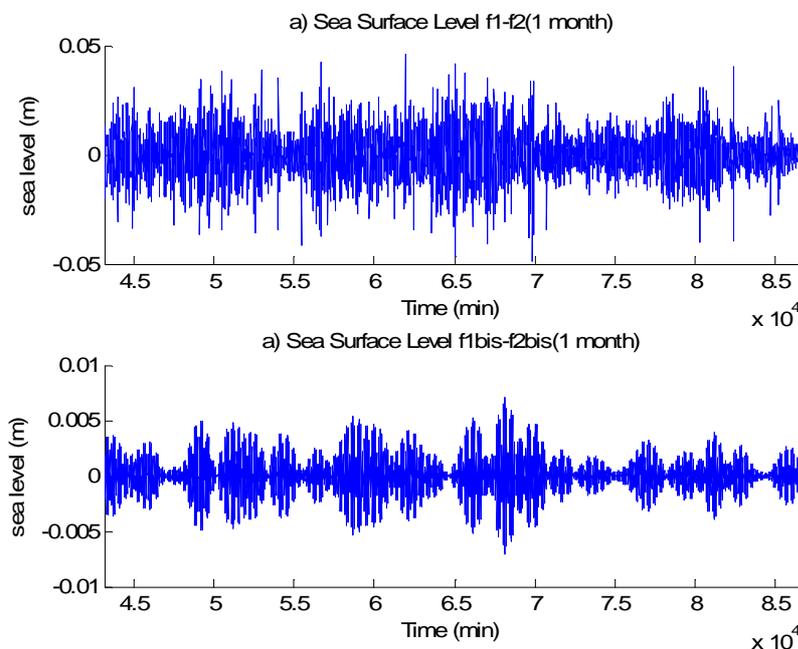


Figure 16 : Comparaison de l'élévation du niveau de la mer sur 2 bandes de fréquences

1- Bande de fréquence des seiches 2-Bande particulière associée à une seiche

L'analyse systématique, pour chaque évènement repéré comme significatif, de l'élévation observable dans la bande de fréquence focalisée sur une fréquence associée à une seiche, a permis de relever quand est ce que ces fréquences sont excitées de façon significative. Les tableaux ci-dessous présentent cette analyse, effectuée chaque mois où les données sont complètes, sur trois années consécutives (2006, 2007 et 2008).

TOULON 09 (2006)

Fréquences remarquables (Hz)	Avril	Mai	Juin	Novembre	Décembre
1.195	16/04 14h20 (6 mm) 26/04 16h40 (5 mm)		05/06 15h00 (4 mm)		07/12 07h20 (4.2 mm)
1.242	06/04 01h40 (5 mm) 19/04 11h20 (6 mm) 26/04 16h40 (5 mm)	18/05 10h20 (6.6 mm) 19/05 06h20 (10.3 mm) 20/05 05h40 (5.1 mm)	20/06 21h40 (9.5 mm)	22/11 21h20 (5 mm) 23/11 15h40 (7 mm)	09/12 18h20 (5.5 mm)
1.307	01/04 13h20 (7.5 mm) 06/04 01h40 (9.7 mm) 07/04 12h40 (9.2 mm) 19/04 11h20 (6.7 mm) 26/04 16h40 (8 mm)	04/05 01h20 (5.8 mm) 06/05 11h40 (5.2 mm) 18/05 10h20 (6.5 mm) 19/05 06h20 (10.2 mm) 20/05 05h40 (5.8 mm)	01/06 16h00 (4.6 mm) 05/06 15h00 (4.9 mm) 09/06 10h40 (4.6 mm) 20/06 21h40 (8.5 mm) 28/06 16h20 (5.8 mm)	23/11 15h40 (6.5 mm) 24/11 11h40 (5.4 mm)	09/12 18h20 (5.7 mm)
1.541					
1.781					
2.092					
2.906		15/05 07h20 (4.6 mm)	01/06 16h00 (4.1 mm)		07/12 07h20 (7.5 mm)

TOULON 10 (2006)

Fréquences remarquables (Hz)	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
1.201	12/02 20h50 (5.5 mm)				
1.301	11/02 08h50 (11 mm) 12/02 20h50 (11 mm) 14/02 21h50 (8 mm) 15/02 09h20 (9.6 mm)		02/04 23h20 (3.8 mm) 10/04 11h20 (7 mm) 14/04 07h00 (5 mm)	03/05 21h00 (6 mm)	
1.371	14/02 12h10 (7 mm) 14/02 21h50 (7.3 mm) 15/02 09h20 (6.3 mm)		02/04 23h20 (4.8 mm)	28/05 19h20 (6 mm)	18/06 08h40 (4.3 mm) 18/06 23h40 (6.5 mm)
2.098					22/06 02h40 (4.8 mm)
2.93		20/03 02h20 (2.5 mm)	13/04 04h20 (3.3 mm)		

Fréquences remarquables (Hz)	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1.201				05/10 21h00 (9 mm)	15/11 10h20 (3 cm) 16/11 08h00 (3 cm)	03/12 20h00 (4 mm) 05/12 20h20 (4.7 mm)
1.301	01/07 16h40 (6 mm)	24/08 20h40 (7 mm)		05/10 21h00 (5 mm)	15/11 10h20 (3 cm) 16/11 08h00 (3 cm)	03/12 20h00 (6 mm) 04/12 07h40 (1.3 cm) 05/12 20h20 (7 mm) 09/12 16h00 (8 mm) 11/12 01h20 (7.5 mm)
1.371	22/07 17h40 (4 mm)	23/08 00h40 (5 mm)	25/09 4h20 (5 mm)	04/10 23h20 (6 mm)	15/11 10h20 (3 cm) 16/11 08h00 (3 cm)	11/12 01h20 (7 mm)
2.098					15/11 10h20 (3 cm) 16/11 08h00 (3 cm)	
2.93		23/08 00h40 (6 mm) 24/08 20h40 (7.7 mm)			15/11 10h20 (3 cm) 16/11 08h00 (3 cm)	11/12 01h20 (5.7 mm)

TOULON 11

Fréquences remarquables (Hz)	Janvier	Mars	Avril	Juin
1.201		11/03 03h30 (4.2 mm)	02/04 22h10 (4.2 mm) 11/04 09h30 (5.2 mm)	
1.242		24/03 00h50 (4.9 mm) 28/03 05h30 (4.4 mm)	11/04 09h30 (5.3 mm)	01/06 14h00 (5.7 mm) 17/06 10h00 (5 mm)
1.301		24/03 00h50 (6.6 mm) 28/03 05h30 (5 mm)	09/04 04h10 (5.3 mm) 09/04 22h30 (8.3 mm) 11/04 09h30 (7.6 mm)	
1.371		11/03 03h30 (5.5 mm) 11/03 15h10 (8.2 mm) 27/03 17h50 (6 mm)	08/04 16h30 (7 mm) 09/04 22h30 (6.7 mm) 18/04 08h10 (7 mm) 18/04 19h50 (8 mm)	17/06 23h20 (6.6 mm) 18/06 14h20 (9.7 mm)
1.535				18/06 14h20 (5.1 mm)
2.098				
2.93				18/06 14h20 (8 mm)

Fréquences remarquables (Hz)	Juillet	Août	Septembre
1.201			24/09 12h20 (7 mm)
1.242			24/09 12h20 (7 mm)
1.301		07/08 21h00 (5.8 mm)	24/09 12h20 (7 mm)
1.371	13/07 11h00 (8.4 mm) 14/07 10h20 (5.7 mm)		24/09 12h20 (7 mm)
1.535			24/09 12h20 (7 mm)
2.098			24/09 12h20 (7 mm)
2.93	20/07 06h20 (6 mm)		24/09 12h20 (7 mm)

Cette analyse sur trois ans ne nous a pas permis de détecter de quelconque périodicité d'excitation des fréquences repérées comme étant des périodes de seiche. En revanche, l'analyse mensuelle nous a permis de détecter 2 évènements assez importants, l'un en novembre 2007 (élévation de l'ordre de 20 cm) et l'autre en septembre 2008 (élévation de l'ordre de 40 cm).

Ces deux évènements présentent des caractéristiques similaires, c'est-à-dire que l'élévation globale (non filtrée) observable à cette date est entièrement associée à une fenêtre fréquentielle comprise entre 1h et 20 min. De plus, l'analyse autour de chaque fréquence significative n'a pas permis de montrer l'existence d'une fréquence prépondérante. Pour ces évènements dont l'élévation est importante, toute la bande de fréquence des seiches est excitée.

Analyse d'un évènement particulier : séisme de Boumerdès, Algérie (21 mai 2003)

Ce tremblement de terre qui a secoué le nord de l'Algérie a été particulièrement violent. Selon le Réseau National de Strasbourg, la magnitude a été de 6.7 sur l'échelle de Richter. La secousse principale s'est produite à 18 h 44 (temps universel) 19 h 44 (heure locale) et a été suivie immédiatement par de très nombreuses répliques.

L'épicentre de ce séisme a été localisé en mer très proche du littoral, à 60 km au nord-est d'Alger plus précisément à quatre kilomètres de la côte, entre Zemmouri et Boumerdès (Long. 3.53E – Lat. 36.81N).

Analyse mai 2003 Toulon

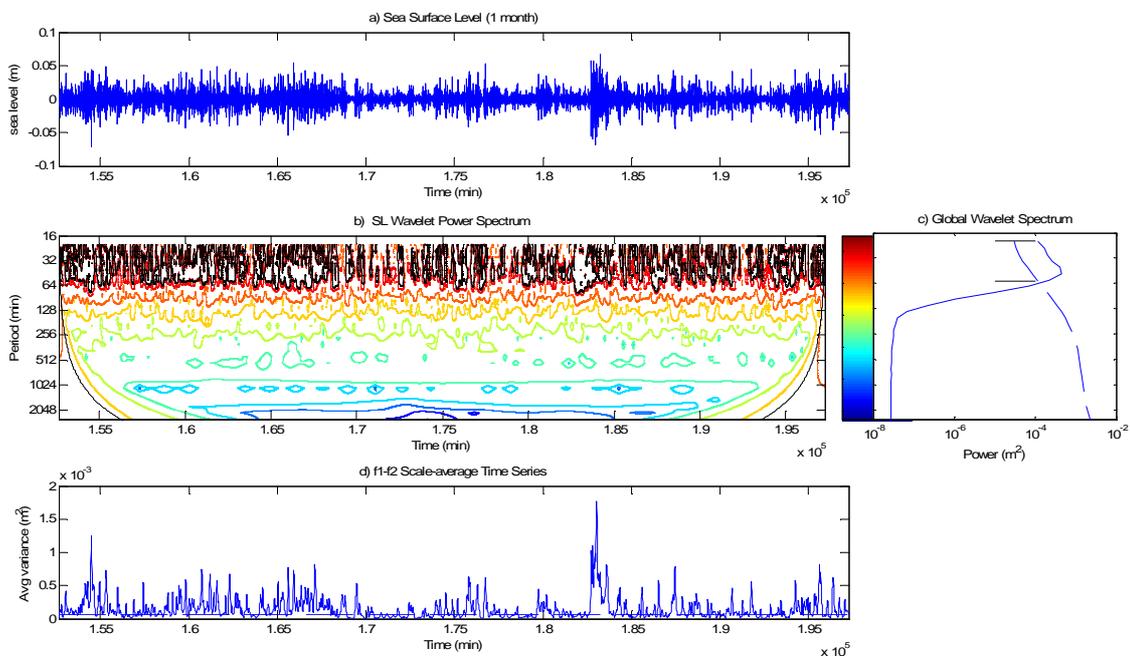


Figure 17 : Analyse en ondelettes du mois de mai 2003, site de Toulon

La dernière figure fait état d'un pic significatif, suivi de deux pics importants également. Après traitement des données ces pics correspondent respectivement au 21/05 à 22h40, au 22/05 à 2h et au 22/05 à 12h.

L'analyse annuelle avait permis de révéler la présence de 5 fréquences significatives. La focalisation de l'analyse en ondelettes autour de ces fréquences a permis de montrer que les fréquences excitées par cet évènement sont compris dans les bandes [49.18 min;43.16 min] (élévation de l'ordre de 3 cm) et [20.37 min;20.06 min] (élévation de l'ordre de 10 cm).

Analyse mai 2003 Marseille

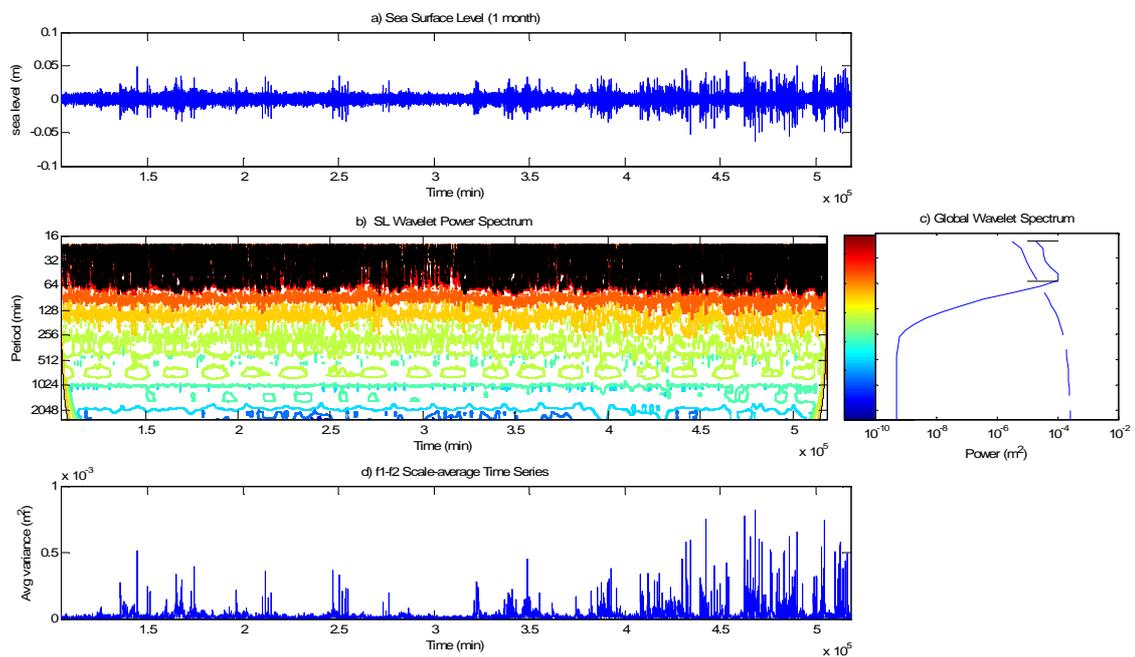


Figure 18 : Analyse en ondelettes du mois de mai 2003, site de Marseille

Les fichiers correspondants à l'année 2003 dans le port de Marseille sont tronqués, notamment pendant le mois de mai. L'analyse présentée ci-dessus concerne la période comprise entre le 19/05 et le 31/05.

