



**ANALYSE DES SEICHES A PARTIR DE
L'EXPLOITATION DE DONNEES
MAREGRAPHIQUES**

**Exploitation graphique, analyse fréquentielle et
recherche d'éléments déclencheurs**

DEVAUX Emmanuel

**VA : Gestion Cours d'Eau et Littoral
Promotion 54**

Juin 2009

Président du jury : NICOLAS Jean-Pierre
Maître de TFE : PINEAU-GUILLOU Lucia
Expert : PONS Frédéric

NOTICE ANALYTIQUE

	NOM	PRENOM	
AUTEUR	DEVAUX	Emmanuel	
TITRE DU TFE	Analyse des seiches à partir de l'exploitation de données marégraphiques		
	ORGANISME D'AFFILIATION ET LOCALISATION	NOM PRENOM	
MAITRE DE TFE	SHOM/CETMEF	PINEAU-GUILLOU Luçia	
COLLATION	Nbre de pages du rapport : 68	Nbre d'annexes :4	Nbre de réf. biblio : 21
MOTS CLES	Seiche /Port/Résonnance/Houle/Onde gravitaires/ NUNIEAU/REFONDE		
TERMES GEOGRAPHIQUES	Ile de Groix, Atlantique, Manche		
RESUME	<p>Les seiches (ondes stationnaires dans un bassin fermé ou semi-fermé) se manifestent par des oscillations de la surface libre. Elles posent parfois problème pour la sécurité de la navigation, et peuvent entraver le bon fonctionnement des ports. Les seiches sont enregistrées par les marégraphes mécaniques. Les données analogiques ont été recensées, puis numérisées à partir du logiciel NUNIEAU, développé par le CETE Méditerranée. Les signaux obtenus ont été traités pour filtrer la marée et isoler le signal de seiche. L'analyse fréquentielle des signaux de seiche a été mise en place sous Matlab, de manière à estimer les périodes propres de chaque seiche. L'utilisation du logiciel REFONDE, développé par le CETMEF, a permis d'évaluer les périodes propres des ports : les valeurs obtenues sont du même ordre que celles déterminées par l'analyse fréquentielle. Les éléments susceptibles de déclencher les seiches ont été étudiés : le vent, la pression atmosphérique et la houle. Les seiches de Port-Tudy et du Conquet sont principalement dues aux ondes infra gravitaires liées à la houle longue. L'exceptionnelle amplitude de la seiche de Port-Tudy (hauteur pouvant atteindre 1,70m) est probablement liée à la proximité des périodes propres du port et du bassin entre l'île de Groix et Lorient.</p>		
ABSTRACT	<p>Seiches (standing waves in a closed or semi-closed pond) appear by oscillations of the free surface. They sometimes cause difficulties for the security of navigation, and they can hinder the good running of harbors. Seiches are recorded by mechanical maregraphs. The analogical data were listed, and then digitized from the software NUNIEAU, developed by the CETE Mediterranée. The obtained signals were treated to filter the tide and isolate the seiche's signal. The frequencial analysis of the seiche's signal was done with Matlab, in order to estimate seiche's self periods. The use of the software REFONDE, developed by the CETMEF, allowed estimating the self periods of harbors: the obtained values are similar to those determined by the frequencial analysis. Elements susceptible to activate seiches were studied: the wind, the atmospheric pressure and the swell. Seiches in Port-Tudy and in Le Conquet are mainly due to forced waves, phase coupled with local wave groups . The exceptional amplitude of Port-Tudy's seiche (height which can achieve 1,70m) is probably connected to the nearness of resonances periods of the port and the pond between the Ile de Groix and Lorient.</p>		

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais tout d'abord remercier mon maitre de stage Lucia PINEAU-GUILLOU, pour son soutien, ses encouragements et qui a su se rendre disponible malgré un emploi du temps chargé,

Un grand merci à Ronan CREACH pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail, et les nombreux conseils qu'il a pu me donner tout au long de ces 3 mois,

Je remercie également Pascal LAZURE de l'IFREMER, pour son aide précieuse, qui m'a permis d'orienter mes recherches dès le début de mon étude,

Merci à Frédéric PONS d'avoir accepté de prendre part au suivi de ce stage en tant qu'expert,

Je voudrais remercier également Céline PERHERIN du CETMEF, pour avoir participé à la mise en place de ce stage,

Je tiens à remercier également Jean-Claude LE GAC pour ses explications concernant l'utilisation de MATLAB,

Merci à Nicolas WEBER de s'être intéressé à mon étude et de m'avoir aidé pour la création des fichiers nécessaires à l'utilisation de REFONDE,

Je suis très reconnaissant à Michel AIDONIDIS de m'avoir reçu et d'avoir répondu à mes interrogations concernant les données météorologiques,

J'exprime également toute ma gratitude à Fabrice ARDHUIN, dont les explications m'ont permis de mieux comprendre les ondes infragravitaires,

Enfin, je remercie toutes les personnes du SHOM que je n'ai pas citées et qui ont pu m'apporter de l'aide ou tout simplement réservé un accueil plaisant et sympathique.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	9
1 DEFINITION ET EXPLICATION DU PHENOMENE	10
1.1 Quelques repères historiques	10
1.2 Définitions	10
1.3 Le phénomène de résonnance	11
1.4 Causes possibles des ondes de seiches	12
1.5 Les raisons d'étudier les seiches	13
2 MESURES MAREGRAPHIQUES	15
2.1 Utilisation de NUNIEAU	15
2.1.1 Présentation du logiciel et de la démarche	15
2.1.2 Prise en main du logiciel	16
2.1.2.1 Sélection d'un jour donné	16
2.1.2.2 Sélection d'un pas de temps et premiers résultats	17
2.1.2.3 Optimisation des paramètres	18
2.1.2.4 Limites de l'optimisation	20
2.1.2.5 Exemple de résultat obtenu	22
2.2 Analyse fréquentielle des signaux de seiche	25
2.2.1 Analyse fréquentielle à partir des données issues de NUNIEAU	25
2.2.1.1 Présentation de la démarche	25
• Phase préliminaire	25
• Traitement du signal	27
2.2.1.2 Port-Tudy	27
• Seiche du 10 mars 2008	27
• Seiche du 16 janvier 2008	29
2.2.1.3 Brest	30
2.2.2 Analyse des données issues des marégraphes numériques	34
2.2.2.1 Marégraphe de Brest	34
2.2.2.2 Marégraphe de Cherbourg	36
2.2.2.3 Marégraphe de Dieppe	38
2.2.3 Récapitulatif	39
3 MODELE NUMERIQUE : REFONDE	40
3.1 Brest	40
3.2 Port-Tudy	41

4 RECHERCHE D'ELEMENTS DECLENCHEURS DES SEICHES

4.1 Relevés des hauteurs de seiche de différents ports	43
4.1.1 Port-Tudy	43
4.1.2 Brest	44
4.1.3 Le Conquet	45
4.1.4 Cherbourg	45
4.1.5 Comparaison entre les ports	46
4.2 Etude des données météo	50
4.2.1 Etude de la pression atmosphérique et de la vitesse du vent	50
4.2.2 Etude de la direction du vent	51
4.3 Etude des données de houle	52
4.3.1 Port-Tudy	52
4.3.1.1 Etude de la période de la houle	53
4.3.1.2 Prise en compte de la hauteur de la houle	53
4.3.1.3 Le Conquet	54
4.3.2 La houle et les ondes infragravitaires	55
4.3.3 Conclusion	56
4.4 Retour sur Port-Tudy	57
4.4.1 Période des bassins concernés	57
4.4.2 La houle	58
CONCLUSION	60
BIBLIOGRAPHIE	62
ANNEXES	64

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Energie des ondes de gravité (Source: Jayne Doucette/WHOI Graphics)	11
Figure 2: Onde stationnaire dans un bassin fermé (Source :Mc Graw-Hill Encyclopédia of science and Technology).....	12
Figure 3: Simulation de courant à Port-Tudy (Source : Bureau d'étude ERAMM).....	13
Figure 4: Carte de situation Port-Tudy (Source : SHOM).....	15
Figure 5: Marégramme de Port-Tudy du 26/09 au 03/10/2008 (SHOM).....	16
Figure 6: Sélection d'un jour sur le marégramme.....	17
Figure 7: Courbe obtenue après numérisation d'un marégramme	18
Figure 8: Pas de temps 1mn.....	19
Figure 9: Pas de temps de 3s.....	20
Figure 10: Exemple de chevauchement de signaux.....	21
Figure 11: Graphe obtenu à partir d'un signal peu lisible.....	21
Figure 12: Sélection d'un échantillon du signal	23
Figure 13: Vérification de la numérisation par superposition du signal numérisé (rouge) sur le marégramme scanné.	24
Figure 14: Estimation de la période	25
Figure 15: Comparaison hauteur d'eau mesurée et prédiction de marée (1heure).....	26
Figure 16: Signal de seiche.....	26
Figure 17: Seiche du 10mars 2008.....	28
Figure 18: Restriction du domaine des fréquences.....	28
Figure 19: Signal et spectre de seiche (Port-Tudy)	29
Figure 20: Position du marégraphe à Brest (SHOM)	30
Figure 21: Seiche de fréquence basse.....	31
Figure 22: Fréquences de seiche à Brest, 12/01/1996 et 23/01/2001.....	32
Figure 23: Seiche du 17 au 20 janvier 2009, Brest	34
Figure 24: Seiche du 22 au 24 janvier 2009.....	35
Figure 25: Situation du port de Cherbourg (Source SHOM).....	36
Figure 26: Seiche 22-24 janvier 2009	36
Figure 27: Seiche 21-23 février 2009.....	37
Figure 28: Seiche 18-19 Avril 2009	38
Figure 29: Seiche 3 mai 2009	38
Figure 30: Forme de la seiche mode 1 (en haut) et mode 2 (en bas)	40
Figure 31: Forme de seiches à Port-Tudy pour les modes 1 (à gauche) et 2 (à droite)	41
Figure 32: Estimation de la hauteur de seiche à Port-Tudy (25 février 2007)	43
Figure 33: Estimation de la hauteur des seiches. Port-Tudy 2007	44
Figure 34: Estimation de la hauteur des seiches, Brest 2007.....	45
Figure 35: Estimation de la hauteur des seiches, Le Conquet 2007	45
Figure 36: Estimation de la hauteur des seiches, Cherbourg 2007.....	46
Figure 37: Comparaison des hauteurs de seiche (Janvier-février)	47
Figure 38: Comparaison des hauteurs de seiche (Novembre-décembre 2007)	48
Figure 39: Du 1er janvier au 31mars 2007.....	50

Figure 40: Du 6 novembre au 31 décembre 2007	50
Figure 41: Hauteur des seiches en fonction de la direction vent.....	51
Figure 42: Position du point de calcul de houle:.....	52
Figure 43: Comparaison hauteur de seiche et période de pic de la houle	53
Figure 44: Comparaison hauteur de seiche et Hs^2*Tp	54
Figure 45: Corrélation Hs^2*Tp et hauteur de seiche	55
Figure 46: Onde longue liée à un train de vagues (Source: SHOM).....	56
Figure 47: Largeur du bassin entre Groix et Lorient (A partir d'une carte Google Maps)	57
Figure 48: Direction de la houle à proximité de Groix en 2007 (Données SHOM).....	58
Figure 49: Plan de vagues (Source: Catalogue sédimentologique des côtes françaises).....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Signal numérique fournie en sortie par NUNIEAU	17
Tableau 2: Influence du pas de temps	22
Tableau 3: Influence de la définition de l'image.....	22
Tableau 4: Période des seiches à Brest	41
Tableau 5: Comparaison avec l'analyse fréquentielle	41
Tableau 6: Période des seiches à Port-Tudy.....	42
Tableau 7: Comparaison des valeurs de période obtenues:.....	42
Tableau 8: Période du 1er janvier au 1er mars	49
Tableau 9: Période du 6 novembre au 31 décembre	49
Tableau 10: Synthèse des relevés de seiche 2007	49

LISTE DES ABREVIATIONS

CETE : Centre d'étude technique de l'Equipement

CETMEF : Centre d'Etude Technique Maritimes et Fluviales

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

INTRODUCTION

Les seiches sont des oscillations stationnaires dans un bassin fermé ou semi-fermé. Elles se manifestent par des oscillations de la hauteur d'eau, dont l'amplitude et la période varient selon la configuration du bassin.

L'amplitude des seiches peut varier considérablement d'un port à l'autre. Elles se produisent dans de nombreux ports, mais restent souvent peu perceptibles car de faible amplitude. Des seiches d'amplitude non négligeable se produisent à Brest, Le Conquet ou encore Cherbourg. Les seiches les plus importantes en France ont lieu à Port-Tudy, où elles peuvent atteindre presque 2 mètres.

Le logiciel NUNIEAU, dédié à la numérisation des niveaux d'eau à partir de données analogiques, est habituellement utilisé pour l'acquisition de données portant sur plusieurs années. Il est testé ici pour connaître le degré de précision pouvant être atteint avec le traitement de signaux présentant des oscillations très importantes, en fréquence et en amplitude.

Une analyse fréquentielle a ensuite été réalisée à partir d'échantillons de données numériques de plusieurs ports. Les résultats obtenus pour Brest et Port-Tudy sont ensuite comparés avec les données fournies par le logiciel REFONDE, qui calcule les fréquences propres des bassins des ports à partir de leurs caractéristiques géométriques.

La partie suivante est consacrée à la recherche des éléments déclencheurs des seiches. Le travail est basé sur le calcul des hauteurs de seiche de plusieurs ports déterminées pour l'année 2007. Une comparaison est tout d'abord effectuée entre les données des ports, de proximités géographiques variables. Puis les données de vent, de pression atmosphérique et de houle sont analysées pour tenter de déterminer des corrélations avec les hauteurs de seiche.

Enfin, le cas particulier de Port-Tudy est étudié. Les seiches y ont une hauteur très importante (jusqu'à 1,70m), avec une période relativement faible. La réflexion se base sur les conclusions de la partie consacrée à la recherche de l'origine des ondes de seiche, et sur la considération de la configuration géométrique du site.

1 DEFINITION ET EXPLICATION DU PHENOMENE

1.1 Quelques repères historiques

Le mot « seiche » correspond à un terme local utilisé par les bateliers du lac Léman pour désigner les oscillations lentes du niveau de l'eau, assez amples pour être constatées sans instrument. Dans une chronique de 1549, Schultaiss [1]rapporte avoir observé une hauteur de 2,39m.

L'ingénieur suisse DUILLIER [2] indique en 1730 que les causes peuvent être d'origine météorologique.

Suite au tremblement de terre de Lisbonne en 1755, des seiches ont pu être constatées dans les lacs d'Ecosse. Dans le Loch Lomond, le niveau de l'eau a augmenté de 76 cm en 5mn, puis est redescendu jusqu'au niveau des plus basses eaux d'été, avant de revenir à la hauteur maximale.

A partir de 1869, des observations systématiques sont réalisées sur le lac Léman par le docteur FOREL [3]qui fut le premier à avoir exploré de manière scientifique la nature et l'origine de ces balancements. Il calcule la période des seiches en se basant sur la formule de MERIAN, établie en 1828, qui détermine la période des ondes stationnaires d'un bassin rectangulaire fermé de profondeur constante :

$$T = \frac{2L}{n\sqrt{g \cdot h}}$$

Avec :

T : Période des oscillations

L : Longueur du lac

g : Accélération de la pesanteur

h : Profondeur moyenne du lac

n : Nombre entier

Cette formule a ensuite été affinée et exploitée, en particulier par CHRYSTAL [4] en 1907. Et en 1915, STERNECK [5] a utilisé les premières méthodes numériques pour le calcul de la période des seiches.

Par analogie, le mot seiche est aussi utilisé pour désigner les oscillations lentes du niveau de la mer, constatées dans les ports et dans les baies fermées. Ces seiches marines peuvent être masquées par d'autres phénomènes comme la marée, la houle, ou bien les surcotes. Elles n'ont fait l'objet d'observations systématiques que bien après les seiches des lacs.

1.2 Définitions

Les seiches correspondent à un mouvement oscillatoire du niveau de l'eau. A ce titre, elles font partie des ondes de gravité, au même titre que les vagues ou encore la marée. Le critère utilisé pour faire la distinction entre les seiches et les autres types d'onde est la période.

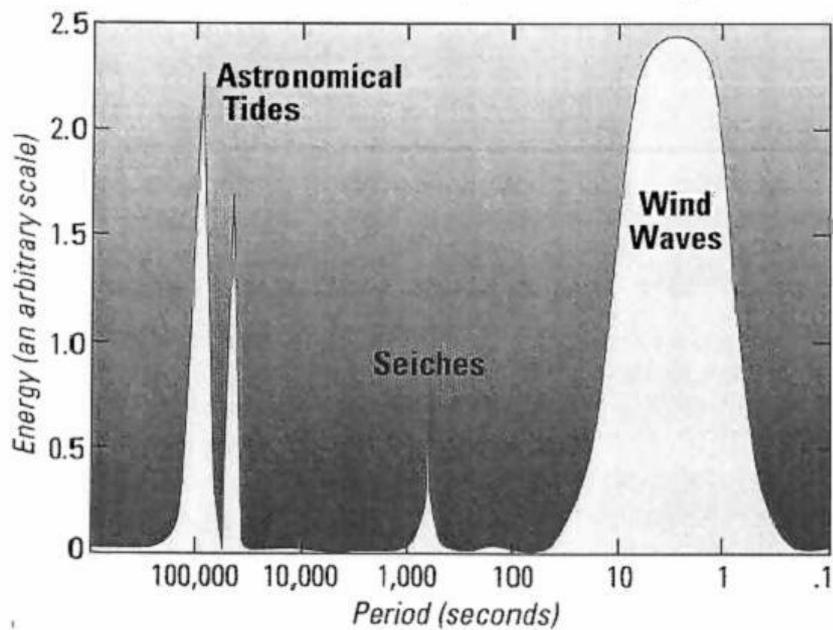


Figure 1: *Energie des ondes de gravité* (Source: Jayne Doucette/WHOI Graphics)

La Figure 1 représente la distribution de l'énergie des ondes à la surface des océans en fonction de la période.

Les seiches sont donc les ondes de gravité dont la période est comprise entre celle de la houle la plus longue et celle des marées semi-diurnes. Il est communément admis un intervalle de 30 s à quelques heures.

Pour l'étude de ce phénomène, la distinction sera faite entre les ondes de seiche, qui sont la forme progressive de l'onde, et les seiches qui sont la forme stationnaire, observées dans les zones fermées ou semi-fermées.

1.3 Le phénomène de résonance

Les ondes de seiches ont généralement une amplitude plus faible que celle des seiches elles-mêmes, qui est amplifiée par la résonance.

Les plans d'eau en contact avec l'océan sont en effet excités par les ondes de seiche incidentes. Celles-ci exercent des oscillations forcées, qui peuvent mener à un phénomène de résonance si la fréquence correspond à une fréquence propre de la zone. L'onde pénètre dans l'espace semi-fermé et se retrouve alors piégée. Il y a alors formation d'une onde stationnaire, formée par la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchi par la paroi.

La Figure 2 décrit le cas de l'onde stationnaire dans un bassin fermé, de longueur L , de profondeur h constante.

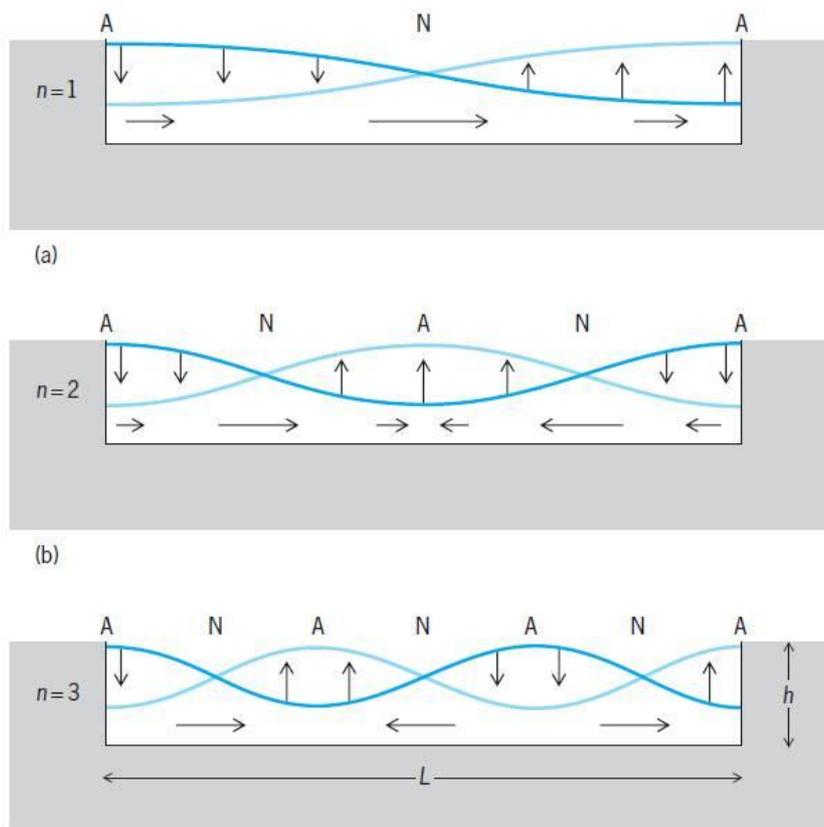


Figure 2: Onde stationnaire dans un bassin fermé (Source :Mc Graw-Hill Encyclopédia of science and Technology).

Si λ est la longueur d'onde, alors $L=n \cdot \lambda$.

Le cas $n=1$ est appelé l'oscillation fondamentale. La hauteur d'eau au niveau du nœud (point N) est constante au cours du temps, alors qu'elle subit la variation maximale au niveau du ventre (point A).

Les autres cas se distinguent par le nombre de nœuds, qui augmente lorsque la longueur d'onde diminue.

1.4 Causes possibles des ondes de seiches

De nombreux phénomènes peuvent être à l'origine des ondes de seiche. Ils peuvent prendre la forme d'impulsions, tels que des glissements de terrain ou des tremblements de terre. Dans ce cas, l'onde est appelée tsunami.

D'autres explications sont aussi fréquemment avancées :

- Les variations d'intensité de précipitation

- Les ondes internes

Les ondes internes sont les oscillations de la thermocline.. Elles peuvent entraîner des variations du niveau de la surface de l'eau [6].

- L'irrégularité de la houle

- Le vent

Il a été démontré, que les importantes variations de la vitesse du vent produites par les cellules convectives sont à l'origine de la plupart des seiches constatées dans le port de Rotterdam [7].

- Les variations de pression atmosphérique

Il s'agit de l'explication la plus fréquente dans les études des seiches portuaires. Le passage des dépressions s'accompagne de variations de pression atmosphérique qui en agissant directement sur le niveau de la mer, peuvent être à l'origine de la formation d'ondes de seiche [8].

1.5 Les raisons d'étudier les seiches

Les seiches posent parfois des problèmes pour la sécurité de la navigation.. Les ports pour lesquels des problèmes de seiche ont été rapportés sont : Dunkerque, Dieppe, Port-Tudy, Bayonne, Marseille et Sète [9].