Le filtrage de cette portion du signal a permis de mettre en évidence un pic dans la gamme des seiches situé le 22/05 à 2h, même heure que le pic prépondérant relevé à Toulon.

L'analyse en ondelettes a été réalisée sur les fenêtres fréquentielles pour l'année 2003. Ces analyses resserrées autour de ces fréquences particulières n'ont donné aucun résultat significatif. En revanche, en prenant des fenêtres beaucoup plus larges, il a été possible de révéler que 60% de la hauteur de cet événement est compris dans une bande fréquentielle [38 min ; 1h].

Analyse d'un événement particulier : mini-tsunami à Marseille (le 24 Août 2004.)

Le 24 Août 2004, un mini-tsunami a été décelé sur Marseille, notamment sur la plage de la Pointe-rouge où la mer s'est retirée sur une vingtaine de mètres. Malheureusement les données marégraphiques du port de Marseille sont corrompues autour de cette période les rendant ainsi inexploitable.

Cependant, une élévation anormale du niveau de la mer a été mesurée dans le port de Toulon ce même jour aux alentours de 9 h, heure locale. On retrouve cette élévation lorsque l'on filtre le signal dans la fenêtre des seiches (cf. figure 19). Afin de trouver la fréquence d'oscillation de la seiche correspondant à cette élévation, nous avons effectué une analyse spectrale sur l'année pour déceler les fréquences d'oscillations susceptibles d'avoir été excitée par ce phénomène. Il apparait ainsi plusieurs pics dans la gamme de fréquence des seiches.

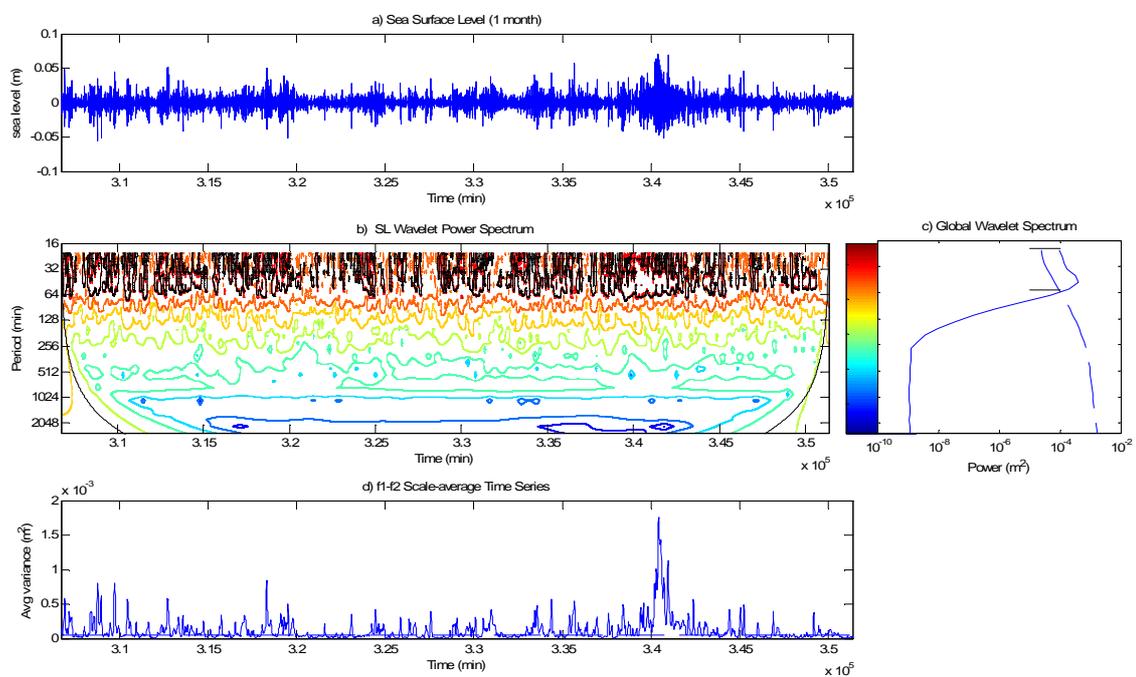


Figure 19 : Analyse en ondelettes de moi d'août 2004, site de Marseille

Nous obtenons ainsi 7 fréquences pouvant correspondre à des seiches :

Fréquence	1.242	1.307	1.377	1.535	1.799	2.086	2.918
Période (min)	48	45	43	39	33	28	20

En refiltrant le signal autour de ces fréquences nous pouvons voir la contribution de chaque fréquence à l'élévation du niveau de la mer. Mais lorsque nous regardons au moment où s'est produit le tsunami, aucune des seiches dont les fréquences ont été relevées ont été excité à ce moment là. Seule la seiche de période 48 min présente une petite excitation contribuant à une variation du niveau moyen de la mer d'environ 1 cm.

Par contre, le 25 Août, cette même période de seiche a été fortement excité aux alentours de 18h30. On peut voir une augmentation du niveau de la mer correspondant à cette fréquence de 5cm (cf. figure 20).

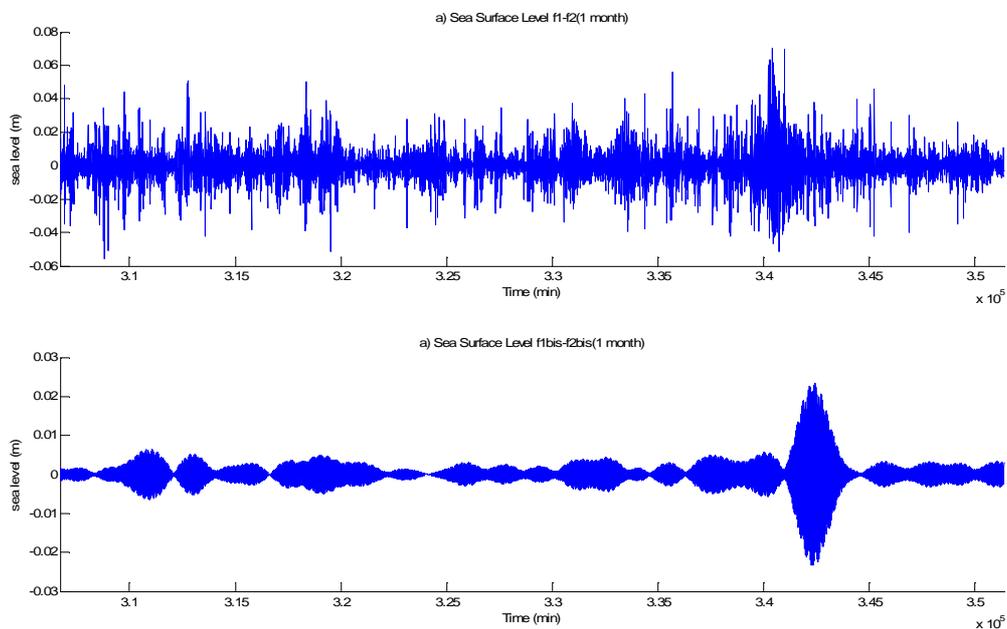


Figure 20 : Représentation de l'élévation du niveau de la mer correspondant aux signaux de période $T \sim 48min$

III - MODELISATION NUMERIQUE

Problématique

Dans cette partie nous voulons développer, grâce à une bathymétrie fictive ou réaliste, un modèle numérique simplifié permettant de calculer les caractéristiques des seiches dans le port de Toulon. Nous voudrions alors comparer les résultats obtenus à ceux obtenus à partir de l'analyse fréquentielle. En outre nous tenterons de valider ou critiquer le modèle codé sous MATLAB.

III-1- COMPARAISON DES DIFFERENTS LOGICIELS DE MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

L'étude de la houle a une grande importance pour l'ingénierie maritime. En effet elle intervient en premier lieu dans le dimensionnement des ouvrages maritimes. Elle se présente aussi comme étant un obstacle majeur à la navigation et aux opérations portuaires. Enfin elle influe de manière importante sur les mouvements sédimentaires et l'évolution du trait de côte. C'est pourquoi il nous a semblé nécessaire de vous présenter deux des logiciels les plus fréquemment utilisés pour connaître au mieux la houle.

III-1-1- MODELE MARS

➤ Description du modèle MARS

Le modèle hydrodynamique Mars est un algorithme de calcul des courants marins, des hauteurs d'eau, et des concentrations en éléments solubles (ou en suspension temporaire) transportés par les courants, dans un écoulement plan, quasi-horizontale.

La forme des fonds n'est pas importante, elle peut comporter un nombre quelconque d'îles, de hauts fonds, etc...

Ce modèle est composé de:

- un noyau de calcul opérationnel en version 2D et 3D.
- un pré-processeur nommé IMars
- un post-processeur, ou programme d'exploitation graphique des résultats de MARS nommé VisuMars.

Afin d'optimiser la précision et le temps de calcul, le noyau opte pour une méthode en différences finies sur un maillage régulier.

La gestion et l'intégration des paramètres et des données d'entrée servant à l'activation du code de calcul sont les fonctions essentielles de Imars. Ce pré-processeur contrôle aussi en temps réel l'évolution de variables hydrodynamiques modélisées.

VisuMars permet quant à lui de présenter les résultats de calculs déjà réalisés ou en cours de calcul, sous forme de courbes et de cartes. Il permet aussi des calculs spécifiques d'interprétation (trajectoires, etc...)

Le modèle hydrodynamique Mars modélise sous forme de calculs instantanés ou de synthèses (valeurs moyennes, maxi, mini, etc...):

- le courant (composantes U et V) et les résiduelles eulériennes,
- la hauteur du plan d'eau, les niveaux moyens et les composantes harmoniques de marée,
- la salinité,
- des constituants provenant de rejets (par exemple les coliformes fécaux),
- le transport sédimentaire et les dépôts.

Pour chaque zone étudiée, le modèle crée une base de données. Ces résultats sont stockés sous la forme d'une série temporelle de vecteurs et de scalaires en coordonnées géographiques.

Afin de calculer les résultats, le modèle 2D nécessite d'avoir :

- la topographie du domaine (la bathymétrie)
- les conditions aux limites sur les frontières ouvertes du domaine.
- les flux d'eau et de matière dissoute (ou en suspension) à l'intérieur du domaine (rivières, émissaires ...).

Les hypothèses du calcul valables en 2D sont les suivantes :

- la composante horizontale du courant est quasiment constante de la surface jusqu'à proximité du fond,
- les vitesses verticales sont faibles.

Le modèle MARS 2D calcule la moyenne des courants sur la verticale (modèle 2DH).

Les équations :

A l'aide d'une méthode de différences finies sur des maillages structurés, Mars résout les équations de Navier - Stokes à trois dimensions d'espace. Ces équations expriment en tout point du domaine de calcul, la conservation de la masse (équation de continuité) et la conservation de la quantité de mouvement (équations dynamiques) dans les trois directions d'espace horizontales. En 2D, ces équations, moyennées sur la verticale, donnent les équations de Barré de Saint-Venant. Il est possible de prendre en compte les effets météorologiques en intégrant le vent, la pression atmosphérique ainsi que les flux thermiques à l'interface air - mer.

En partant des hypothèses faites ci-dessus, le second principe de Newton et la loi de conservation de la masse se traduisent par le système d'équations dit de Saint-Venant :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fv - \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{k^2 H^{4/3}} + \frac{\partial Pa}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho H} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - fu - \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{k^2 H^{4/3}} + \frac{\partial Pa}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho H} = 0$$

avec :

- U : la composante de la vitesse selon Ox
- V : la composante de la vitesse selon Oy
- ζ : la cote de la surface libre
- f : le facteur de Coriolis
- kr : le coefficient de frottement de fond, de Strikler
- H : la hauteur de la colonne d'eau

Ce système est complété par l'équation de transport – diffusion - décroissance d'un élément chimique transporté en suspension :

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(HUC)}{\partial x} + \frac{\partial(HVC)}{\partial y} - \frac{\partial\left(HK_x \frac{\partial C}{\partial x}\right)}{\partial x} - \frac{\partial\left(HK_y \frac{\partial C}{\partial y}\right)}{\partial y} + IHC + S = 0$$

avec :

- C : la concentration en une substance dissoute
- K : le coefficient de diffusion horizontale
- L : le coefficient de décroissance propre
- S : la source

Le modèle MARS intègre ces équations différentielles de manière automatique, quelle que soit la forme du domaine, qui peut d'ailleurs évoluer dans le temps (zones découvrantes, murs immergés, etc...).

Afin d'offrir une représentation de la réalité d'autant plus précise que possible, Mars utilise la technique de l'emboîtement des modèles sous forme « gigogne ». (cf. figure1)

Par cette technique un modèle de grande emprise et de grande maille contient lui même un ou plusieurs sous modèles (loupes). Ces derniers reçoivent des modèles précédents les conditions aux limites, sur leur périmètre. Ces conditions aux limites servent à exciter le modèle, et

progressivement sont transmises à l'intérieur du modèle par des équations différentielles d'évolution qui forment le corps du modèle. Le logiciel MARS-2D résout ensuite les équations de l'hydrodynamique et du transport sur ce maillage.

Plusieurs modèles s'enchaînent pour aboutir à la zone côtière ciblée.

Un modèle de rang 0 (modèle de grande emprise) s'étend jusqu'aux limites du plateau continental et trouve ses conditions aux limites dans la valeur des ondes générant la marée au large. Un forcing météorologique peut être pris en compte sur toute la surface du modèle et ses éventuelles loupes successives.