Les gênes occasionnées sont les suivantes :

- Problème de fermeture des portes à flots :

C'est le cas en particulier à Cherbourg. Le fonctionnement des portes d'écluse, automatiques, est asservi à la hauteur d'eau. Une oscillation rapide peut déclencher une manœuvre inappropriée des portes.

- Problème d'amarrage

Les variations rapides du niveau de la mer entraînent des problèmes de tenue à quai des navires, avec des contraintes importantes au niveau des amarres. Il y a un risque de choc des bateaux entre eux et avec le quai. A Bayonne en particulier, un remorqueur peut être affecté au déplacement des navires soumis aux seiches.

- Courants violents

A Port-Tudy, la seiche qui peut atteindre 1,5 m, engendre des courants violents

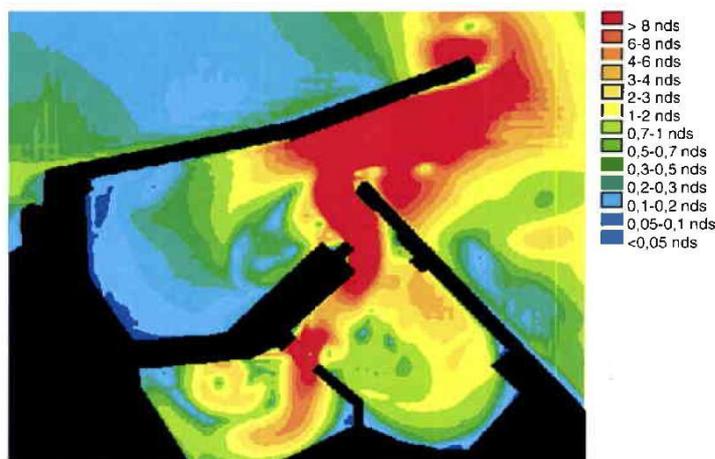


Figure 3: Simulation de courant à Port-Tudy (Source : Bureau d'étude ERAMM)

Le bureau d'étude ERAMM a réalisé une simulation du courant dans le port de Groix lors d'une seiche de 1,5m (Figure 3). La vitesse peut alors atteindre 10 nœuds.

Le courant commence à présenter une gêne sérieuse pour les bateaux à partir d'une hauteur de seiche de 70cm, qui se produit plusieurs fois par an. Le port est fermé à partir d'une hauteur de 1m, ce qui se produit plusieurs fois par an.

- Modification de la bathymétrie

Les courants induits par les seiches peuvent éroder ou engraisser certaines zones du port.

- Talonnement des navires

La seiche modifie la profondeur d'eau disponible, et donc influe sur la marge de sécurité des navires vis-à-vis de leur tirant d'eau.

- Niveaux extrêmes

Le calcul des niveaux extrêmes est basé sur l'analyse statistique des données marégraphiques qui ne prennent pas en compte les seiches (filtrées). Les niveaux calculés, utilisés pour les études de risque de submersion marine sous estiment donc les niveaux réels en cas de seiche.

2 MESURES MAREGRAPHIQUES

2.1 Utilisation de NUNIEAU

2.1.1 Présentation du logiciel et de la démarche

Le logiciel NUNIEAU (Numérisation des Niveaux d'EAU) est développé par le CETE Méditerranée/Service Hydraulique. A l'origine, le besoin était de pouvoir digitaliser le niveau marin à Port-Vendres. Des améliorations ont ensuite été apportées pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévention des Inondations). Il est ainsi aujourd'hui adapté à la numérisation des données de niveaux d'eaux issus des marégraphes et des limnigraphes.

Le SHOM utilise ce logiciel pour la numérisation des marégrammes papier. Ces derniers sont issus des marégraphes mécaniques : il s'agit de tracés de hauteurs d'eau à l'encre sur du papier quadrillé. Ce papier est fixé sur un rouleau, qui en tournant fait défiler la feuille. Ce dispositif autorise ainsi le tracé de plusieurs jours d'enregistrement sur une même feuille (Figure 5). La superposition de plusieurs jours permet de limiter les interventions humaines pour changer la feuille, mais diminue la lisibilité du signal (Figure 10).

Le travail a porté principalement sur les marégrammes de Port-Tudy, mis à disposition par le SHOM. Le but est de pouvoir obtenir la donnée numérique d'un signal de seiche. Cet emplacement a été choisi en raison des conclusions de l'examen visuel des marégrammes, caractérisés par la présence d'une seiche de période faible et d'une amplitude élevée, diminuant la lisibilité du signal. La possibilité d'extraire la seiche de ces marégrammes laisse espérer pouvoir appliquer la démarche pour la plupart des autres ports.

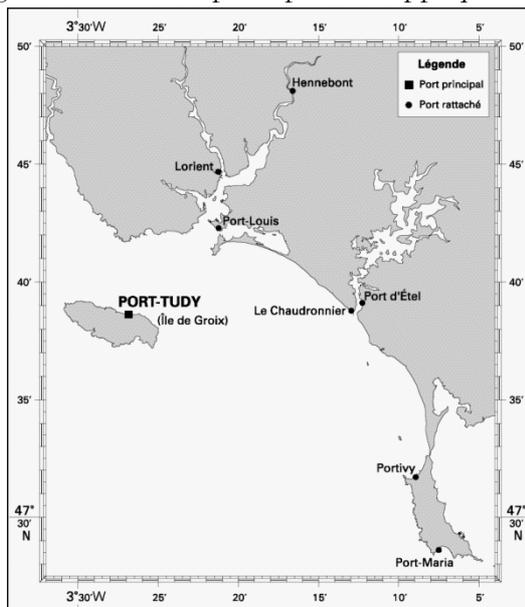


Figure 4: Carte de situation Port-Tudy (Source : SHOM)

2.1.2 Prise en main du logiciel

2.1.2.1 Sélection d'un jour donné

Le logiciel NUNIEAU travaille à partir d'images scannées de marégrammes. Il est basé sur la reconnaissance de pixels suivant leur couleur. Les marégraphes mécaniques du SHOM utilisent des feuilles de papier type papier millimétrique (adaptées aux données horaires) de format A0. Des réglages particuliers du logiciel, qui concernent la dimension de la feuille ainsi que la couleur des pixels, permettent de traiter différents types de marégramme papier à utiliser.

Comme suggéré par la notice d'utilisation du logiciel, il apparaît que le format TIF est le plus adapté pour le fichier image à traiter. En effet, ce format ne dégrade pas la qualité de l'image, contrairement au format JPEG qui en diminuant notablement la taille des fichiers dégrade aussi les couleurs.

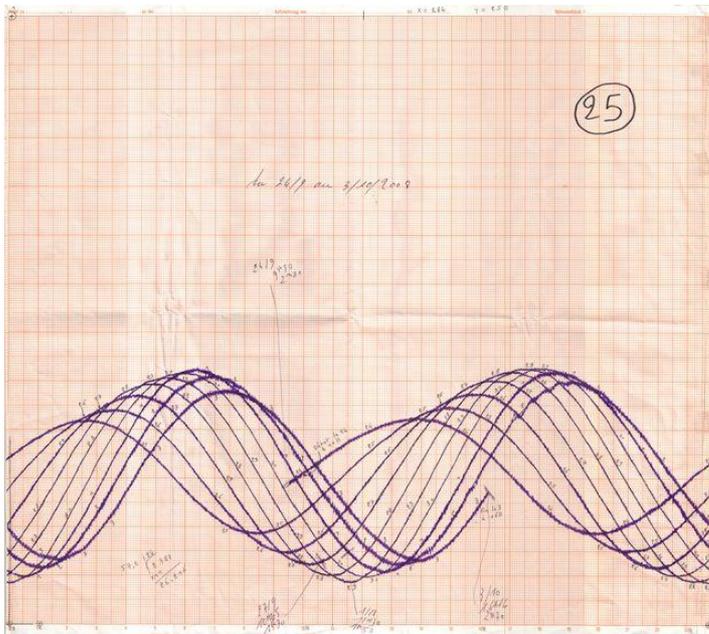


Figure 5: Marégramme de Port-Tudy du 26/09 au 03/10/2008 (SHOM)

Les marégraphes mécaniques enregistrent les relevés de hauteurs d'eau pendant plusieurs jours sur une même feuille. Après identification des différents jours sur la feuille, il s'agit de sélectionner la plage de données qui nous intéresse. Pendant cette étape, le logiciel identifie les pixels à utiliser.

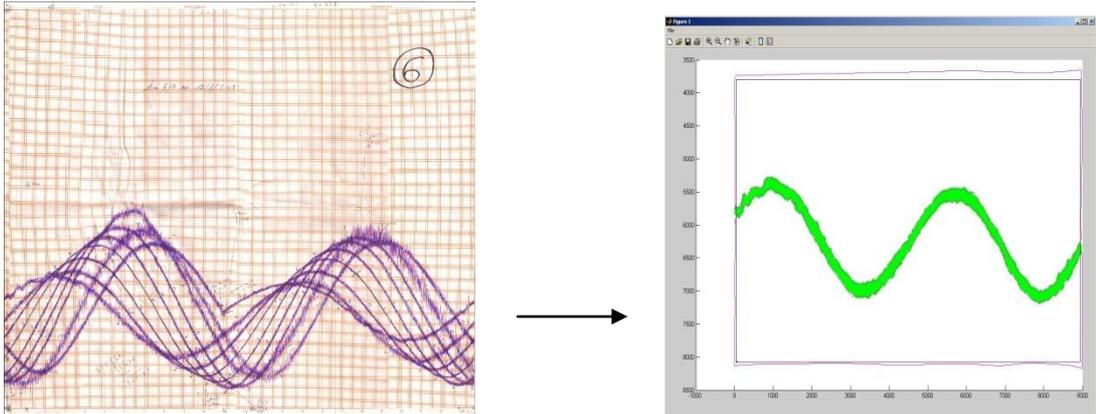


Figure 6: Sélection d'un jour sur le marégramme

Ci-dessus, la sélection d'un jour a été effectuée par « élimination » des zones non concernées. Pour cela, l'utilisateur sélectionne les polygones correspondant aux zones non incluses dans la période recherchée. Il est alors possible de visualiser (Figure 6) les pixels (en vert) qui seront analysés par la suite.

2.1.2.2 Sélection d'un pas de temps et premiers résultats

Il faut ensuite préciser le pas de temps désiré pour la donnée numérique. Le logiciel va rechercher autour de chaque unité de temps les pixels situés dans une bande de largeur correspondant au pas de temps sélectionné. Par exemple, si le pas de temps est de 1 heure, il va chercher les pixels situés entre 30 minutes avant et après chaque heure. Le résultat obtenu est une liste comprenant :

- la valeur minimum,
- la valeur maximum,
- le barycentre des pixels récupérés,
- la moyenne entre le maximum et le minimum, pour chaque repère temporel,

Année	Mois	Jour	Heure	Minute	Seconde	Minimum	Barycentre	Maximum	Moyenne	Pixels
2008	1	16	3	0	0	-9999.000	-9999.000	-9999.000	-9999.000	0
2008	1	16	4	0	0	-9999.000	-9999.000	-9999.000	-9999.000	0
2008	1	16	5	0	0	230.998	248.624	283.898	257.448	8450
2008	1	16	6	0	0	249.969	301.110	342.705	296.337	9751
2008	1	16	7	0	0	318.918	364.111	396.652	357.785	8371
2008	1	16	8	0	0	375.737	376.054	376.372	376.054	3
2008	1	16	9	0	0	-9999.000	-9999.000	-9999.000	-9999.000	0

Tableau 1: Signal numérique fournie en sortie par NUNIEAU

Le Tableau 1 a été obtenu en choisissant un pas de temps de 1h.

La dernière colonne donne le nombre de pixels identifiés dans la tranche horaire. Les lignes comportant l'indication -9999.000 sont celles pour lesquelles aucune valeur ne peut être donnée, en raison de l'absence de pixels.

Comme conseillé dans le guide de prise en main de NUNIEAU, une résolution de 200dpi a tout d'abord été choisie pour les premiers essais. L'examen visuel du marégramme papier permet d'estimer la période à 5 mn. Un pas de temps de 1mn devrait être assez faible pour extraire la seiche.

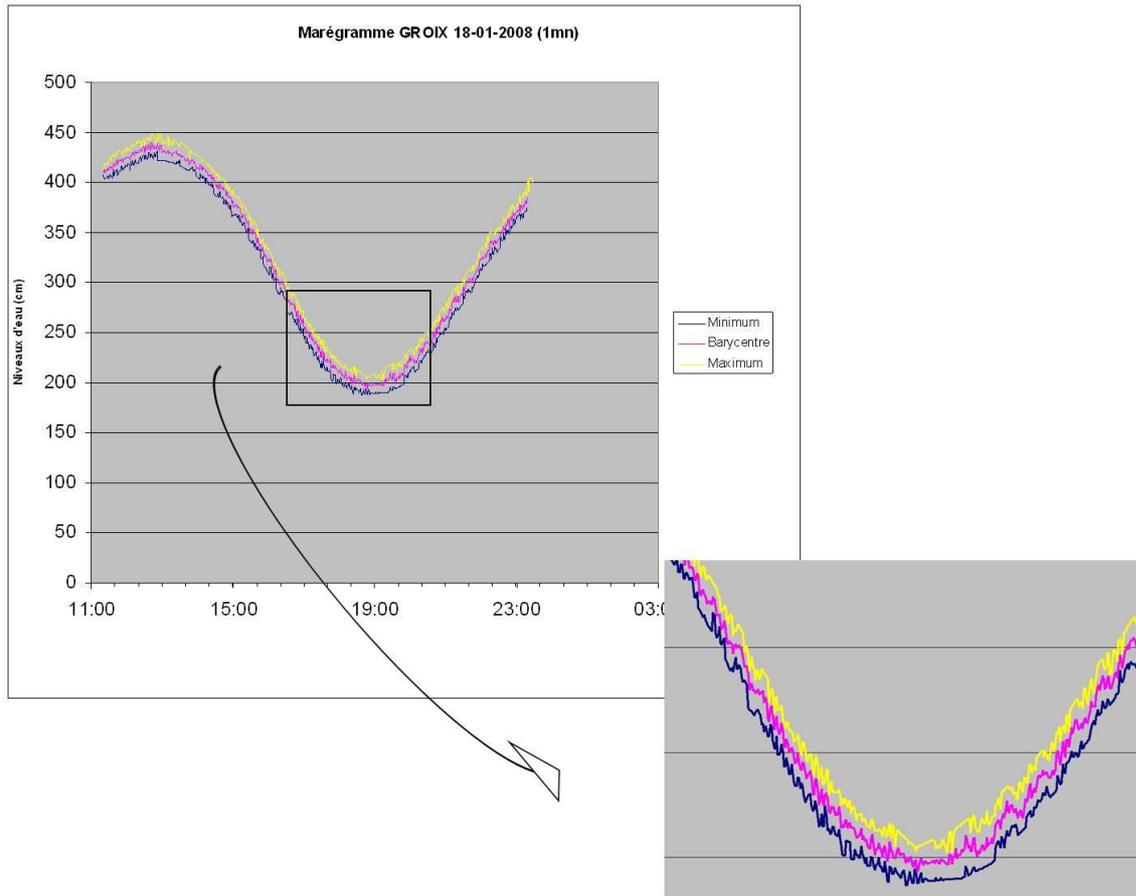


Figure 7: Courbe obtenue après numérisation d'un marégramme

Les courbes ont une forme semblable au signal papier. Toutefois, aucune d'entre elles ne correspond parfaitement à la courbe réelle. Cette approche ne permet pas donc d'obtenir le signal correspondant à la seiche.

Toutefois, une première information peut être extraite. En choisissant un pas de temps supérieur à la période des seiches, la courbe des maximums et la courbe des minimums délimitent l'enveloppe du signal. L'épaisseur de cette enveloppe donne alors l'amplitude de la seiche.

2.1.2.3 Optimisation des paramètres

Dans le but de se rapprocher du signal de la seiche, les essais de numérisation suivants ont été réalisés avec un pas de temps inférieur à 1mn.

Le choix du pas de temps détermine la largeur de la tranche horaire dans laquelle le logiciel va récupérer les pixels. La diminution du pas de temps implique donc une diminution du nombre de pixels identifiés. Cela conduit parfois NUNIEAU à ne trouver aucun pixel pour certaines dates. Le nombre de ces « erreurs » est alors d'autant plus élevé que le pas de temps et la définition de l'image sont faibles.

Par exemple, les images numérisées en 200dpi ont donné des tableaux de résultat sans erreur jusqu'à un pas de 30s.

Ci-dessous, voici un extrait du tableau de données obtenu avec un pas de temps de 6s. Le taux d'erreurs (notées « -9999.000 » par le logiciel) est de plus de 50%, ce qui rend les données peu exploitables.

Date	Minimum	Maximum	Barycentre	Moyenne
18/01/2008 11:24:54	-9999.000	-9999.000	-9999.000	-9999.000
18/01/2008 11:25:00	414.685	414.844	415.003	414.844
18/01/2008 11:25:06	409.907	411.580	412.774	411.341
18/01/2008 11:25:12	-9999.000	-9999.000	-9999.000	-9999.000
18/01/2008 11:25:18	-9999.000	-9999.000	-9999.000	-9999.000
18/01/2008 11:25:24	410.227	412.572	415.323	412.775
18/01/2008 11:25:30	-9999.000	-9999.000	-9999.000	-9999.000
18/01/2008 11:25:36	-9999.000	-9999.000	-9999.000	-9999.000
18/01/2008 11:25:42	408.954	411.577	415.324	412.139
18/01/2008 11:25:48	-9999.000	-9999.000	-9999.000	-9999.000

Une résolution de 400dpi a permis d'améliorer grandement les résultats. Les images (au format .tif) ont désormais une taille d'environ 130Mo, pour 30Mo en 200dpi. En utilisant un fichier image avec une telle résolution, il a été possible de descendre jusqu'à un pas de temps de 3s, tout en maintenant un taux d'erreur faible (inférieur à 1%).

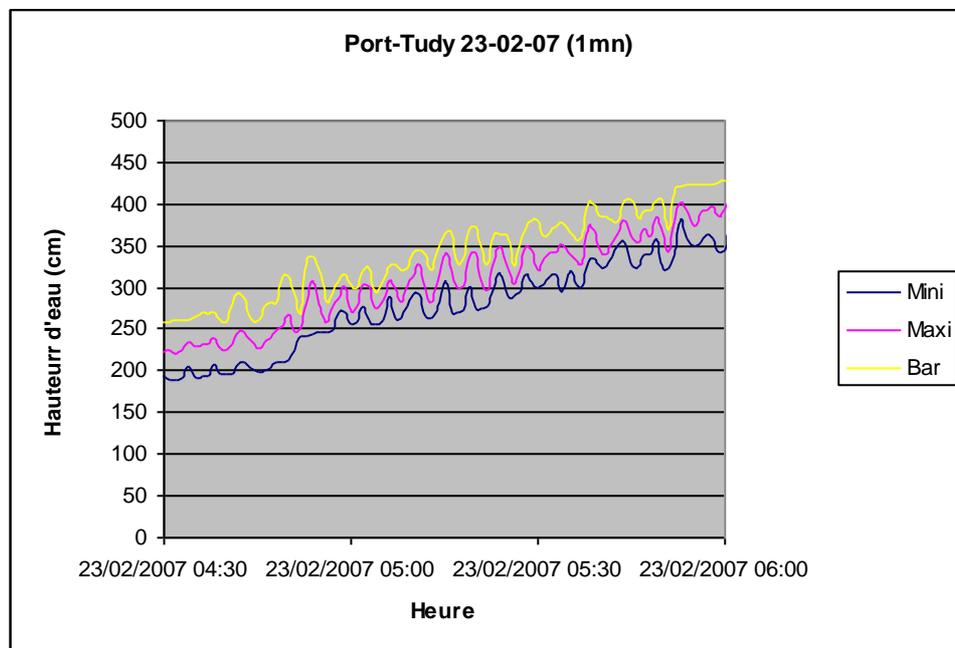


Figure 8: Pas de temps 1mn

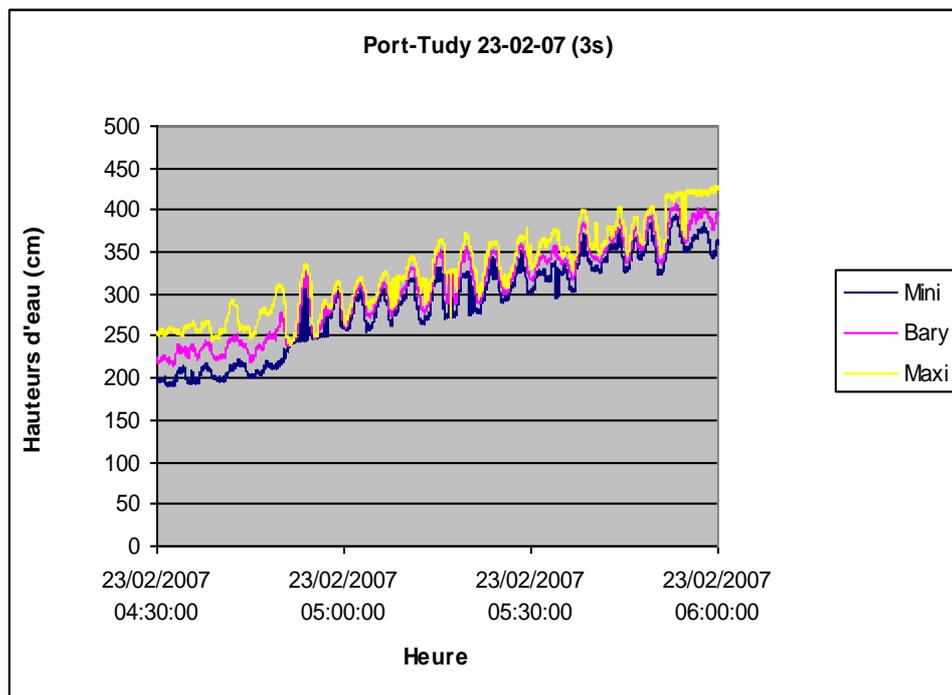


Figure 9: Pas de temps de 3s.

Sur la Figure 9, la fidélité au tracé d'origine est variable. Dans la première partie du graphe, avant 04:50, on note une très nette différence entre les différentes courbes (mini, barycentre et maxi). Dans la deuxième partie, à partir de 04:50, les courbes sont beaucoup plus proches les unes des autres, se rapprochant ainsi du signal « réel ».

La comparaison avec la Figure 8 montre que la réduction du pas de temps permet, à condition que la définition de l'image soit suffisante, d'augmenter la précision du résultat.

2.1.2.4 Limites de l'optimisation

- Lisibilité du tracé

Dans certains cas, la lisibilité du tracé est faible à certains endroits (Figure 10), et il devient difficile d'identifier le tracé visuellement. Dans ce cas, NUNIEAU peut difficilement isoler le signal désiré et risque d'intégrer des pixels correspondant à un autre jour.