Ce premier modèle crée un fichier de résultat, décrivant le comportement des courants et de la marée sur le pourtour du sous-modèle. Le modèle suivant, de rang 1 sera activée à partir de ce fichier et de données complémentaires de paramétrage du calcul, et ainsi de suite.

Après plusieurs sous modèles éventuels, le dernier fichier créé, servira à piloter le modèle de détail, de rang N. N est la nombre de modèle précédent le modèle de détail. (Exemple : Le modèle de rang N-3 génère des conditions aux limites du modèle de rang N-2.) Habituellement la valeur de N sera comprise entre 2 et 5.

Dans cet enchaînement de modèles le moteur de calcul numérique MARS-2D est identique. Seules les caractéristiques physiques de la zone géométrique diffèrent (emprise du modèle, taille de la maille, etc.).

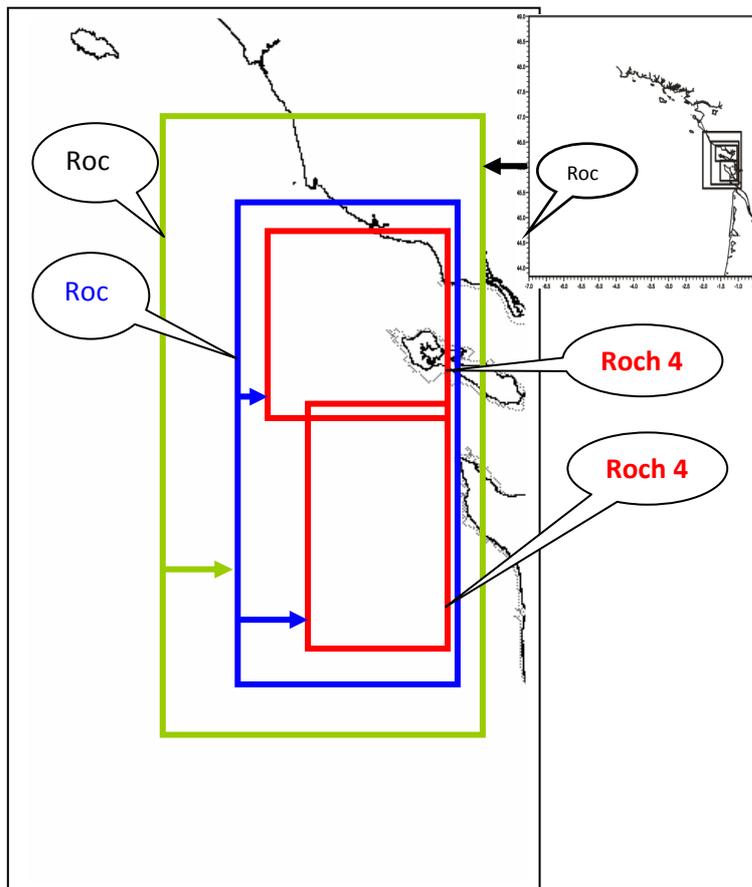


Figure 21 : Principe de l'emboîtement de modèles : cas des zones La Rochelle (Roch 4 Nord) et La Tremblade - Marennes Oléron (Roch 4 Sud).

Au plan spatial les modèles intermédiaires possèdent une maille environ 4 fois plus petite que celle du modèle précédent.

III-1-2- LOGICIEL REFONDE

➤ Historique

Refonde est un code de calcul spécifique simplifié, tiré du programme RE_FLEX. Ce dernier est un programme très complet qui a été élaboré par l'Université de Technologie de Compiègne (UTC) et l'Université de Laval au Québec. C'est un code de calcul utilisant la méthode des éléments finis destiné à la modélisation du comportement élastique des solides et des structures (barres, coques, poutres, plaques, etc...).

➤ Description du logiciel REFONDE

Le logiciel Refonde est un code d'agitation de houle qui résout l'équation de réfraction - diffraction de Berkhoff par une méthode de calcul par éléments finis. Il permet de déterminer l'agitation de la houle et de trouver les fréquences de résonance d'un port. Ainsi il s'avère très utile lors d'étude de variations de géométrie avant d'éventuels travaux.

Une houle se propage de la manière similaire à la lumière. Les trois phénomènes de propagation d'onde d'énergie sont la diffraction, la réflexion et la réfraction.

Ce logiciel a pour but de résoudre l'équation de Berkhoff en considérant les trois phénomènes de propagation. Cela nécessite des maillages assez denses, de l'ordre de 10 nœuds par longueur d'onde. Ainsi des maillages de 400 000 nœuds et plus, ne sont pas rares.

Ce code de calcul est spécialement adapté pour le calcul d'agitation au sein des domaines portuaires. Il peut toutefois être utilisé en mer ouverte.

Ce modèle est composé de:

- un mailleur
- une interface graphique conviviale
- un outil de visualisation et de mise en page des résultats
- une chaîne de pré- et postprocesseurs, complémentaire au logiciel Refonde, composée des logiciels REFLUCAD, PREFLUX et POSTFLUX

Ci-dessous est présentée une description rapide de la chaîne de pré- et postprocesseur complémentaire à Refonde :

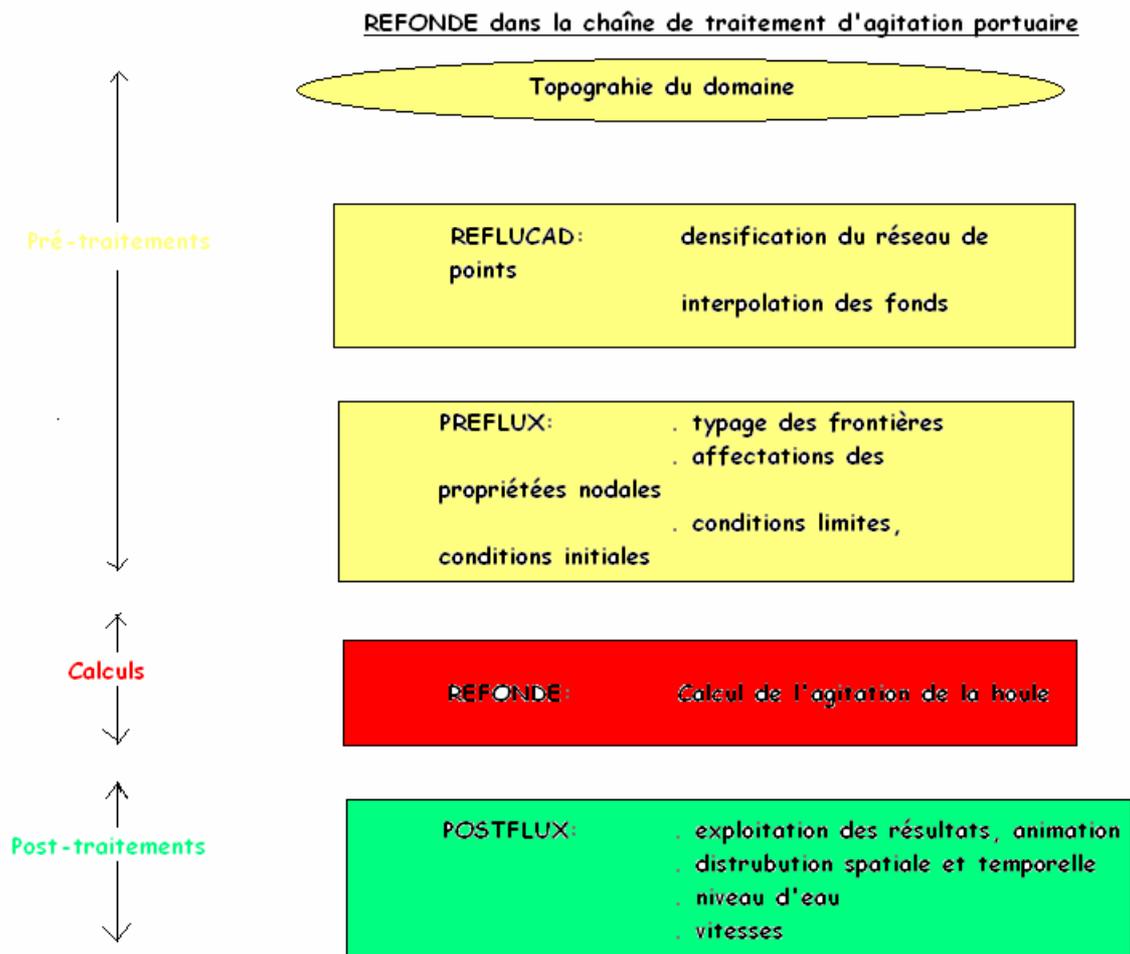


Figure 22 : Refonde dans la chaîne de traitement d'agitation portuaire

REFLUCAD est un préprocesseur qui fonctionne sous AUTOCAD. Il permet d'entrer ou de lire la bathymétrie et le dessin des ouvrages existants.

PREFLUX regroupe un mailleur et une interface conviviale à travers laquelle sont spécifiés les paramètres généraux du calcul ainsi que les conditions aux limites. Ce préprocesseur contient ainsi les coefficients de réflexion sur les ouvrages et les caractéristiques de la houle incidente.

POSTFLUX est le postprocesseur. Il permet la visualisation des résultats du calcul sous diverses formes : coupes, isolignes ou isocouleurs.

Le modèle Refonde :

- lit, vérifie et organise les données
- construit la matrice A et le vecteur globaux X
- résout le système $A \cdot B = X$
- imprime les résultats

Afin de calculer les résultats, le modèle Refonde nécessite d'avoir :

- la topographie du domaine que l'on veut étudier (la bathymétrie)
- les conditions aux limites : conditions de paroi et conditions aux frontières ouvertes

Les hypothèses du calcul sont les suivantes :

- le fluide est homogène et incompressible
- le fluide est non-visqueux et irrotationnel
- les dissipations d'énergie dues au déferlement, aux frottements de fond et autres, sont nulles
- Les courants et les vents sont supposés inexistantes
- Les variations de la surface libre sont relativement faibles

Ceci signifie que $H/L \ll 1$
 $H/d \ll 1$

avec :

- H : la hauteur de la houle
- L : la longueur d'onde de la houle
- d : la profondeur

Les équations :

L'équation de Berkhoff nous donne :

$$\text{div}(C.C_g.\nabla\phi) + k^2.C.C_g.\phi = 0$$

avec :

- C : la célérité de l'onde
- L : la longueur d'onde
- T : la période
- w : la pulsation
- k : le nombre d'onde

$$C = \frac{L}{T} = \frac{w}{k}$$

- C_g : la vitesse de groupe

Le potentiel des vitesses réelles ϕ pour $z=0$ et la surface libre η sont donnés par les formules suivantes :

$$\phi = \text{Re}(\varphi.e^{-i\omega t})$$

$$\eta = \text{Re}\left(\frac{i\omega}{g}.\varphi.e^{-i\omega t}\right)$$

III-1-3- AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Avantage de Mars :

- Ce logiciel fonctionne sous linux ou Unix, soit en temps réel pour des simulations d'une courte durée ou en batch pour des durées plus longues. Suivant la finesse de définition du maillage et la durée en temps réel de la simulation le temps de calcul peut être supérieur à 24 heures.

Inconvénient de Mars

- L'hypothèse principale pour l'application de ce logiciel est de considérer les mouvements horizontaux nuls ce qui n'est pas vraiment réaliste.

Avantages de Refonde :

- Ce logiciel présente une grande portabilité, il s'utilise facilement avec : Unix, Windows ou Linux.
- Grâce à l'équation de Berkhoff qui considère les phénomènes de réfraction, réflexion, et diffraction, ce logiciel prend en compte les ouvrages et les phénomènes qu'ils engendrent.
- Un important avantage est que le logiciel du fait de sa structure informatique est facilement enrichissable. On peut facilement tenir compte des faibles non-linéarités, on peut prendre en considération le frottement du fond, les courants marins, la propagation sur fond poreux et rendre la houle plus aléatoire, ce qui est plus réaliste que la houle régulière, etc...
- Selon les versions récentes de REFONDE, ce dernier peut prendre en compte le déferlement selon deux méthodes : un simple écrêtage des hauteurs de houle ou bien par ajout d'un terme dissipatif dans l'équation de Berkhoff. Les ouvrages peuvent être semi-réfléchissants, submersibles ou transmissibles. Il traite les houles monochromatiques (régulières) et les houles aléatoires. Le spectre incident de la houle est alors du type Jonswap.

Inconvénients de Refonde :

- Un des problèmes essentiels dans le développement de Refonde est de bien définir les conditions aux limites.

- L'équation de Berkhoff ne considère pas des phénomènes locaux tels que les fortes variations de pentes, les discontinuités locales. Ce qui représente une forte contrainte pour les calculs.
- Selon les versions de Refonde, il ne tient pas compte d'un phénomène physique très important pour la houle : le déferlement.
- Il ne permet pas le couplage avec les objets flottants qui peuvent pourtant avoir une influence sur l'agitation du port. En effet la houle à l'intérieur d'un port peut parfois être atténuée par des objets flottants tels que les navires ou les ponts flottants. Ainsi Refonde ne nous permet pas d'étudier le mouvement des navires dans le cas des seiches pour étudier par exemple ce qu'est un bon amarrage.

III-2- MODELE A UNE DIMENSION

III-2-1-CHOIX DU MODELE

Afin de développer le modèle numérique simplifié permettant de calculer les caractéristiques des seiches dans le port de Toulon, nous avons décidé d'utiliser, dans un premier temps, un modèle à 2 dimensions.

Cependant lors de cette étude nous avons rencontré quelques difficultés liées aux conditions aux limites lors du codage. C'est pour cela que nous avons décidé d'orienter notre travail sur un modèle simplifié tels qu'un modèle à une dimension.

Les caractéristiques du bassin choisit pour l'étude du modèle 1D sont celles du canal de l'ISITV. Ainsi cette étude se divise en trois sous-parties. Dans un premier temps, nous poserons le problème que nous analyserons d'un point de vue analytique puis numérique. Nous verrons ainsi qu'il s'agit en fait de résoudre un problème classique de valeur propre d'une matrice. Ainsi il consistera, à l'aide de Matlab, à résoudre ce problème. Nous rechercherons en outre les modes propres liés au canal. Enfin nous essayerons de valider ces résultats expérimentalement.