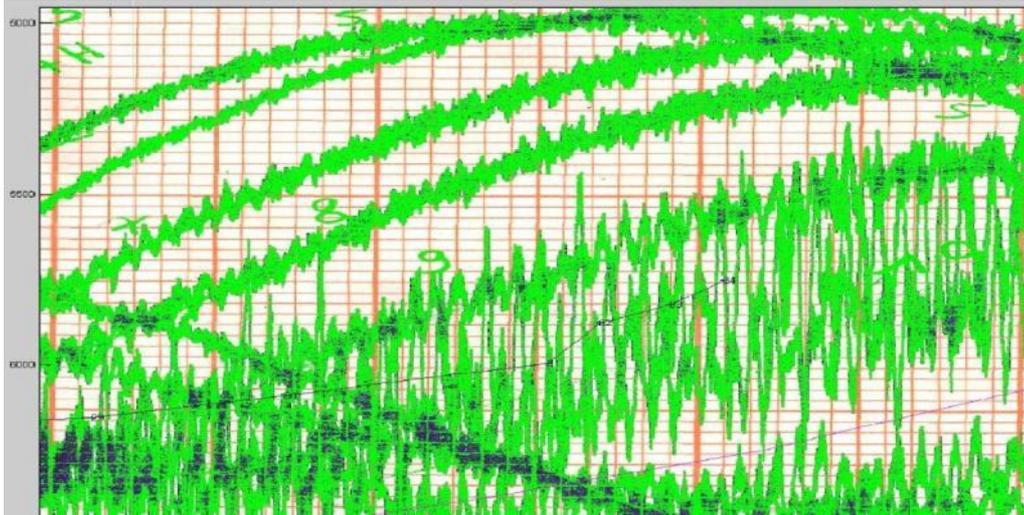


Figure 10: Exemple de chevauchement de signaux

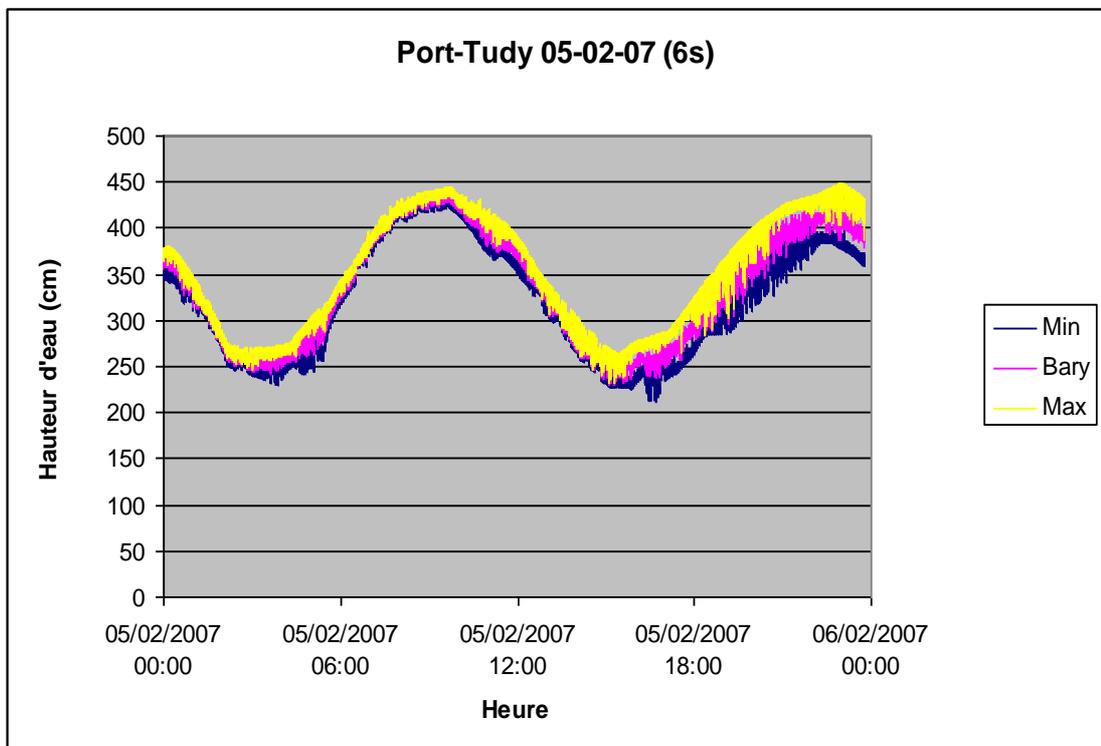


Figure 11: Graphe obtenu à partir d'un signal peu lisible

La Figure 11 a été obtenue à partir d'une zone d'un marégramme où la hauteur des seiches était telle qu'elle a induit un chevauchement des tracés de différents jours sur le papier. Le pas de temps utilisé est de 6s. L'enveloppe globale des 3 graphes est en fait délimitée par la zone sélectionnée manuellement pour isoler le signal. Le résultat, en dehors du fait de donner une idée de la hauteur de la seiche, est alors peu exploitable.

- Temps de calcul

Les nouveaux paramètres de travail ont certes amélioré la précision des résultats mais cela s'est accompagné d'un allongement notable des durées de traitement.

Pour numériser 24h de relevés de niveau d'eau, un peu plus d'une heure suffit, avec une image scannée à 200 dpi et un pas de temps de 30s. La durée de calcul est beaucoup plus longue si on utilise une définition de 400dpi et un pas de temps de 3s. On notera que le temps de calcul varie également en fonction de la lisibilité de la trace sur le papier. Le logiciel travaillant sur les pixels, il est ainsi logique que les durées de traitement s'allongent avec l'augmentation du nombre de pixels à traiter.

Le pas de temps choisi influe assez peu sur la durée globale du calcul. Le logiciel crée tout d'abord un fichier « PIXEL » puis le fichier final contenant les hauteurs d'eau en fonction du temps. Une fois le fichier « PIXEL » créé, on peut relancer le calcul avec un nouveau pas de temps. L'opération sera cette fois beaucoup plus rapide.

Le Tableau 2 expose les durées de traitement correspondant à 3 heures de relevés à partir d'une image scannée à 200dpi. Le premier calcul comprend la création du fichier « PIXEL », le second, non :

Pas de temps	Durées de calcul (secondes)	
	Premier calcul	Second calcul
60 mn	632 s	65 s
1mn		67 s
0,05		129 s

Tableau 2: Influence du pas de temps

A l'issue des différents essais réalisés, le Tableau 3, décrit la précision du pas de temps qu'il est possible d'obtenir, suivant la définition de l'image du marégramme.

Définition image	Taille image(mo)	Pas de temps mini sans "erreur" (secondes)	Durée de calcul
200 dpi	37	30	11mn
400dpi	140	5	3h

Tableau 3: Influence de la définition de l'image

2.1.2.5 Exemple de résultat obtenu

Afin de restreindre les temps de calcul, la plage de temps a été limitée. La feuille comprenant le marégramme du 7 au 18 janvier 2008 a été choisie arbitrairement. La plage temporelle retenue est le 16 janvier de 5h00 à 7h30 (Figure 12).

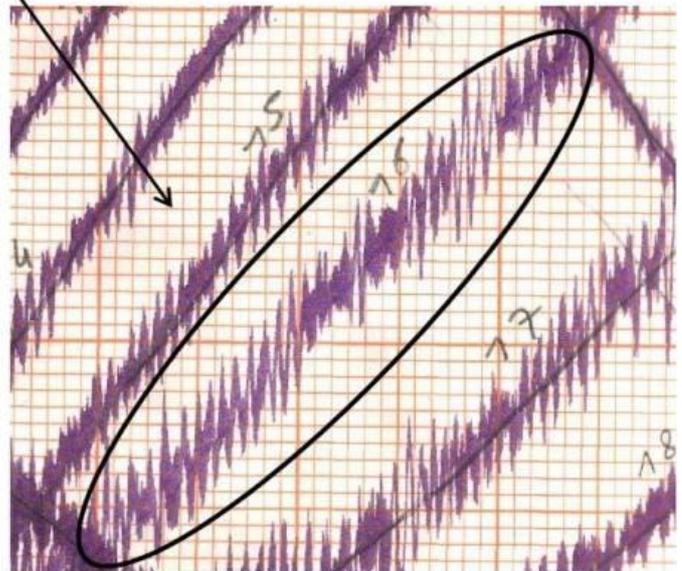
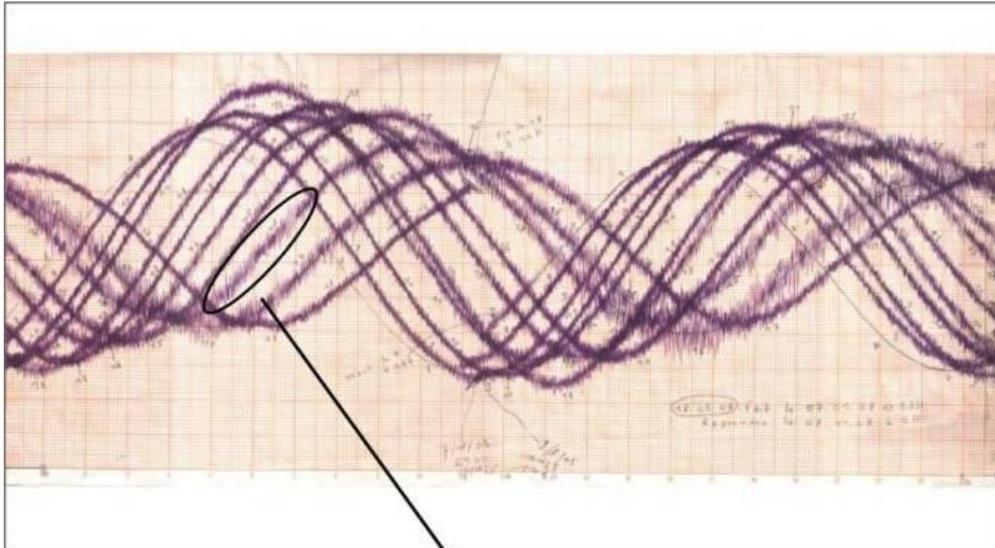


Figure 12: Sélection d'un échantillon du signal

La numérisation a été effectuée à partir d'une image scannée à une définition de 400dpi. Le pas de temps choisi est de 1s.

Le taux d'erreur dans le tableau fourni par NUNIEAU est alors proche de 5%, mais le signal reste tout de même utilisable.

Il est possible de s'assurer de la qualité de la numérisation en superposant le signal numérisé au marégramme papier (Figure 13).