III-2-2-POSITION DU PROBLEME

L'évolution des seiches suit les équations des ondes longues avec des termes de forçage spécifiques liés aux tensions de vent de surface et aux gradients de pression atmosphérique. Dans le cas d'un bassin côtier 1D allongé, le flux est restreint à une seule direction spatiale x , et les équations des ondes longues intégrées sur la verticale sont :

$$b \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho} P + F$$

Avec $\eta(x, t)$ la déformé de la surface libre et $Q(x, t)$ le flux intégré sur la section. $A(x, t)$ est la section, $b(x, t)$ est la largeur, et $\tau_0(x, t)$ est la tension de surface local. F est le forçage météorologique local.

Or le problème de valeur propre est ici un problème linéaire avec des conditions aux limites homogènes. En plus il est indépendant des termes de tension de surface τ_0 et de forçage météorologique F . On obtient ainsi les équations linéaires suivants :

$$b \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gA \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

Pour des solutions périodiquement temporelles, $\eta(x, t) = X(x, \omega) \cos \omega t$, ce système d'équation nous permet de déduire :

$$\frac{gA}{b} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{g}{b} \frac{dA}{dx} \frac{dX}{dx} + \omega^2 X = 0$$

Avec $Q(x, t) = -\frac{gA}{\omega} \frac{dX}{dx} \sin \omega t$

L'équation peut être réécrite de la manière suivante :

$$\frac{1}{b} \frac{d}{dx} \left(A \frac{dX}{dx} \right) + \frac{\omega^2}{g} X = 0$$

Ce qui correspond à une équation de Sturm-Liouville.

III-2-3-DISCRETISATION DU PROBLEME

Le problème étant formulé comme un problème de valeur propre de Sturm-Liouville, il n'est cependant pas sous la forme d'un problème classique de valeur propre d'une matrice. Mais il peut être forcé sous cette forme par une approximation discrète du terme en dérivé seconde. Nous utilisons en outre ici une approximation classique par différences finies.

Ainsi pour une grille uniforme de pas $\Delta x = \frac{L}{N}$, une approximation quadratique locale de l'équation précédente au nœud j est :

$$a_{j-1} X_{j-1} + a_j X_j + a_{j+1} X_{j+1} + \frac{\omega^2}{g} X_j = 0 \quad (1)$$

Où

$$a_{j-1} = \frac{A_{j-1} + 4A_j - A_{j+1}}{4b_j \Delta x^2}, \quad a_j = \frac{-2A_j}{b_j \Delta x^2} \quad \text{et} \quad a_{j+1} = \frac{-A_{j-1} + 4A_j + A_{j+1}}{4b_j \Delta x^2}$$

Dans lesquels $A_j = A(j\Delta x)$ et $b_j = b(j\Delta x)$.

Pour un bassin fermé, les conditions aux limites sont un flux nul aux extrémités :

$$\left. \frac{dX}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{et} \quad \left. \frac{dX}{dx} \right|_{x=L} = 0$$

Ainsi les approximations discrètes aux limites sont :

$$a_0 X_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \frac{\omega^2}{g} X_0 = 0 \quad \text{au nœud } 0 \quad (2)$$

$$a_{N-2} X_{N-2} + a_{N-1} X_{N-1} + a_N X_N + \frac{\omega^2}{g} X_N = 0 \quad \text{au nœud } N \quad (3)$$

Où

$$a_0 = \frac{13A_0 - 12A_1 - 3A_2}{4b_0 \Delta x^2}, \quad a_1 = \frac{-5A_0 + 4A_1 - A_2}{b_0 \Delta x^2}, \quad a_2 = \frac{7A_0 - 4A_1 + A_2}{4b_0 \Delta x^2}$$

$$a_{N-2} = \frac{A_{N-2} - 12A_{N-1} - 7A_N}{4b_N \Delta x^2}, \quad a_{N-1} = \frac{-A_{N-2} + 4A_{N-1} - 5A_N}{b_N \Delta x^2} \quad \text{et} \quad a_N = \frac{3A_{N-2} - 12A_{N-1} + 13A_N}{4b_N \Delta x^2}$$

En définissant \mathbf{X} comme un vecteur colonne et à partir de l'équation (1), pour les nœuds 1 à N-1, et des équations (2) et (3), pour les nœuds 0 et N, on trouve finalement qu'il s'agit de résoudre le problème de valeur propre suivant : $\mathbf{AX} = \lambda \mathbf{X}$

Où \mathbf{A} est une matrice tridiagonale aux coefficients a_j , avec pour valeur propre $\lambda = -\frac{\omega^2}{g}$. La

matrice \mathbf{A} est réelle mais non symétrique. Elle est symétrique seulement dans le cas d'un bassin uniforme où A et b sont constant, A étant la section et b la largeur du bassin.

III-2-4-CODAGE DU PROBLEME (VOIR ANNEXE 1)

L'intérêt du codage étant d'obtenir les modes propres du bassin à partir de la matrice \mathbf{A} , il est nécessaire de définir auparavant la bathymétrie du bassin pour un pas spatial choisis. En outre on peut imposer un obstacle dans le canal qui ferait office de digue par exemple. C'est pour cela que nous étudierons deux cas de bathymétrie à fond plat, l'une sans obstacle et l'autre avec un obstacle.

Une fois la bathymétrie réalisée il nous faut définir la matrice \mathbf{A} . Les conditions aux limites imposent, à $x = 0$ et à $x = L$, que le flux nul soit $\left. \frac{dX}{dx} \right| = 0$. En reprenant la définition de la dérivé cela veut dire que $X_0 = X_1$ et $X_{N-1} = X_N$. Ainsi la matrice \mathbf{A} doit vérifier ces conditions aux bords. Pour le présent problème, la dimension des lignes et des colonnes de \mathbf{A} est N+1, ainsi N+1 valeurs propres λ_n sont identifiées.

Nous définissons donc \mathbf{A} de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_1 & & a_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & a_{N-2} & a_{N-1} & a_N \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Les valeurs intermédiaires étant données par a_{j-1} , a_j et a_{j+1} .

La fonction eig sous Matlab nous permet ensuite de déduire la matrice de valeurs propres. Sachant que $\omega = \frac{2\pi}{T}$, on détermine enfin les périodes propres par la relation suivante :

$$T_0 = 2\pi \sqrt{-\frac{1}{g\lambda}}$$

Remarque : Dans nos cas d'étude, la largeur du canal étant constante on aura $b(x) = b_0 = cte$ et donc ce terme ne sera pas utile dans les calculs. En effet, la section $A(x) = b(x)h(x)$, il est donc possible de supprimer le terme b dans les relations des coefficients a_j . Ce qui implique que seule la bathymétrie aura une influence sur les modes propres.

III-2-5-ANALYSE DES RESULTATS

Bathymétrie à fond plat sans obstacle

La longueur du canal étant $L \approx 10m$, nous obtenons pour un pas $\Delta x = 0,5$ m donc pour $N = 20$, les périodes propres suivantes :

	n=1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	etc.
T_{0n}	14.42	7.23	4.85	3.66	2.95	2.49	2.16	1.92	1.74	1.59	1.48	1.39	...

Ce qui nous donne les fréquences suivantes

N	n=1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
fmodn	0.069	0.138	0.206	0.273	0.338	0.402	0.463	0.521	0.576	0.627	0.675	0.720

Remarque : le choix du nombre de nœuds N est important. Nous n'avons pas réussi à l'expliquer mais il existe des valeurs limitent au dessous duquel et au-delà duquel le modèle devient instable et les périodes absurdes.

Il nous a paru intéressant de comparer ces périodes à celles obtenues théoriquement dans le cadre de l'approximation en eau « peu profonde ». En effet, les bassins considérés ayant une longueur L grande par rapport à leur profondeur h , les seiches sont considérées comme des vagues stationnaires dites en eau « peu profonde » (longueur d'onde » profondeur locale). Ainsi la longueur d'onde d'une seiche d'ordre n pour un bassin de longueur L est donnée par $\frac{2L}{n}$ et sa période T_n est déterminée à l'aide de la relation de dispersion en *shallow water* :

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gh}}$$

Nous obtenons donc les périodes théoriques suivantes (voir le programme en Annexe D) :

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F _{thn}	0.07	0.143	0.216	0.26	0.358	0.431	0.502	0.575	0.645	0.719	0.787	0.867

On s'aperçoit que les résultats sont très proches. On peut donc conclure que le modèle numérique est satisfaisant devant la théorie.

En calculant les valeurs propres liées à la matrice \mathbf{A} , la fonction eig nous renvoie aussi la matrice des vecteurs propres qui correspond normalement à la déformée de la surface libre \mathbf{X} . Cependant en la traçant en fonction de la longueur du bassin nous obtenons des vagues qui sont très peu régulières mais qui oscillent tout de même autour du niveau moyen 0. Nous pensons que ces valeurs ont une très grande erreur car il faudrait en principe effectuer une méthode itérative pour déterminer le vecteur \mathbf{X} . En réalité nous ne sommes même pas sûrs que ces valeurs aient vraiment un sens car la profondeur a été fixée à 21 cm et l'amplitude des vagues dépassent largement cette valeur. Mais nous avons remarqué que plus nous augmentons le nombre de nœuds et plus l'amplitude tend vers des valeurs cohérentes.

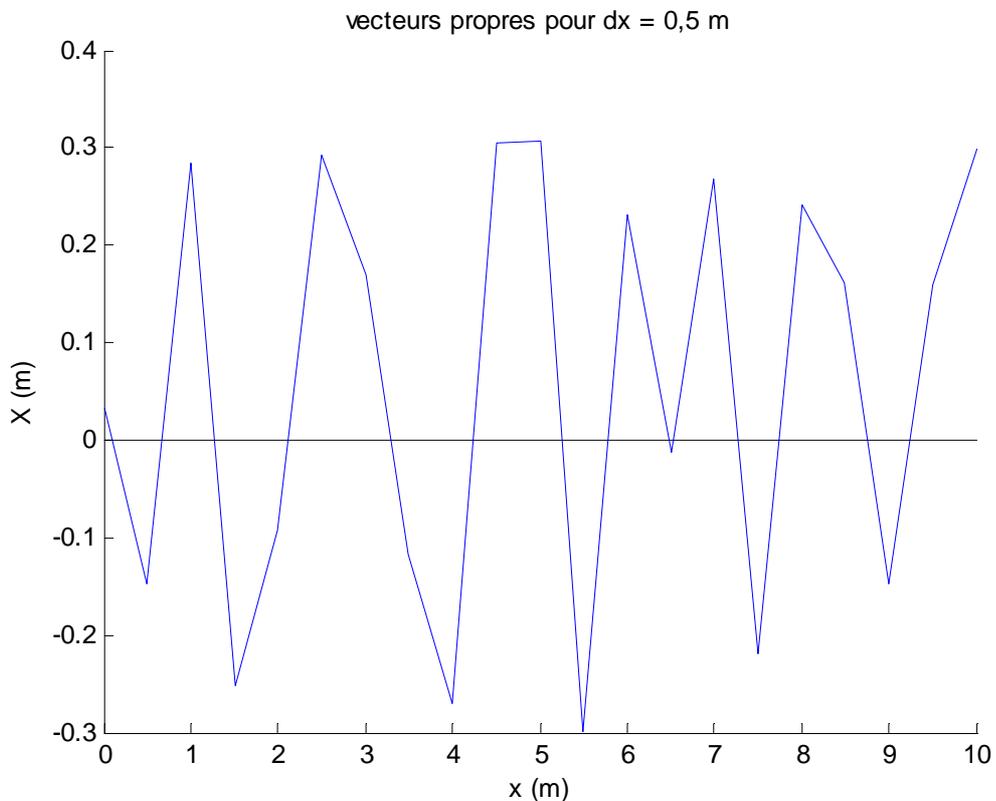


Figure 23 : Représentation des vecteurs propres pour $dx = 0,5\text{ m}$

III-2-6-APPLICATION EXPERIMENTALE (VOIR ANNEXE 2)

Nous allons maintenant tenter de reproduire des seiches dans le canal à houle de l'ISTTV afin de confronter nos résultats à l'expérience.

III-2-6-1-Protocole expérimental :

Dans un premier temps nous étudierons le cas d'un fond plat sans obstacle.

Tout d'abord on place, au bout du canal, une planche représentant l'extrémité du canal. On place ensuite une sonde (Sonde 1) au milieu du canal et une autre (sonde 2) à la paroi.

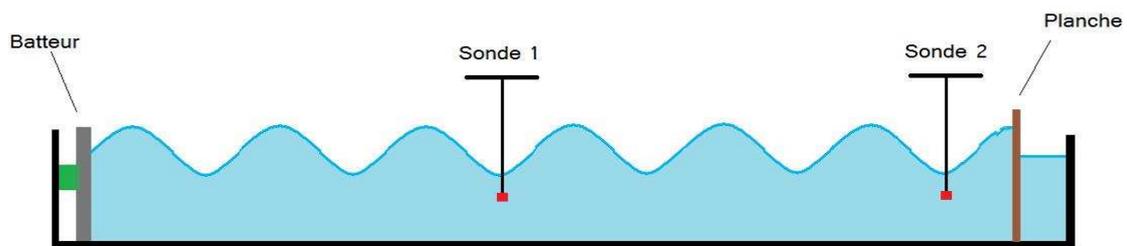


Figure 24 : Schéma expérimental du cas à fond plat

Après avoir étalonné les deux sondes, on envoie un seul coup de batteur afin de créer un seul train d'onde.

On enregistre alors la déformée de la surface libre grâce aux sondes sur l'ordinateur.

On renouvelle l'expérience trois fois afin de pouvoir comparer les résultats.

Le niveau au repos est d'environ 21 cm.

III-2-6-2-Etalonnage des sondes, traitement des données

Nous relevons le potentiel pour quatre profondeurs :

Profondeur (cm)	3,6	7,6	11,6	15,6
Sonde 1	0,122	1,309	2,485	3,779
Sonde 2	-0,02	0,781	1,621	2,666

Sachant que la loi d'étalonnage est linéaire, on en déduit par une régression linéaire les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Profondeur} &= 3,2913 \cdot \text{Potentiel} + 3,2683 && \text{pour la sonde 1} \\ \text{Profondeur} &= 4,4770 \cdot \text{Potentiel} + 3,9500 && \text{pour la sonde 2} \end{aligned}$$

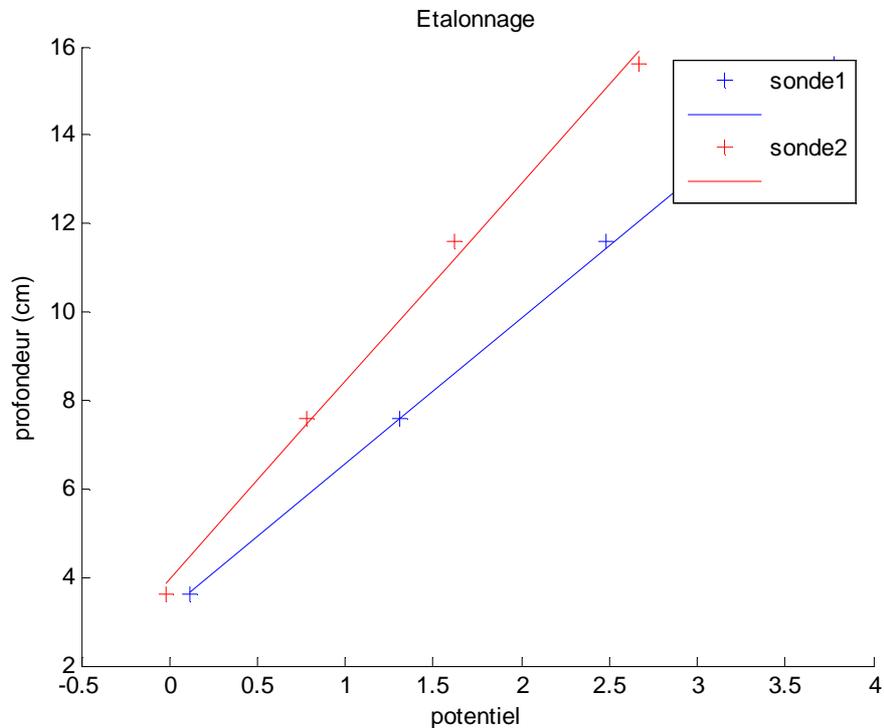


Figure 25 : Etalonnage des deux sondes

Nous remarquons que, pour un potentiel nul, la profondeur est non nulle et environ égale à 3 cm pour les deux sondes. Cela vient certainement de la précision des sondes. Donc afin d'obtenir une représentation du signal qui oscille autour du niveau moyen zéro, il est nécessaire de retrancher cette valeur lorsque nous calculons la déformée de la surface libre. Cependant nous nous sommes aperçus que même après avoir retranché cette valeur, la valeur initiale de la profondeur était toujours non nulle. Cela est dû en fait à l'erreur venant de la régression linéaire qu'il est nécessaire aussi de retrancher. C'est ce que nous avons appelé err1 et err2 dans le script, respectivement pour la sonde 1 et 2.

III-2-6-3-Fond plat sans obstacle

Nous obtenons donc les signaux suivants pour une fréquence d'acquisition de 32 Hz :

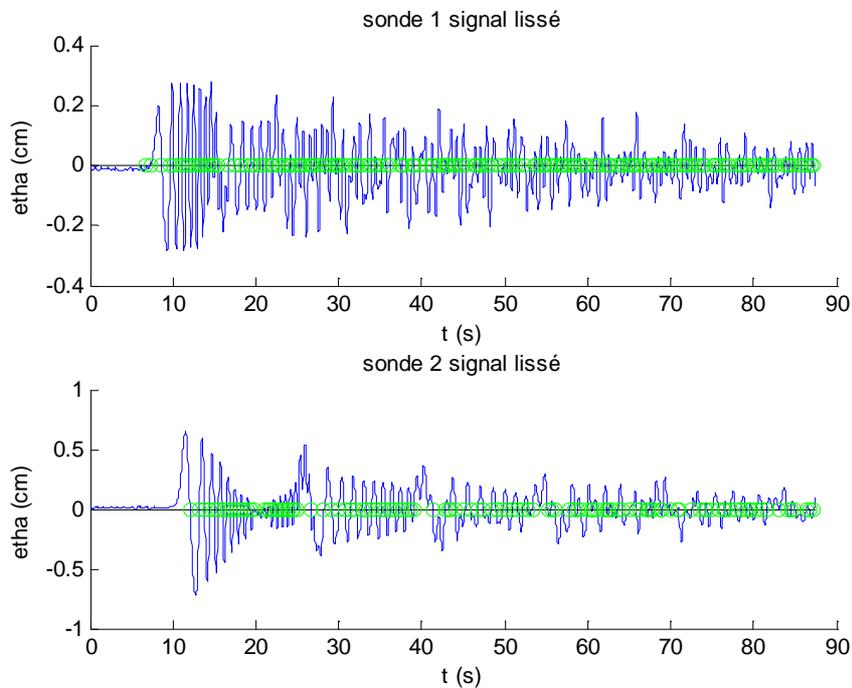


Figure 26 : Lissage des signaux des deux sondes

Une vague, par définition, est représentée par deux passages successifs croissants ou décroissants par le niveau moyen. Ainsi si nous voulons calculer la période de chaque vague, il nous faut localiser les passages par zéro (entourés en vert dans la figure précédente). Pour éviter d'obtenir des erreurs aléatoires provenant de la forme du signal et donc pour nous faciliter le codage sous Matlab, nous avons lissé le signal en effectuant une moyenne sur cinq points.

Après avoir calculé la période de chacune des vagues, nous obtenons les distributions suivantes :

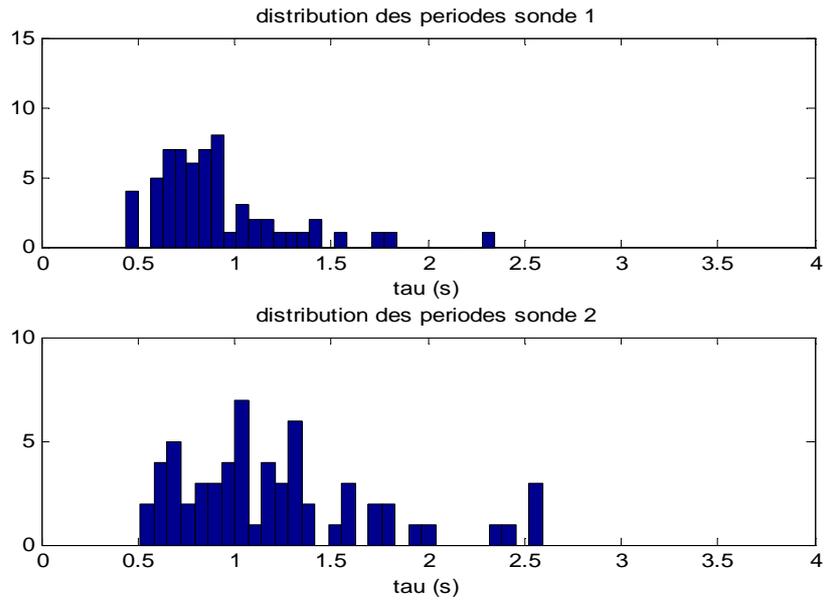


Figure 27 : Distribution des périodes des deux signaux

La période moyenne calculée pour la sonde 1 est 0,9129 s et celle calculée pour la sonde 2 est 1,2239 s. Si on se réfère aux périodes obtenues par modélisation, ces périodes correspondent en effet à des modes propres mais nous n'obtenons pas la période du mode fondamentale. Cela est certainement dû au fait que nous n'avons pas apporté l'énergie nécessaire lors de l'excitation initiale du canal.

Aussi il nous a paru intéressant de faire une analyse fréquentielle sur la fin du signal (dernier quart), là où en principe la seiche se met en place. Nous obtenons les FFT's suivantes :

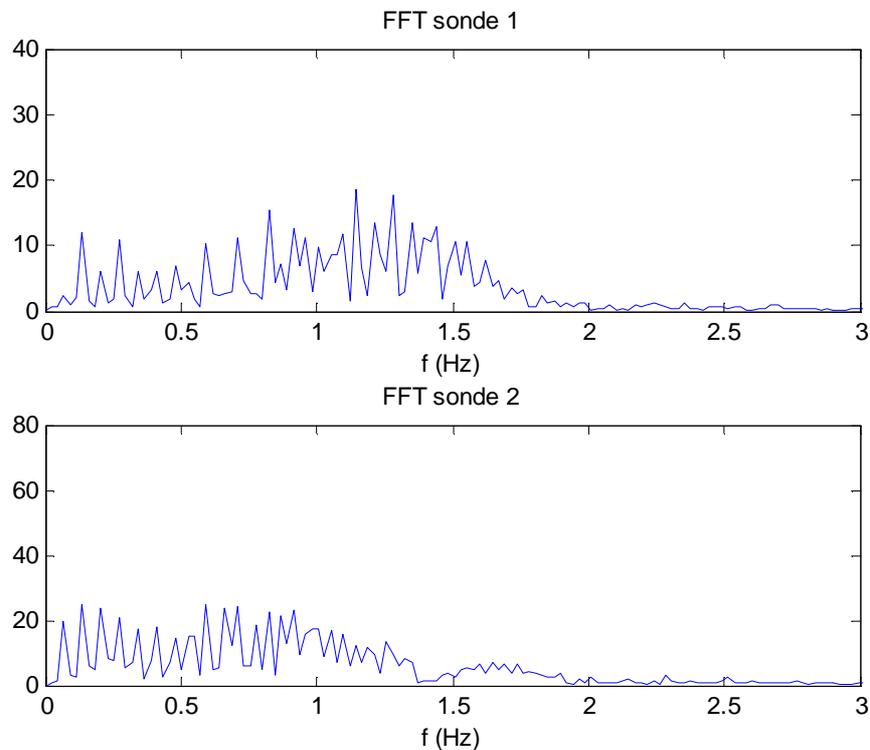


Figure 28 : Représentation des analyses fréquentielles des deux signaux

Afin de mieux observer les premiers pics nous avons fait un zoom sur ceux-ci et superposé les FFTs des 2 sondes.

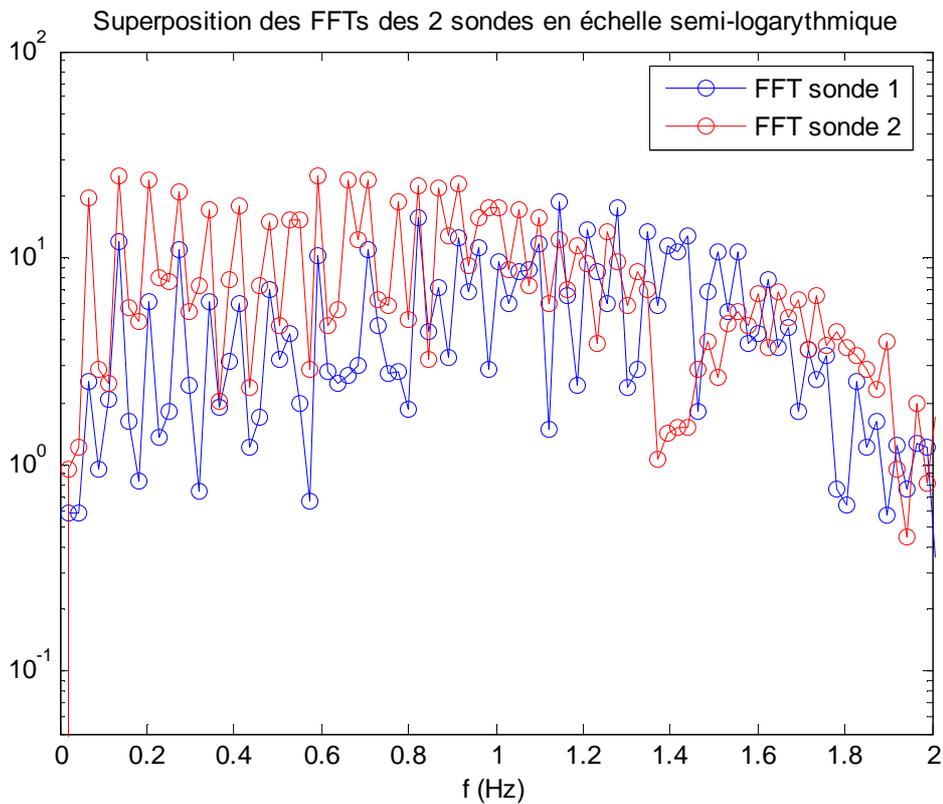


Figure 29 : Superposition des analyses fréquentielles

On ne s'intéresse uniquement qu'à la sonde 1 placée au milieu du canal car la sonde 2 étant positionnée à la paroi du canal, donne des résultats faussés par la viscosité.

Si nous nous intéressons maintenant aux pics fondamentaux et plus particulièrement au premier pic pour la sonde 1, nous trouvons une fréquence d'environ 0,07 Hz ce qui correspond bien au premier mode fondamental du mode numérique. Les autres pics correspondent aussi à des harmoniques mais de modes différents.

En effet expérimentalement on trouve les valeurs suivantes :

n° pic	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
fréquence (Hz)	0.0685	0.1371	0.2057	0.2971	0.3429	0.4343	0.48	0.5257	0.5943	0.7314	0.8229	0.8457

Les valeurs en rouges correspondent respectivement aux mêmes harmoniques du mode 1, les valeurs en vert concordent avec les harmoniques 15, 17 et 21 du second mode et la valeur en violet avec l'harmonique 35 du mode 3.

MODE 1

N°harmonique	m=1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F1m	0.07	0.14	0.21	0.28	0.35	0.42	0.49	0.56	0.63	0.70	0.77	0.84

On peut donc remarquer une certaine cohérence entre nos résultats numériques, théoriques et expérimentaux.