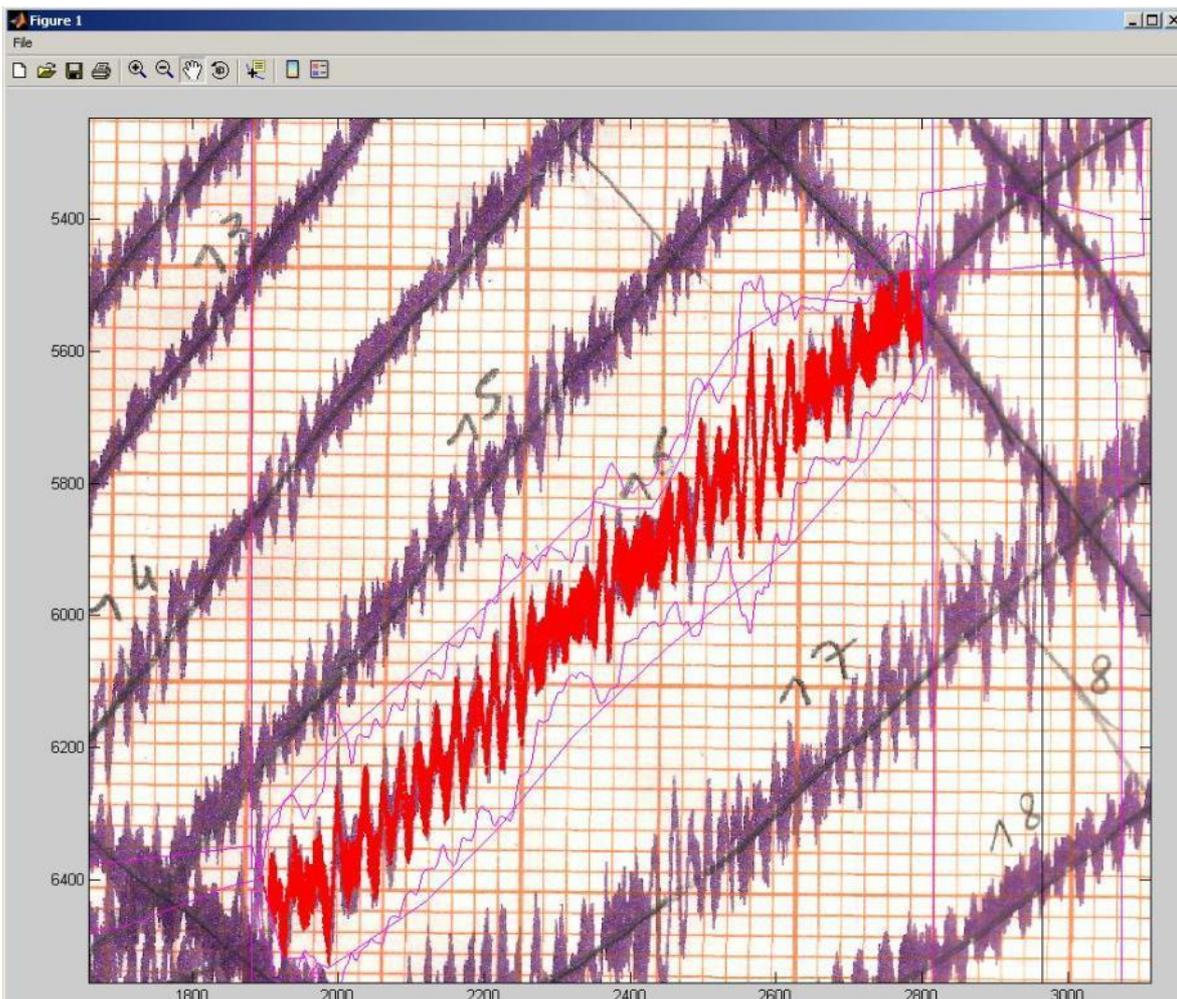


Figure 13: Vérification de la numérisation par superposition du signal numérisé (rouge) sur le marégramme scanné.

Les différentes courbes sont quasiment confondues. La courbe reproduite en rouge sur la Figure 13 est celle des barycentres. Le signal numérisé est très proche du signal analogique. Une très légère atténuation de l'amplitude des « pics » apparaît cependant.

Toutefois, la fidélité au tracé semble suffisante pour pouvoir procéder à une analyse fréquentielle du signal de la seiche.

Conclusion :

Le logiciel NUNIEAU s'avère très performant dans la numérisation de marégrammes contenant un signal de seiche. Port-Tudy a ici été choisi en raison de l'amplitude exceptionnelle des seiches et de leur période de courte durée. Ces deux paramètres sont en effet de nature à diminuer la lisibilité de la trace sur le papier. Il est donc possible d'appliquer cette méthode pour étudier les seiches figurant sur les enregistrements d'autres marégraphes et qui présentent pour la plupart une lisibilité supérieure.

Il faut toutefois préciser que la précision obtenue ici, ne peut être obtenue que pour des enregistrements à durée relativement limitée, la limite étant fixée par la durée des calculs, directement liée à la puissance de l'ordinateur utilisé.

2.2 Analyse fréquentielle des signaux de seiche

Pour une meilleure compréhension des seiches, on peut chercher à déterminer leurs caractéristiques en tant que phénomène oscillatoire. Les signaux de seiches de différents ports ont pu être analysés.

2.2.1 Analyse fréquentielle à partir des données issues de NUNIEAU

2.2.1.1 Présentation de la démarche

- Phase préliminaire

L'étude a tout d'abord commencé par l'analyse des données fournies par NUNIEAU, à partir des marégrammes papier. La sélection de ces derniers s'est effectuée en retenant ceux qui comportaient un signal de seiche d'amplitude suffisante pour être visible à l'œil nu.

Avant le traitement informatique du signal de seiche, il peut être utile d'estimer la période de la seiche. Pour cela, il suffit de mesurer directement sur la feuille de papier la distance entre deux « pics » consécutifs. L'échelle du graphe fournit ensuite une valeur approximative de la durée.

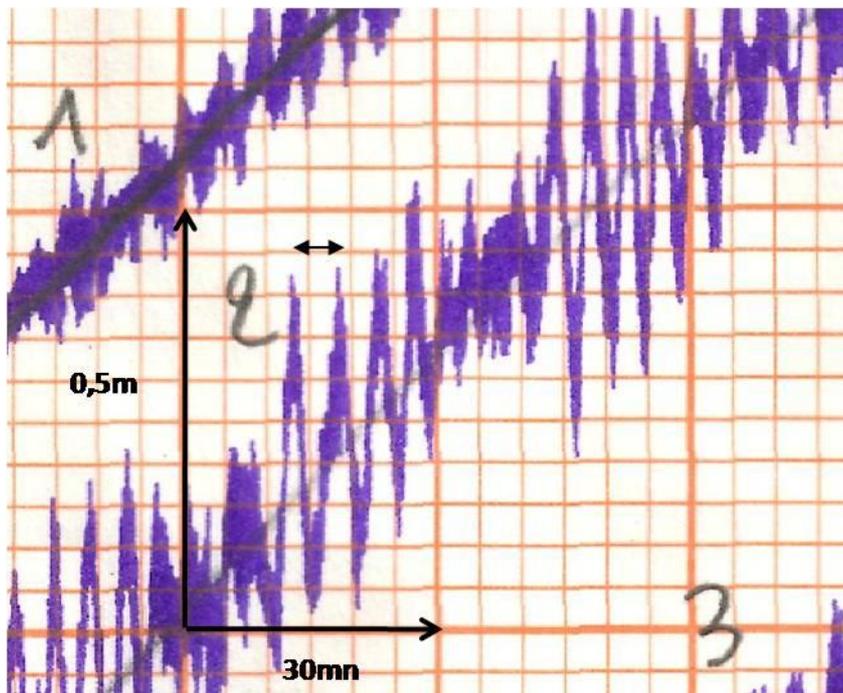


Figure 14: Estimation de la période

La période peut ici être estimée à 5 mn (1 carreau), et la hauteur de la seiche est estimée à environ 40cm (8 carreaux).

L'utilisation du logiciel MATLAB permet une analyse fréquentielle du signal. Il faut pour cela numériser le signal à traiter.

NUNIEAU fournit la hauteur d'eau à un emplacement donné en fonction du temps. Les variations du niveau de la mer incluent les seiches, mais aussi la marée. La marée prédite a donc été calculée grâce au logiciel MAS du SHOM, puis retranchée au signal pour ne conserver que la seiche et la surcote.

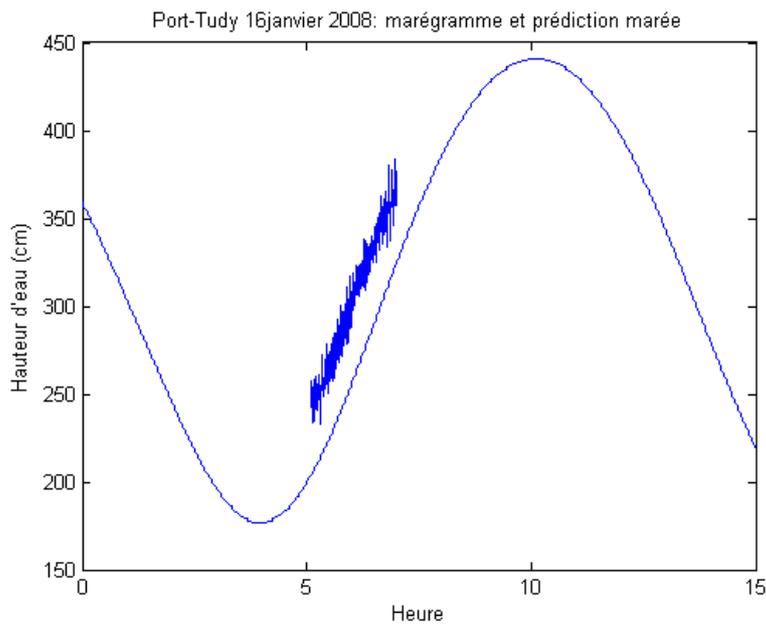


Figure 15: Comparaison hauteur d'eau mesurée et prédiction de marée (1 heure)

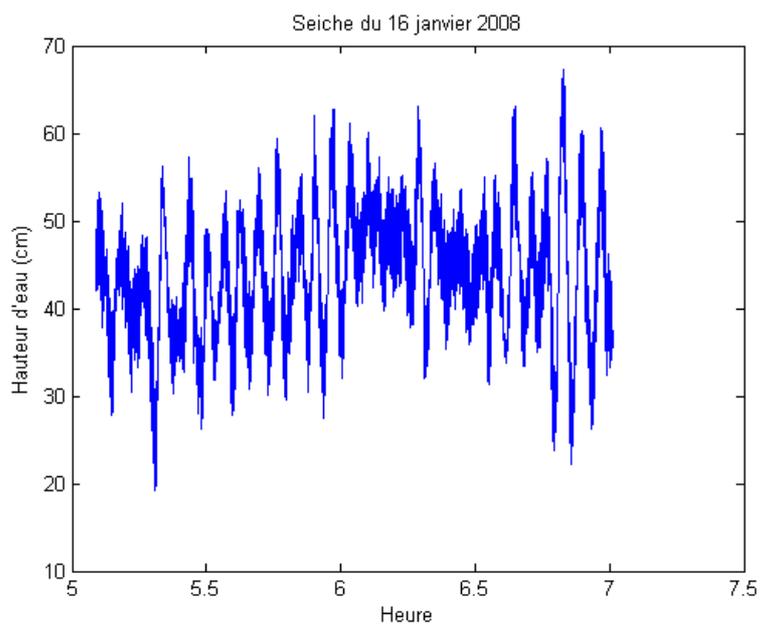


Figure 16: Signal de seiche

Après avoir « enlevé » le signal de marée, on obtient (Figure 16) le signal de seiche. On pourra remarquer que les oscillations ne sont pas centrées autour du niveau 0. Cela est dû au phénomène de surcote ou décote, qui est engendré par des conditions météorologiques particulières (variation de la pression atmosphérique, vent), la prédiction correspondant à des conditions météorologiques moyennes.

- Traitement du signal

L'analyse fréquentielle est réalisée à l'aide de la commande `fft` de MATLAB. La donnée d'entrée est un vecteur, dont les coordonnées sont les hauteurs d'eau relevées à intervalle de temps constant. La fonction `fft` renvoie le vecteur de la transformée de Fourier discrète de ce vecteur.

Par exemple, si on considère le vecteur $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Sa transformée de Fourier discrète est le vecteur F de coordonnées :

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n} jk} \quad j = 0, \dots, n-1.$$

Echantillonnage du signal

Pour qu'il soit possible de mettre en évidence la fréquence d'un signal, il faudra veiller à choisir un intervalle de temps au moins 2 fois supérieur à la période que l'on cherche à déterminer. Nous recherchons ici des périodes d'une durée inférieure à l'heure. Le choix d'échantillons correspondant à des enregistrements de plusieurs heures pourra satisfaire cette condition.