III-2-6-4-Fond avec trois briques

On s'intéresse maintenant au cas avec obstacle. Pour cela, on place au milieu du canal trois briques dont voici les caractéristiques de chacune :

Hauteur : 5,4cm
 Longueur : 20,6 cm
 Largeur : 10,1cm

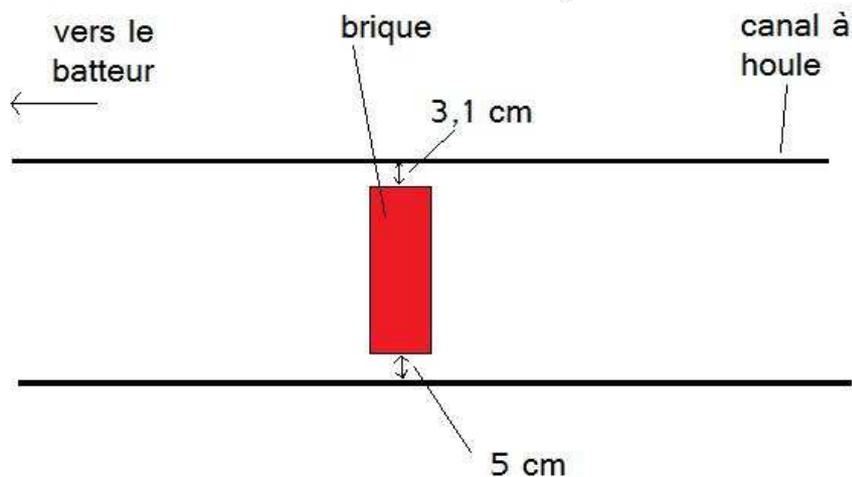


Figure 30: Vue de dessus du dispositif.

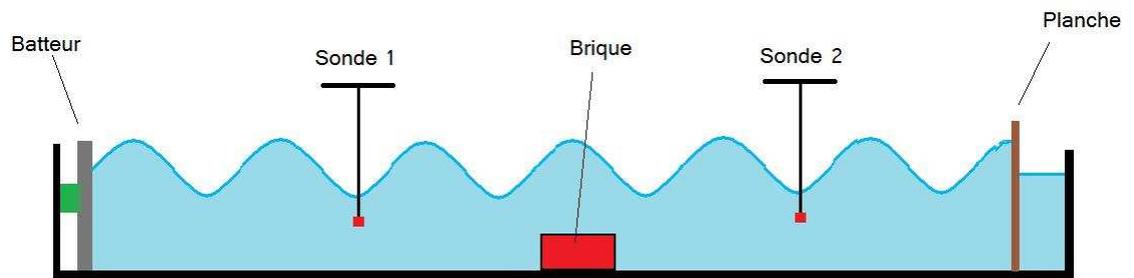


Figure 11: Schéma expérimental pour le cas avec un obstacle.

Ces trois briques présentent l'obstacle suivant :

Hauteur : 16,2 cm

Longueur : 20,6 cm

Largueur : 10,1cm

Le bassin est donc séparé en deux parties égales. Au milieu de chacune, on place une sonde. Cette expérience s'est révélé finalement avoir peu d'intérêt car nous n'aurions pas dû placer l'obstacle au milieu du canal afin d'obtenir deux bassins de longueurs différentes.

De plus, on constate que les périodes observées sont relativement égales ($T=1,0258s$ pour la sonde 1 et $T=1,1334s$ pour la sonde 2) du fait que les bassins soient de mêmes caractéristiques et proches du cas sans obstacle ($T=0,9129s$). On peut expliquer ceci par le fait que la digue formée par les briques ne séparait pas de manière étanche les bassins. En effet de l'eau pouvait circuler par-dessus et de chaque côté de l'obstacle.

III-3- MODELE A DEUX DIMENSIONS

III-3-1-POSITION DU PROBLEME

Le problème de valeur propre dans un espace horizontal à deux dimensions est formellement similaire au problème 1D précédent. L'évolution des seiches dans un bassin 2D suit les équations des ondes longues. Mais comme pour le cas 1D le problème de valeur propre est un problème linéaire qui est indépendant des termes de tension de surface et de forçage météorologique. De plus, pour la plus part des bassins côtiers de petites et de moyennes tailles, les influences géostrophiques sont faibles et l'accélération de Coriolis peut être négligée. Etant donné le domaine d'application de notre cas d'étude (canal de l'ISITV), cette force est évidemment négligée.

En prenant en compte les hypothèses précédentes les équations d'onde non-homogène sont les suivantes :

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = g \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(h \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} \right), \quad \frac{\partial^2 q_\alpha}{\partial t^2} = gh \frac{\partial^2 q_\alpha}{\partial x_\alpha \partial x_\alpha}$$

Avec $x_\alpha = (x, y)$ les variables de position horizontale, $h(x_\alpha)$ le champ de bathymétrie et $q_\alpha(x_\alpha, t)$ les composantes du flux intégrées sur la verticale.

Comme pour le problème 1D nous nous focaliserons sur l'équation de η .

Ainsi pour des solutions périodiquement temporelles,

$$\eta(x_\alpha, t) = X(x_\alpha, \omega) \exp [i\omega t]$$

L'équation d'onde à deux dimensions peut s'écrire :

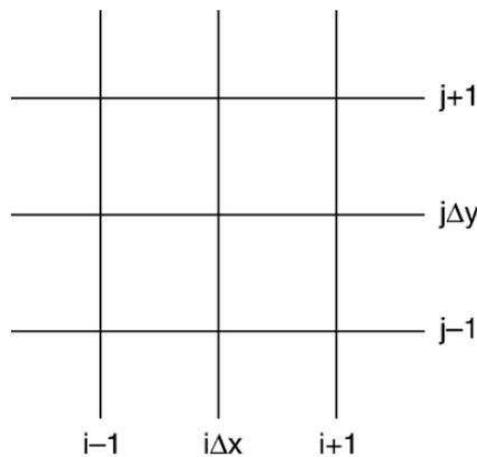
$$\frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(h \frac{\partial X}{\partial x_\alpha} \right) + \frac{\omega^2}{g} X = 0$$

III-3-2-DISCRETISATION DU PROBLEME

Une approximation discrète locale de $h(x_\alpha)$ et $X(x_\alpha)$ permet une reformulation en un problème classique de valeur propre de matrice de la forme du cas 1D. Une approximation locale biquadratique de l'équation précédente est :

$$a_{i-1,j} X_{i-1,j} + a_{i+1,j} X_{i+1,j} + a_{i,j-1} X_{i,j-1} + a_{i,j+1} X_{i,j+1} + a_{i,j} X_{i,j} + \frac{\omega^2}{g} X_{i,j} = 0$$

Avec (i, j) les indices sur une grille bidimensionnelle de pas spatial $(\Delta x, \Delta y)$ pour un bassin.



Maillage 2D

Où $X_{i,j} = X(i\Delta x, j\Delta y)$, et les coefficients de la matrice \mathbf{A} sont :

$$a_{i-1,j} = \frac{4h_{i,j}+h_{i-1,j}-h_{i+1,j}}{4\Delta x^2}, \quad a_{i+1,j} = \frac{4h_{i,j}-h_{i-1,j}+h_{i+1,j}}{4\Delta x^2}, \quad a_{i,j-1} = \frac{4h_{i,j}+h_{i,j-1}-h_{i,j+1}}{4\Delta y^2}$$

$$a_{i,j+1} = \frac{4h_{i,j}-h_{i,j-1}+h_{i,j+1}}{4\Delta y^2} \text{ et } a_{i,j} = -2\frac{h_{i,j}}{\Delta x^2} - 2\frac{h_{i,j}}{\Delta y^2}$$

Dans lesquelles $h_{i,j} = h(i\Delta x, j\Delta y)$.

Pour un bassin fermé, les conditions aux limites sont un flux nul aux bords :

$$\frac{dX}{dx} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dX}{dy} = 0$$

La taille de la matrice \mathbf{A} est $(N^2 * N^2)$ et n'est pas symétrique, N étant le nombre de nœud de notre maillage. Cela se comprend facilement si l'on raisonne sur le fait que notre bassin à deux dimension est en fait une association de bassin à une dimension. Ce qui implique qu'on aura des sous-matrices de taille $(N * N)$ correspondant à chaque colonne imbriquées une à une sur la diagonale de la matrice \mathbf{A} . Ainsi $(N * N)$ valeurs propres λ_n sont identifiées.

III-3-3-CODAGE

Comme le cas à une dimension il nous faut auparavant définir les dimensions et la bathymétrie du bassin. Pour valider les résultats obtenus avec ce modèle, nous allons l'appliquer au canal de l'ISITV. Nous pourrons ainsi comparer les résultats avec ceux obtenus dans l'approximation à une dimension.

Si l'on considère l la largeur du bassin suivant x et L sa longueur suivant y , les conditions aux limites imposent, à $x = 0$ et à $x = l$, que le flux soit nul soit $\frac{dX}{dx} = 0$. De la même manière, à $y = 0$ et à $y = L$, on a $\frac{dX}{dy} = 0$. On aura donc $X_{i,0} = X_{i,1}$, $X_{i,N-1} = X_{i,N}$, $X_{0,j} = X_{1,j}$ et $X_{N-1,j} = X_{N,j}$.

Les conditions aux limites sur les bords en $x = 0$ et en $x = l$ sont codé de la même manière que précédemment, cependant celles en $y = 0$ et en $y = L$ sont différentes car elles sont appliquées uniquement à la 1^{ière} et à la dernière colonne du bassin donc à la 1^{ière} et à la dernière « sous-matrice ».

Sachant que la matrice \mathbf{A} est carré, il ne faut pas oublié que définir les pas spatiaux Δx et Δy de manière à avoir autant de nœud suivant x que suivant y .

Nous définissons donc \mathbf{A} de la manière suivante :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} [(1)] & 0 & n & 0 & 0 \\ 0 & [(2)] & 0 & n & 0 \\ n & 0 & \ddots & 0 & n \\ 0 & n & 0 & [(2)] & 0 \\ 0 & 0 & n & 0 & [(3)] \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec } [(1)] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & \dots & 0 & 0 \\ a_{0,1} & a_{1,0} + a_{1,1} & & a_{2,1} & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & a_{N-2,1} & a_{N-1,0} + a_{N-1,1} & a_{N,1} & \\ 0 & 0 & \dots & & 1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$[(2)] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_1 & a_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & a_{N-2} & a_{N-1} & a_N \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$\text{Et } [(3)] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & \dots & 0 & 0 \\ a_{0,N-1} & a_{1,N} + a_{1,N-1} & & a_{2,N-1} & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & a_{N-2,N-1} & a_{N-1,N} + a_{N-1,N-1} & a_{N,N-1} \\ 0 & 0 & \dots & & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Les diagonales composées des coefficients // viennent du terme $a_{i,j+1}X_{i,j+1}$.

Les valeurs intermédiaires étant données par $a_{i-1,j}$, $a_{i+1,j}$, $a_{i,j-1}$, $a_{i,j+1}$ et $a_{i,j}$.

III-3-4-ANALYSE DES RESULTATS

Nous obtenons donc pour les pas $\Delta y = 40$ cm et $\Delta y = 1,2$ cm, les périodes propres suivantes :

	n=1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	etc.
T_{0n}	12.97	5.48	3.73	2.71	2.66	1.93	1.72	1.72	1.66	1.40	1.30	1.18	...

Remarque : le choix des pas Δx et Δy , et donc du nombre de nœud, est comme le modèle 1D, important. Nous avons remarqué qu'en augmentant le nombre de nœud N , les valeurs des périodes devenaient plus importantes, mais aussi que pour certaines valeurs de N les valeurs propres que retourne le modèle sont absurdes. Cependant les modes propres que nous obtenons sont très cohérentes avec les valeurs que nous avons obtenues dans l'approximation à une dimension.

CONCLUSION :

Nous avons donc dans une première partie procédé à une analyse fréquentielle des signaux. Cette analyse a fait l'œuvre de plusieurs essais via différents programmes Matlab.

Nous avons partagé cette analyse en deux parties, une première annuelle qui nous a permis de relever les pics dominants de fréquences par années.

Ensuite, nous avons effectué une analyse en ondelettes mensuelle grâce à laquelle nous avons pu déceler les événements particuliers s'étant produits dans la gamme de fréquence des seiches [20 min ;1h].

Nous avons également utilisé cette technique pour étudier certains événements survenus ces dernières années dans la région méditerranéenne, comme le séisme de Burmades (Algérie, mai 2003) et le mini raz de marée survenu à Marseille en aout 2004.

Ces séries d'analyse nous ont permis d'avoir une première approche fréquentielle sur les phénomènes des seiches dans la Rade de Toulon.

Nous avons dans une seconde partie appliqué le modèle numérique proposé par Sobey dans son étude « Normal mode of decomposition for identification of stormtide and tsunami hazard ». Après avoir rencontré des difficultés liées aux conditions limites dans le modèle à deux dimensions, nous avons décidé de concentrer nos efforts sur la réalisation d'un modèle à une dimension.

Nous avons alors confronté nos résultats au modèle théorique et obtenu des résultats cohérents.

Enfin nous avons voulu vérifier la validité de notre modèle par l'expérience en réalisant des manipulations dans le canal de l'ISITV. Nos résultats expérimentaux ont révélé un phénomène que nous n'avions pas pris en compte dans notre modélisation : l'influence des effets de bords sur la déformée de la surface libre, à l'origine de phénomènes non linéaires.

Le modèle à deux dimensions a tout de même été traité pour un cas simple et comparé aux résultats expérimentaux obtenus dans le canal.

BIBLIOGRAPHIE

- Documents :
- Resonance in Ploče Harbor (Adriatic Sea) de Ivica VILIBIĆ and Hrvoje MIHANOVIĆ.
- Seiche characteristics of Rotterdam Harbour de M.P.C. de Jonga, J.A. Battjes
- Normal mode decomposition for identification of storm tide and tsunami hazard de Rodney J. Sobey
- The observation of seiches in the Baltic Sea using a multi data set of water levels, de Margitta Metzner , Martin Gade , Ingo Hennings , Alexander . Rabinovich
- Marée et seiches de O.Thual
- Tidal, seiche and wind dynamics in a small lagoon in the Mediterranean Sea de Marcello Niedda , Mauro Greppi
- The role of the fundamental seiche in the Adriatic coastal floods de Ivica Vilibic´
- Numerical modelling of coastal seiches in Malta de Aldo Drago
- Seiche-forced resuspension events in a Mediterranean harbour de A. Jordia, G. Basterretxeab, B. Casasb, S. Angle´ sc, E. Garce´ s
- Seiches ou flux et reflux du lac de Genève de Fatio de Duillier
- On the hydrodynamical theory of seiches de Chrystal
- The Sumatra tsunami of 26 December 2004 as observed in the North Pacific and North Atlantic oceans de Alexander B. Rabinovich, Richard E. Thomson, Fred E. Stephenson
- Tides and Waves de Airy
- The design and construction of harbour de T. Stevenson
- Generation of long period seiches in table Bay, Cape Town, by barometrics oscillations de Wilson
- Harbour resonance due to set down beneath wave groups de E.C. Bowers
- Aperçus sur la similitude des modèles réduits destinés à l'étude des seiches portuaires de Biesel-le Mehaute
- Généralités sur les seiches et les ondes de seiches de Biesel-le Mehaute

- Cours d'hydraulique maritime de R.Bonnefille
- Houles, rides, seiches et marées de H.Bouasse
- Etude des ondes longues dans les problèmes maritimes de F.DHELEMMES
- Nature et histoire du Léman. Le Guide du Léman par Paul Guichonnet

- Sites :

En raison du grand nombre de sources internet, nous ne mettrons ici que les plus utiles.

- Site du Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales
<http://www.sonel.org/>
- Site du Centre Météorologique de la Marine
<http://www.meteo.shom.fr/index-fr.html>
- Site du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT-ECMWF *en anglais*)
<http://www.ecmwf.int/>
- Site du Sémaphore, la base de données du réseau des Chambres de Commerce et d'Industrie sur les aides aux entreprises
<http://www.semaphore.cci.fr/>
- Site du centre de données océanographiques SISMER
http://www.ifremer.fr/sismer/index_FR.htm
- Site du centre de données temps réel de subsurface acquises dans le cadre du programme national CORIOLIS
http://www.ifremer.fr/coriolis/coriolis_fr/
- Site du centre de données satellitaires CERSAT
<http://www.ifremer.fr/cersat/fr/index.html>

ANNEXES

ANNEXE A : Où trouver des données météo-océaniques pour l'ingénierie marine ?

Lors de notre projet, nous avons été amenés à rechercher des données adaptées à cette étude telles que des données météorologiques, marégraphiques,... Ainsi nous pouvons donner quelques pistes sur les endroits où l'on peut trouver les données suivantes :

- Données marégraphiques :

Les marégraphes côtiers fournissent des mesures de hauteur d'eau du niveau de la mer, parfois depuis près de deux siècles. A l'origine déployés pour la navigation et la prédiction de la marée, leur champs d'application s'est considérablement élargi de l'ingénierie côtière et l'aménagement du littoral à la connaissance précise des variations du niveau de la mer liées aux événements extrêmes (tempêtes, tsunamis...) et aux changements climatiques, dont le niveau de la mer est un paramètre essentiel.

- **Le Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL)** met à la disposition de tous, sous réserve d'acceptation de leur charte d'utilisation, des mesures de hauteur d'eau de marégraphes côtiers permanents, à des cadences de 10 minutes et horaires, avec un délai typique de 15 jours et de 3 mois, respectivement.

On y retrouve les données de marégraphes le long du littoral français mais aussi que pour Hawaï et la Rochelle et d'autres régions du globe. Ces données proviennent de réseaux de marégraphes tels que :

- le réseau *ROSAME* (Le Réseau d'Observation Subantarctique et Antarctique du niveau de la MER est un réseau de marégraphes modernes géré par le laboratoire LEGOS, à Toulouse, avec les soutiens de plusieurs organismes (INSU, Ministère de la Recherche, Ifremer, et IPEV), des soutiens indispensables pour maintenir opérationnelles des stations dans un milieu isolé, difficile d'accès).

- le réseau RONIN (Réseau d'Observation du Niveau de la Mer, réseau de marégraphes modernes mis en place et géré par le SHOM avec le soutien de nombreux partenaires locaux (Ports, DDE,...)).

- le réseau PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level), service international qui, depuis 1933, fournit des valeurs mensuelles et annuelles du niveau moyen de la mer de marégraphes distribués dans le monde entier, opérationnels ou passés.

-The Joint Archive for Sea Level (JASL), the University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC), the World Data Center-A for Oceanography, the National Oceanographic Data Center (NODC), and the National Coastal Data Development Center (NCDDC).

- **Les Directions Départementales de L'Equipement (DDE).**

- Les Ports Autonomes.

- Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM).

- L'Institut Géographique National (IGN)

- Les compagnies intervenant dans le domaine du génie côtier telles que la SOGREAH, le BCEOM, ERANM, ...

En revanche, en ce qui nous concerne, notre principale source de données fut le site du SONEL.

- Données météorologiques :

Les données météorologiques semblent les plus dures à obtenir. Nous n'avons obtenu que des données de pression sur le site du SONEL. Néanmoins vous pouvez toujours essayer :

- Le centre de Météorologie Marine de Météo France.

- le site du SONEL qui récupère le maximum de données.

- le site du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT-*ECMWF en anglais*), une organisation dont les principaux objectifs sont :

- le développement de méthodes numériques pour la prévision météorologique à moyen terme;

- l'élaboration régulière de prévisions à moyen terme sur l'Europe et la mise à disposition de ces prévisions aux services météorologiques des États-membres;

- la recherche scientifique et technique dans le but d'améliorer ces prévisions;

- la collecte et l'archivage de données météorologiques.

(Donnée payantes)

- le site du Sémaphore, la base de données du réseau des Chambres de Commerce et d'Industrie sur les aides aux entreprises.

En outre l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) met à disposition des bases de données numériques en ligne. Les principales sont :

- Le centre de données océanographiques SISMER.
- Le centre de données temps réel de subsurface acquises dans le cadre du programme national CORIOLIS.
- Le centre de données satellitaires CERSAT.

En outre un document intitulé Source de données météo-océaniques pour l'ingénierie marine est mis à disposition par l'Ifremer et téléchargeable en ligne.

- Données bathymétriques :

Les données bathymétriques peuvent être récupérées via le SHOM mais ces données sont payantes. En outre vous pouvez essayer l'IGN ainsi que des sociétés de génie côtier, de survey,...(comme par exemple SEMANTIC TS, Océanide S.A, Creocan, Sogreah, Bceom, Acri-in, Eranm...)

N.B :

Ces informations sont disponibles sur le site que nous avons créé à l'adresse suivante :

<http://isityprojetseiche.e-monsite.com/> . Ce dernier comporte, en plus des informations données ci-dessus, des liens internet pour les différentes sources d'informations.

ANNEXE B : Premier programme codé avec le logiciel Matlab

Programme « seiches » :

```
clear all
close all
warning off
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Création de la boîte de dialogue pour le choix du port
prompt = {'De quelle ville souhaitez-vous voir les spectres d énergie ?
Vendres'};
dlg_title = 'Spectres d énergie';
answer=inputdlg(prompt,dlg_title);
A=(answer{1});
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Marseille
if (A=='1')
    for n=1:9
        filename=('marseille0' num2str(n));
        matrix=load(['marseille0' num2str(n) '.txt'],'-ascii');
        spectre
    end
    for n=10:11
        matrix=load(['marseille' num2str(n) '.txt'],'-ascii');
        spectre
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Toulon
if (A=='2')
    for n=1:9
        filename=('toulon0' num2str(n) '.txt');
        matrix=load(['toulon0' num2str(n) '.txt'],'-ascii');
        spectre
    end
    for n=10:11
        filename=('toulon' num2str(n) '.txt');
        matrix=load(['toulon' num2str(n) '.txt'],'-ascii');
        spectre
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Sète
if (A=='3')
    for n=1:2
        filename=('sete0' num2str(n) '.txt');
        matrix=load(['sete0' num2str(n) '.txt'],'-ascii');
        spectre
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Port Vendres
if (A=='4')
    for n=1:2
        filename=('port_vendres0' num2str(n) '.txt');
        matrix=load(['port_vendres0' num2str(n) '.txt'],'-ascii');
        spectre
    end
end
end
msgbox({'strcat('Vérifier Marseille 2005 et 2006, Toulon 2006 et 2008, Sète 2007)'},'Attention')
```

Programme « spectre » :

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Définition des variables tirées des fichiers sources
jour=matrix(1:length(matrix),2);
mois=matrix(1:length(matrix),3);
annee=matrix(1:length(matrix),4);
heure=matrix(1:length(matrix),5);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% conversion des mois en seconde
conversion_mois
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Définition du vecteur temps
t=((jour-1)*24*3600+heure*3600+mois);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Définition du vecteur niveau d'eau
```

```

y=matrix(:,6);
%% Interpolation des données
c=zeros(1:2*(length(y)),1);
for i=1:length(y)
    c(2*(i-1)+1)=y(i);
end
for i=1:length(c)/2
    c(2*i)=(c(2*i-1)+c(2*i+1))/2;
end
%% Définition du filtre passe-bande
fs=1/300;
%Wn=[1/5400 1/601]*2*pi;
Wn=[1/5400 1/601]/fs;
ordre=800;
b=fir1(ordre,2*Wn,'bandpass');
%% Application du filtre passe-bande au signal temporel
h=filter(b,1,c);
%% Spectre d'énergie
Y=fft(h);
N=length(h);
df=1/(max(t)-min(t));
f=(0:1:N/2)*df;
%% Affichage du spectre
figure(n)
    hold on
    loglog(f(2:N/2+1),abs(Y(2:N/2+1)))
    title(['S(f) ', num2str(annee(1,1))])
    xlabel('f (Hz)')
    ylabel('S(f)')
    hold off
%% Affichage du niveau d'eau
figure(n+100)
    subplot(2,1,1)
    hold on
    plot(t,y)
    hold off
    subplot(2,1,2)
    hold on
    plot(c)
    plot(h,'r')
    %plot(t,h,'r')
    title(['\itNiveau de l eau en ', num2str(annee(1,1))])
    xlabel('Temps (s)')
    ylabel('Niveau de l eau (m)')
    hold off

```

ANNEXE C : Second programme

Programme de vérification des données:

```
function load_toulon(filename)

cpt=0;
fid=fopen(filename);
while 1
    tline = fgetl(fid);
    if ~ischar(tline)
        break
    end
    cpt=cpt+1;
end
fclose(fid);
cpt

[datum,mth,day,year,time,y]=textread(filename,'%s %d %d %d %s %f', cpt);

r=1;
ref=3600*24;
buf=0;
dt=0;
j=1;
t1(j)=str2num(time{j,1}(7:8)) + 60*str2num(time{j,1}(4:5)) + 3600*str2num(time{j,1}(1:2));
t(j)=t1(j);
for j=2:cpt
%for j=2:148
    t1(j)=str2num(time{j,1}(7:8)) + 60*str2num(time{j,1}(4:5)) + 3600*str2num(time{j,1}(1:2));
    t(j)=t1(j);
    if(j~=1 & t1(j)==0)
        dt=ref-t1(j-1);
        t(j)=t(j-1)+dt;
    elseif(j~=1 & t1(j)~=0)
        dt=t1(j)-t1(j-1);
        t(j)=t(j-1)+dt;
    end
end

%%%%%%%% save data in filename.mat

eval(['save ', filename(1:length(filename)-4),' datum time y t1 t']);

%%%%%%%%
figure;
plot(t,y)
xlabel('t (s)')
ylabel('ellev (m)')

%%%%%%%%
figure;
subplot(2,1,1)
plot(t)
xlabel('data index')
ylabel('t (s)')
subplot(2,1,2)
```

```
plot(diff(t))
xlabel('data index')
ylabel('dt (s)')
```

Programme d'analyse spectrale sur 1 an :

```
clear all
close all

% load data
load toulon07;
my=mean(y);
NGF=0.55;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% disp data, check missing data
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(t,y)
xlabel('s')
ylabel('UNIT')

subplot(2,1,2)
plot(t,y-NGF)
xlabel('s')
ylabel('UNIT-NGF')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Correction for mean water level (arithmetic mean)
%y=y-NGF;
y=y-my;

tu=t;  yu=y;
clear t y;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% TO MODIFY (check dt-regularity with
load_toulon.m)
imin=1;
%imax=39995;           % for toulon02.txt (treat only [1,imax] values in file
imax=length(yu);      % for toulon03.txt (treat only [1,imax] values in file

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% computation

t=tu(1,imin:imax);
y=yu(imin:imax,1);

N=length(t);
dt=t(2)-t(1);

Tobs=max(t)-min(t);
df=1/Tobs;

fech=1/dt;
fnyq=fech/2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Remove mean level variations
f1=1/5;           % in cyc/hr - mini cut-off freq
f1=1.23;         % in cyc/hr - mini cut-off freq
```

```

f2=(fnyq-df)*3600;      % in cyc/hr - maxi cut-off freq
%f2=4;                 % in cyc/hr - maxi cut-off freq
%f2=1.25;              % in cyc/hr

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% TO MODIFY
%filt=1; % FFT method  (Highpass:f1)
%filt=2; % filtfilt method (Highpass:f1)
%filt=3; % fir1 method  (Pass-band:f1,f2)
filt=4; % cheby1 method  (Pass-band:f1,f2)

[ynew,y_filt]=correc_filters(y,t,filt,f1,f2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SPD of signal using smoothed periodogram
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% method( Welch's method)

Nopt=round(N/8);      % default length of signal segments used to average spectra results

window=1024;
%window=512;
noverlap=[];
%noverlap=0.5;
%noverlap=10;
nfft=[];

[Pxx,w] = pwelch(y>window,noverlap,nfft);
[Pxx_2,w_2] = pwelch(ynew>window,noverlap,nfft);

df_original=df;      % freq resolution (original data)
df_pwelch=(w(2)-w(1))/pi*fnyq; % freq resolution (averaged spectrum)

disp('=====  
SPD ESTIMATE');
disp(['df_1=',num2str(df_original)]);
disp(['df_2=',num2str(df_pwelch)]);
disp('====');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GRAPHICS
figure(3)
loglog(w/pi*fnyq*3600,Pxx)
hold on;
loglog(w_2/pi*fnyq*3600,Pxx_2,'r')
hold off;
xlabel('f (cyc.h^{-1})')
ylabel('Spectral Power density (m^2/ (cyc.h^{-1}) )')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(4)
subplot(2,1,1)
plot(t,y,'k',t,y_filt,'b')
legend ('original','removed')

subplot(2,1,2)
plot(t,ynew,'r')
xlabel('t (s)')
ylabel('level (m)')

gend ('Filtered new signal')

```

ANNEXE D : Programmes du modèle numériques 1D et 2D

Programme permettant de modéliser des seiches dans le canal à houle de l'Isity sans obstacle pour un modèle à une dimension.