Théorème de Nyquist et fréquence d'échantillonnage.

La fréquence d'échantillonnage fixe la limite de la plage de fréquence pour laquelle on veut obtenir la réponse de la transformée de Fourier.

Le graphe de la transformée présente une symétrie par rapport à une fréquence appelée fréquence de Nyquist. Il suffit donc d'étudier cette transformée jusqu'à cette fréquence.

2.2.1.2 Port-Tudy

- Seiche du 10 mars 2008

L'échantillon choisi a été extrait de l'enregistrement du marégraphe du 10 mars 2008. Celui-ci a une durée d'environ 2 heures. Le pas de temps entre deux hauteurs d'eau est de 3 secondes.

On a alors : $dt = 1/3600 * 3 = 8,3 * 10^{-4}$ h.

La fréquence d'échantillonnage est donc ici $F_s = 1/dt = 1200$ h⁻¹

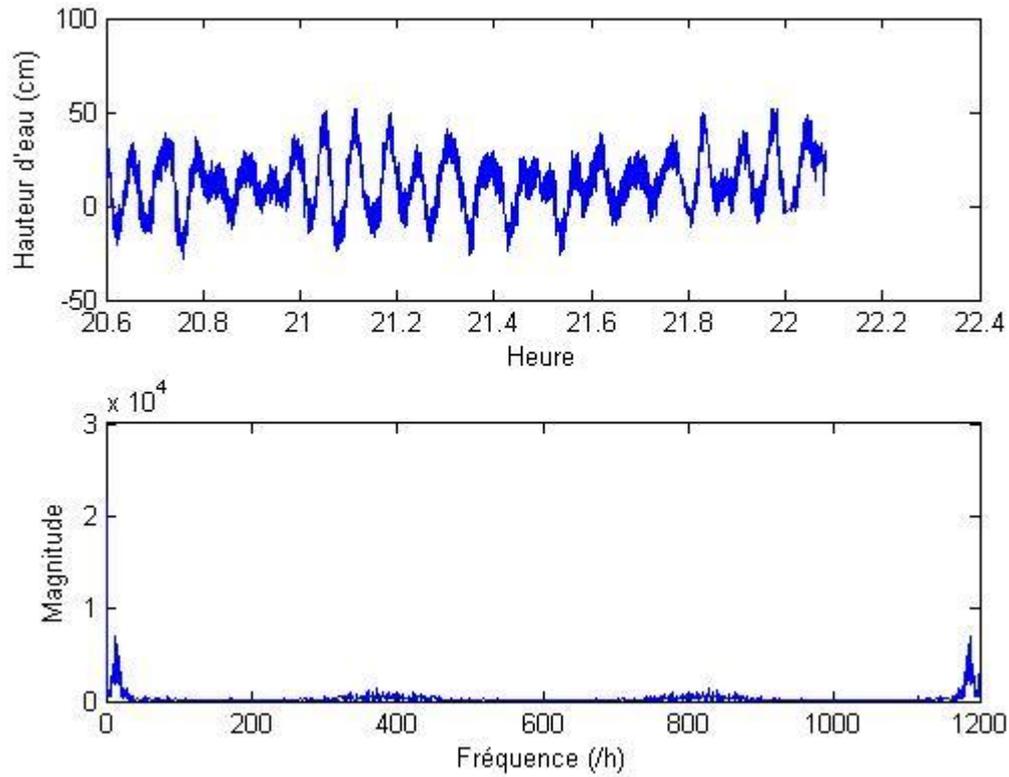


Figure 17: Seiche du 10mars 2008

Conformément au théorème de Nyquist, on observe une symétrie par rapport à la valeur de 600 h^{-1} , qui est la fréquence de Nyquist. On peut donc restreindre la plage d'étude aux fréquences inférieures à cette valeur.

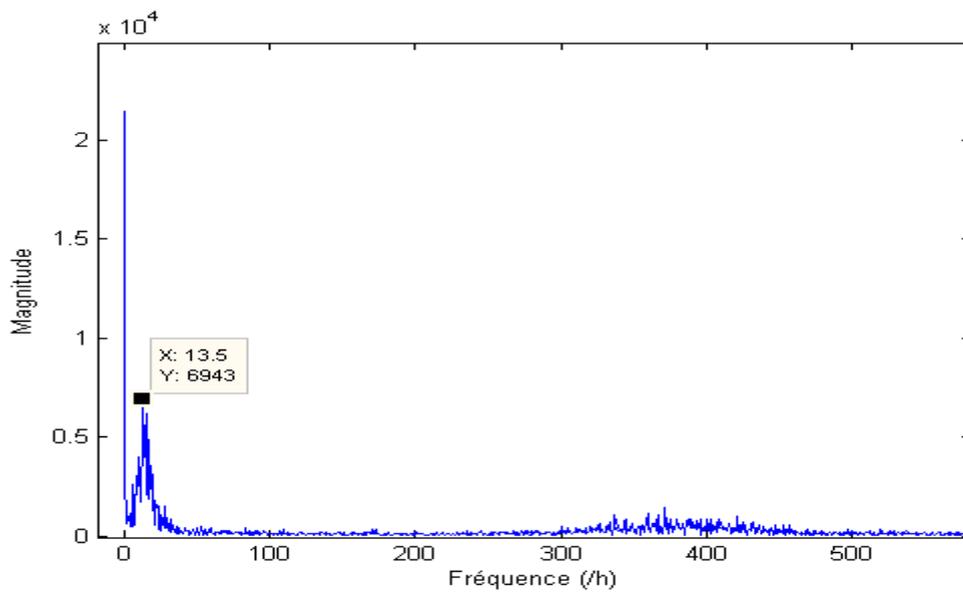


Figure 18: Restriction du domaine des fréquences

L'analyse fréquentielle fait apparaître plusieurs particularités. Pour les valeurs de fréquences proches de 0, il y a un pic d'amplitude. Comme décrit un peu avant, les oscillations ne sont pas strictement centrées autour du niveau de la prédiction de marée. Il y a en effet une surcote de l'ordre de 20cm du niveau de la mer vis-à-vis de la prédiction de marée, qui explique une magnitude élevée pour les fréquences très basses. C'est la composante continue.

De plus, on note la présence de pics d'amplitude de moindre importance pour les fréquences allant de 350 h^{-1} à 450 h^{-1} . Cela est en fait du bruit, qui peut apparaître dans le signal.

Enfin, le pic le plus élevé correspondant à une seiche de fréquence $f=13,3 \text{ h}^{-1}$.

Cette fréquence correspond à une période $T=1/f=60/13,5=4,4 \text{ mn}$.

- Seiche du 16 janvier 2008

L'échantillon de données porte sur un enregistrement de marégraphe du 16 janvier 2008. Celui-ci est d'une durée de 1 heure. Le pas de temps est maintenant de 1 seconde. La fréquence d'échantillonnage est donc de 3600 h^{-1} .

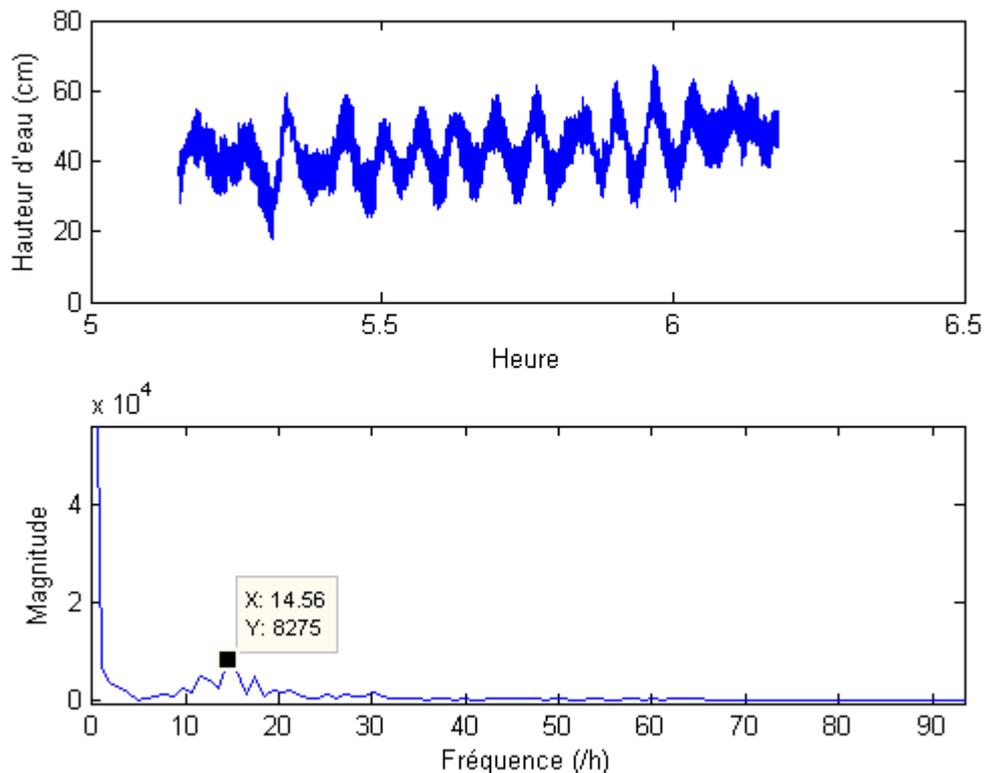


Figure 19: Signal et spectre de seiche (Port-Tudy)

Les hautes fréquences, pour lesquelles il y a du bruit, ne seront pas étudiées. Tout comme l'échantillon précédent, il y a la présence d'une surcote fluctuante, et donc un pic d'énergie pour les fréquences très faibles.

On constate la présence d'un pic pour une fréquence. $f=14,56 \text{ h}^{-1}$.

La période de la seiche est donc ici $T=1/f=60/14,56=4,1 \text{ mn}$.

On pourra toutefois remarquer que si cette valeur de fréquence correspond à un maximum local pour la magnitude, le pic correspondant est peu marqué. Les fréquences voisines présentent elles aussi des niveaux d'énergie notables.

Enfin, les deux échantillons présentent donc des valeurs de période relativement proches. (4,1 mn et 4,4 mn). Cela confirme l'examen rapide des marégrammes de Port-Tudy de plusieurs années. Toutes les seiches qui ont pu être repérées avaient une période (environ 5mn) du même ordre de grandeur que les valeurs déterminées par analyse fréquentielle.