```
%=====
%                                     MODELE 1D                                     %
%=====

clear all
close all

%===== Dimensionnement du canal =====%

L=10;
N=20;
dx=L/N;
h0=0.21;
h=zeros(N+1,1);

for i=1:N+1
    h(i)=h0;
end

%===== matrice A =====%

A=zeros(N+1,N+1);

% diagonale i,i-1
for i=3:N
    A(i,i-1)=(h(i-1)+4*h(i)-h(i+1))/(4*dx^2);
end

% diagonale i,i
for i=2:N
    A(i,i)=-2*h(i)/(dx^2);
end

% diagonale i,i+1
for i=2:N-1
    A(i,i+1)=(-h(i-1)+4*h(i)+h(i+1))/(4*dx^2);
end

% conditions aux limites
A(1,1)=-1;
A(1,2)=1;
A(2,1)=(13*h(1)-12*h(2)+3*h(3))/(4*dx^2);
A(2,2)=(-5*h(1)+4*h(2)-h(3))/(dx^2);
A(2,3)=(7*h(1)-4*h(2)+h(3))/(4*dx^2);
A(N+1,N+1)=-1;
A(N+1,N)=1;
A(N,N-1)=-(h(N-1)-12*h(N)+7*h(N+1))/(4*dx^2);
A(N,N)=(-h(N-1)+4*h(N)-5*h(N+1))/(dx^2);
A(N,N+1)=(3*h(N-1)-12*h(N)+13*h(N+1))/(4*dx^2);
A

%===== calcul des valeurs propres =====%
[x,lambda]=eig(A);
%=====

T0mod=zeros(N+1,1);
g=9.81;
cpt=0;
for i=1:N+1
    for j=1:N+1
```

```

        if lambda(i,j)~=0 & lambda(i,j)<0
            cpt=cpt+1;
            T0mod(cpt,1)=(2*pi*sqrt(-1/(g*lambda(i,j))));
            f(cpt,1)=1/T0mod(cpt,1);
        end
    end
end
T0mod=sort(T0mod,'descend')
f=sort(f,'ascend')

for i=1:N+1
    l(i,1)=T0mod(i,1)*sqrt(g*h(i,1));
end
% l

%===== periode propres théoriques =====%

T0th=zeros(N+1,1);
n=1;

for i=1:N+1
    T0th(i)=2*L/(n*sqrt(g*h(i)));
    n=n+1;
end
T0th

%===== vecteurs propres =====%

X=zeros(N+1,1);

for i=1:N+1
    zero(i,1)=0;
end

cpt=0;
for i=1:N+1
    d(i,1)=cpt;
    cpt=cpt+dx;
end

cpt=1;
for i=1:N+1
    X(cpt,1)=x(i,i);
    cpt=cpt+1;
end

figure(1)
hold on
plot(d,zero,'k')
plot(d,X)
title('vecteurs propres pour dx = 0,5 m')
xlabel('x (m)')
ylabel('X (m)')
hold off

```

Programme permettant l'exploitation des résultats expérimentaux et théoriques pour un modèle à une dimension :

```

%=====
%                                     MODELE 1D                                     %
%=====

clear all
close all

load etal.txt
load etal2.txt
load plat1.txt

h(1)=3.6; pot1(1)=0.122; pot2(1)=-0.02;
h(2)=7.6; pot1(2)=1.309; pot2(2)=0.781;
h(3)=11.6; pot1(3)=2.485; pot2(3)=1.621;
h(4)=15.6; pot1(4)=3.779; pot2(4)=2.666;

P1=polyfit(pot1,h,1);
P2=polyfit(pot2,h,1);
h1th=polyval(P1,pot1);
h2th=polyval(P2,pot2);

figure(1)
hold on
plot(pot1,h,'+')
plot(pot1,h1th)
plot(pot2,h,'r+')
plot(pot2,h2th,'r')
hold off
title('Etalonnage')
xlabel('potentiel')
ylabel('profondeur (cm)')
legend('sonde1',' ','sonde2',' ')

err1=polyval(P1,plat1(1,1))-P1(1,2);
err2=polyval(P2,plat1(1,2))-P2(1,2);
etha1=polyval(P1,plat1(:,1))-(P1(1,2)+err1);
etha2=polyval(P2,plat1(:,2))-(P2(1,2)+err2);

s0=length(plat1);

% ===== lissage du signal ===== %

etham1(1,1)=(etha1(1,1)+etha1(2,1)+etha1(3,1))/3;
etham1(2,1)=(etha1(1,1)+etha1(2,1)+etha1(3,1)+etha1(4,1))/4;
etham1(s0-1,1)=(etha1(s0-3,1)+etha1(s0-2,1)+etha1(s0-1,1)+etha1(s0,1))/4;
etham1(s0,1)=(etha1(s0-2,1)+etha1(s0-1,1)+etha1(s0,1))/3;

cpt=3;
for i=3:s0-2
    etham1(cpt,1)=(etha1(i-2,1)+etha1(i-
1,1)+etha1(i,1)+etha1(i+1,1)+etha1(i+2,1))/5;
    cpt=cpt+1;
end

etham2(1,1)=(etha2(1,1)+etha2(2,1)+etha2(3,1))/3;
etham2(2,1)=(etha2(1,1)+etha2(2,1)+etha2(3,1)+etha2(4,1))/4;
etham2(s0-1,1)=(etha2(s0-3,1)+etha2(s0-2,1)+etha2(s0-1,1)+etha2(s0,1))/4;
etham2(s0,1)=(etha2(s0-2,1)+etha2(s0-1,1)+etha2(s0,1))/3;

cpt=3;
for i=3:s0-2

```

```

    etham2(cpt,1)=(etha2(i-2,1)+etha2(i-
1,1)+etha2(i,1)+etha2(i+1,1)+etha2(i+2,1))/5;
    cpt=cpt+1;
end

% ===== coordonnées des points en z=0 ===== %

facq=32;
dt=1/facq;
niv0=zeros(s0,1);

t(:,1)=(0:1:s0-1)*dt;

cpt=1;
for i=2:s0-1
    if etham1(i,1)*etham1(i+1,1)<0
        % point avant 0
        av1(cpt,1)=t(i,1);
        av1(cpt,2)=etham1(i,1);
        % point après 0
        ap1(cpt,1)=t(i+1,1);
        ap1(cpt,2)=etham1(i+1,1);
        % valeur moyenne
        t01(cpt,1)=av1(cpt,1)+(ap1(cpt,1)-av1(cpt,1))/2;
        cpt=cpt+1;
    elseif etham1(i,1)==0 & etham1(i-1,1)*etham1(i+1,1)<0
        t01(cpt,1)=t(i,1);
        cpt=cpt+1;
    end
end

cpt=1;
for i=3:s0-2
    if etham2(i,1)*etham2(i+1,1)<0
        % point avant 0
        av2(cpt,1)=t(i,1);
        av2(cpt,2)=etham2(i,1);
        % point après 0
        ap2(cpt,1)=t(i+1,1);
        ap2(cpt,2)=etham2(i+1,1);
        % valeur moyenne
        t02(cpt,1)=av2(cpt,1)+(ap2(cpt,1)-av2(cpt,1))/2;
        cpt=cpt+1;
    elseif etham2(i,1)==0 & etham2(i-1,1)~=0 & etham2(i-2,1)*etham2(i+2,1)<0
        t02(cpt,1)=t(i,1);
        cpt=cpt+1;
    end
end

s1=length(t01);
s2=length(t02);
z01=zeros(s1,1);
z02=zeros(s2,1);

figure(2)
subplot(2,1,1)
hold on
plot(t,etham1)
plot(t,niv0,'k')
plot(t01(:,1),z01(:,1),'go')
hold off
title('sonde 1 signal lissé')
xlabel('t (s)')
ylabel('etha (cm)')
subplot(2,1,2)
hold on
plot(t,etham2)

```

```

plot(t,niv0,'k')
plot(t02(:,1),z02(:,1),'go')
hold off
title('sonde 2 signal lissé')
xlabel('t (s)')
ylabel('etha (cm)')

% ===== distribution des vagues ===== %
% ===== histogramme et FFT ===== %

cpt=1;
for i=3:2:s2
    tau1(cpt,1)=t01(i,1)-t01(i-2,1);
    cpt=cpt+1;
end

cpt=1;
for i=3:2:s2
    tau2(cpt,1)=t02(i,1)-t02(i-2,1);
    cpt=cpt+1;
end

som1=0;
for i=1:length(tau1)
    som1=som1+tau1(i,1);
end

som2=0;
for i=1:length(tau2)
    som2=som2+tau2(i,1);
end

tau1m=som1/length(tau1)
tau2m=som2/length(tau2)

%T=t(s0)-t(1);
T=t(s0)-t(round(s0/2));
%T=t(s0)-t(round(3*s0/4));
df=1/T;

itime=find(t>t(round(s0/2)))
N0=length(itime);
freq=(0:1:N0/2)*df;
%%%%
figure(2)
subplot(2,1,1)
hold on
plot(t(round(s0/2)),0,'ro')
hold off
%%%
etham1b=etham1(itime);
etham2b=etham2(itime);

etham1b=etham1b-mean(etham1b);
etham2b=etham2b-mean(etham2b);

fft1=fft(etham1b);
fft2=fft(etham2b);

figure(3)
subplot(2,1,1)
hist(tau1,30)
axis([0 4 0 15])
title('distribution des periodes sonde 1')
xlabel('tau (s)')

```

```

subplot(2,1,2)
hist(tau2,30)
axis([0 4 0 10])
title('distribution des periodes sonde 2')
xlabel('tau (s)')

figure(4)
subplot(2,1,1)

plot(freq,abs(fft1(1:N0/2+1)),'b-o')
title('FFT sonde 1')
xlabel('f (Hz)')
axis([0 6 0 40])
subplot(2,1,2)
plot(freq,abs(fft2(1:N0/2+1)),'b-o')
title('FFT sonde 2')
xlabel('f (Hz)')
axis([0 6 0 80])

figure(5)
semilogy(freq,abs(fft1(1:N0/2+1)),'b-o')
xlabel('f (Hz)')
hold on;
semilogy(freq,abs(fft2(1:N0/2+1)),'r-o')
axis([0 2 0.05 100])
%axis([0 6 0 80])
hold off;
legend('FFT sonde 1','FFT sonde 2')

Tt=1/(mean(tau1(round(length(tau1)/2)):length(tau1)))
P=(mean(tau1(round(length(tau1)/2)):length(tau1)))

Tt2=1/(mean(tau2(round(length(tau2)/2)):length(tau2)))
P2=(mean(tau2(round(length(tau2)/2)):length(tau2)))

%%%%%%%%%Comparaison%%%%%%%%%

L=10;
g=9.81;
h=0.2;

T1=[]
T1(1,1)=2*L/(sqrt(g*h));
T1(1,1);
n=100;
f1(1,1)=1/T1(1);

%%%%%%%%%Harmoniques du model

for i=2:n
    f1(i,1)=i*f1(1);
end
f1;

for i=2:n
    T1(i,1)=T1(1)/i;
end
T1;

%%%%%%%%%Harmoniques du mode2
T2=[];
for i=1:n
    f2(i)=i/2*f1(1);
end
f2;

for i=1:n

```

```
        T2(i,1)=T1(1)/(i/2);
    end
    T2;

    %%%%Harmoniques du mode3
    T3=[];
    for i=1:n
        f3(i)=i/3*f1(1);
    end
    f3;

    for i=1:n
        T3(i,1)=T1(1)/(i/3);
    end
    T3;
```

Programme permettant de modéliser des seiches dans un bassin rectangulaire fermé à deux dimensions.

```
%===== %
%                                     MODELE 2D                                     %
%===== %

clear all
close all

%===== Dimensionnement du bassin ===== %

% ordonnée
n=1000;
% abscisse
m=30;
h=0.21;
H=zeros(n,m);

for i=1:n;
    for j=1:m;
        H(i,j)=h;
    end
end

dy=40; dx=m/(n/dy);
X=zeros(n,m); x=zeros(m,1);
Y=zeros(n,m); y=zeros(n,1);

cpt=0;
for i=1:m
    x(i,1)=cpt;
    cpt=cpt+1;
end

cpt=n-1;
for i=1:n
    y(i,1)=cpt;
    cpt=cpt-1;
end

[X,Y]=meshgrid(x,y);

%===== matrice A ===== %

N=(n/dy)*(m/dx);
Np=sqrt(N);
A=zeros(N);

% matrice bord
vlbord=ones(Np,1)*(-2*h/dx^2-2*h/dy^2+h/dy^2);
vlbord(1,1)=-1;
vlbord(Np,1)=-1;

% matrice milieu
v1=ones(Np,1)*(-2*h/dx^2-2*h/dy^2);
v1(1,1)=-1;
v1(Np,1)=-1;

v2=ones(Np-1,1)*h/dx^2;
v2(1,1)=1;
v3=ones(Np-1,1)*h/dx^2;
v3(Np-1,1)=1;

j1=diag(vlbord)+diag(v2,1)+diag(v3,-1);
j2=diag(v1)+diag(v2,1)+diag(v3,-1);
```

```

for i=1:Np
    A=A+blkdiag(zeros((i-1)*Np),j2,zeros((Np-i)*Np));
end

for i=1:Np
    A(i,i)=vlbord(i,1);
    A(N-Np+i,N-Np+i)=vlbord(i,1);
end

% diagonale de h sur la N ième diagonale et sur la -N ième diagonale
v4=ones(Np*(Np-1),1)*h;
A=A+diag(v4,Np)+diag(v4,-Np);

%===== Calcul des valeurs propres =====%
[x,lambda]=eig(A);
%=====

T0=zeros(N,1);
g=9.81;
cpt=1;
for i=1:N
    for j=1:N
        if lambda(i,j)~=0 & lambda(i,j)<0
            T0(cpt)=(2*pi*sqrt(-1/(g*lambda(i,j)*10^2)));
            cpt=cpt+1;
        end
    end
end
end

Tmod=sort(T0,'descend')

```