2.2.1.3 Brest

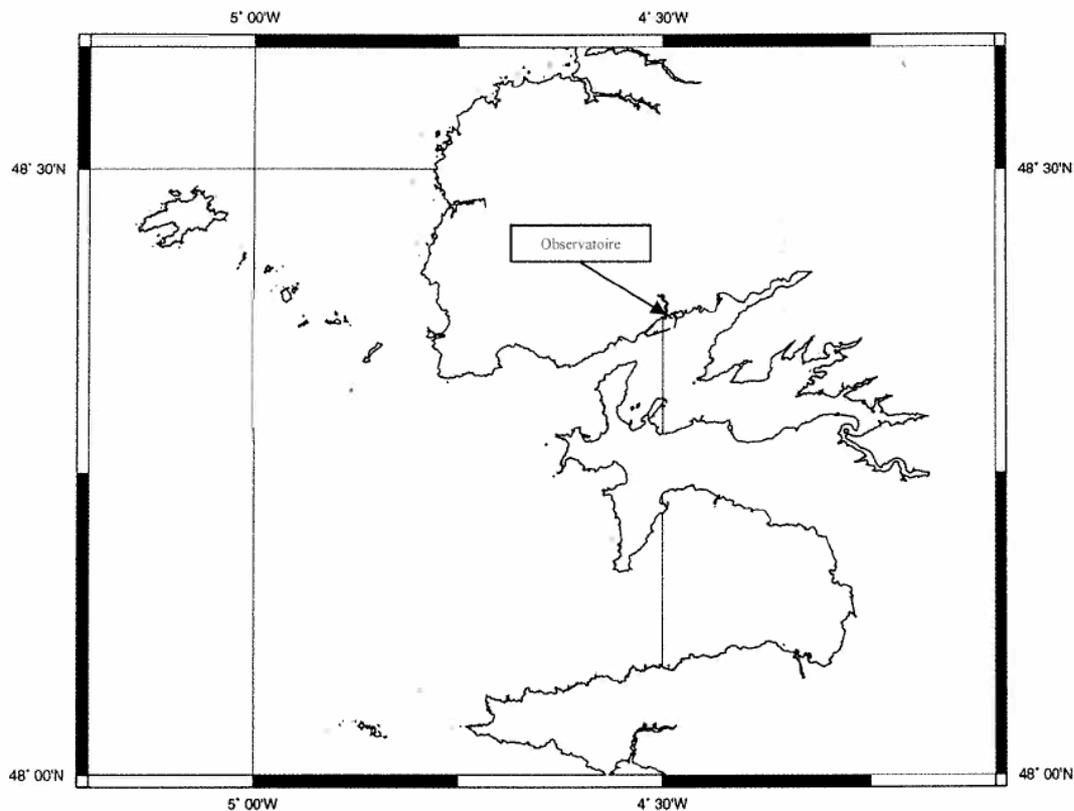


Figure 20: Position du marégraphe à Brest (SHOM)

Les échantillons de marégrammes étudiés ici ont été choisis parmi les enregistrements du niveau de la mer à Brest de 1996 à 2002.

Ces extraits ont été sélectionnés en fonction de la lisibilité de la seiche au niveau du signal analogique.

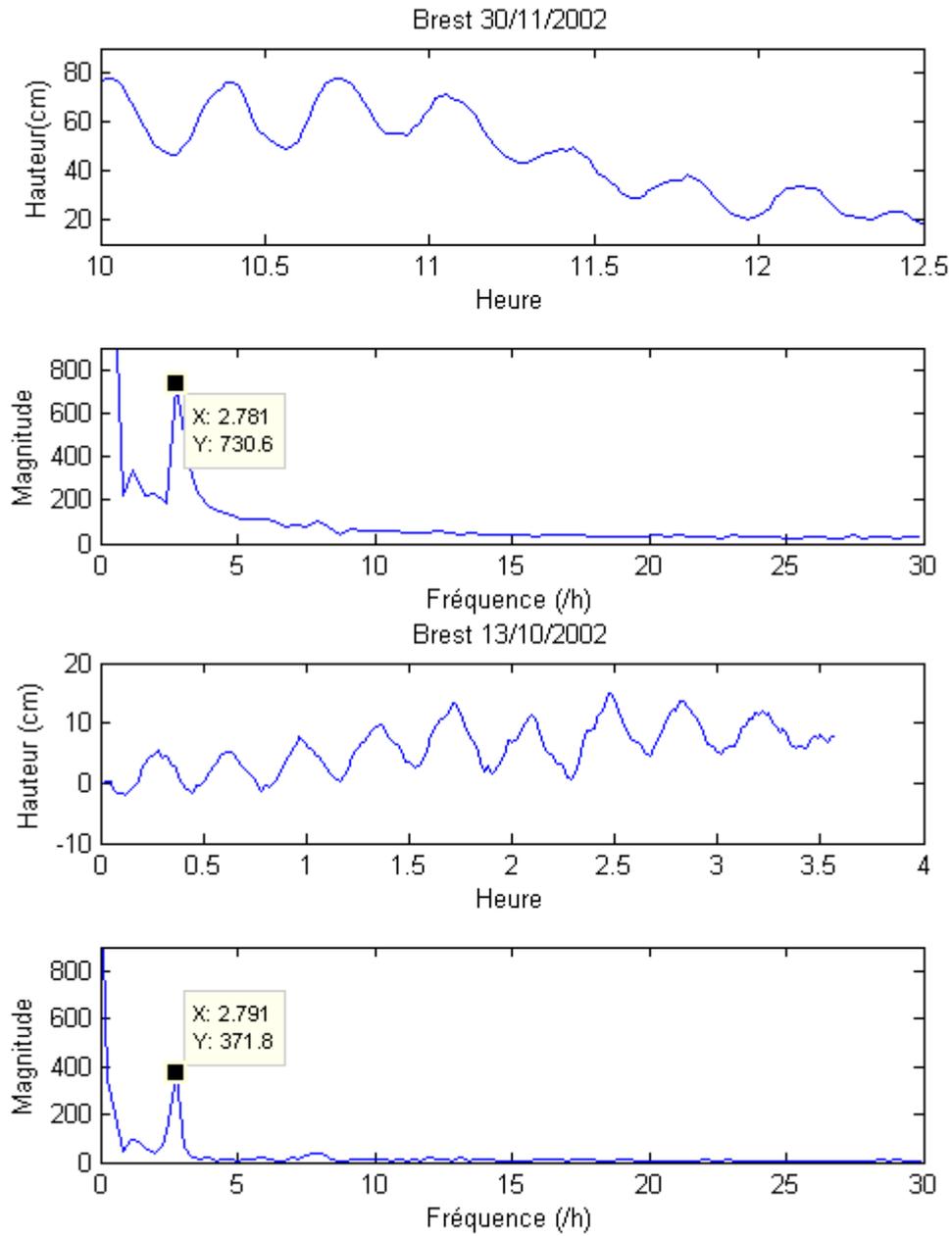


Figure 21: Seiche de fréquence basse

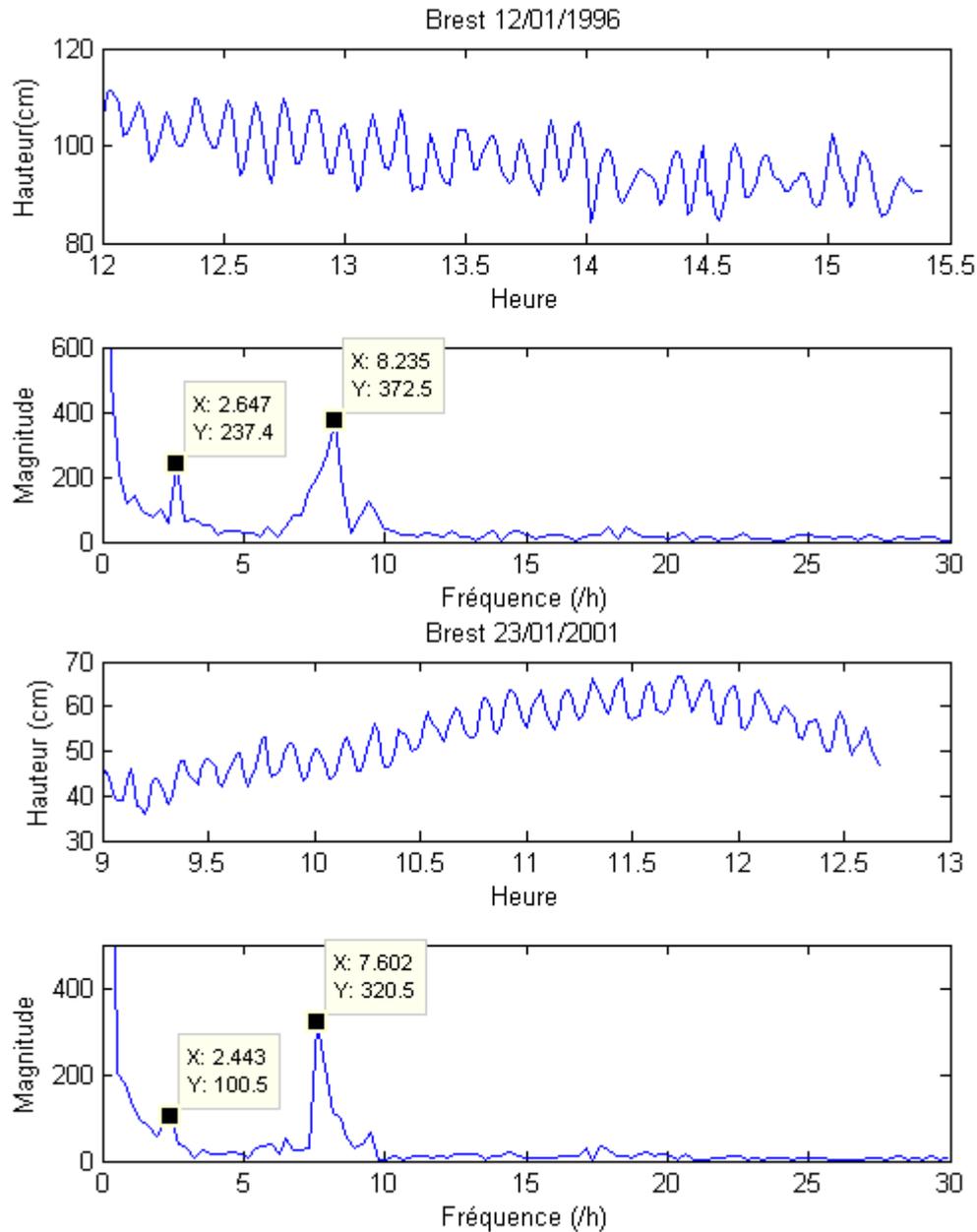


Figure 22: Fréquences de seiche à Brest, 12/01/1996 et 23/01/2001

A l'issue de l'examen visuel des signaux analogiques de seiche, il apparaît que ceux-ci offrent une meilleure lisibilité que ceux de Port-Tudy. Le pas de temps choisi ici pour la numérisation avec NUNIEAU est de 60s. La fréquence d'échantillonnage est alors :: $F_s=1/dt= 60 \text{ h}^{-1}$

Comme précédemment, la plage de fréquence analysée est délimitée par la fréquence de Nyquist, qui est donc $F_s/2= 30 \text{ h}^{-1}$

Les Figure 21 et 22 montrent les résultats de l'analyse fréquentielle de signaux de seiche correspondant à 4 dates différentes. Il est apparu que ceux-ci pouvaient être regroupés

suivant leur spectre. En effet, pour deux d'entre eux, il apparait un pic d'amplitude pour une fréquence d'environ $2,8 \text{ h}^{-1}$, soit une période $T=60/2,8=21,4 \text{ mn}$

Pour les deux autres, la fréquence où apparait un pic d'énergie est plus élevée. Elle est d'environ 8 h^{-1} La période correspondante est donc $T=60/8=7,5 \text{ mn}$

Toutefois, un autre pic, de moindre mesure, est visible pour ces deux jours. La fréquence correspondante est de $2,6 \text{ h}^{-1}$ ($T=23 \text{ mn}$) pour le 12/01/1996, et de $2,4 \text{ h}^{-1}$ le 23/01/2001.

De même, une étude plus attentive des seiches du 30/11/2002 et du 13/10/2002 permet d'observer un autre pic, de bien moindre importance cependant, pour les fréquences proches de 8 h^{-1} .

Les échantillons sélectionnés sont de durée assez brève, et cela peut expliquer qu'il y ait des disparités entre les différentes fréquences remarquables. Toutefois, la similarité des valeurs déterminées à partir des données issues de NUNIEAU permet donc de donner une estimation de deux des périodes de seiche caractéristiques.

En conclusion, à Brest on observe deux périodes (valeurs approximatives) associées aux seiches : 23 mn et 7,5 mn. En fonction des cas, soit la première période est excitée (Figure 21), soit les deux (Figure 22).

2.2.2 Analyse des données issues des marégraphes numériques

2.2.2.1 Marégraphe de Brest

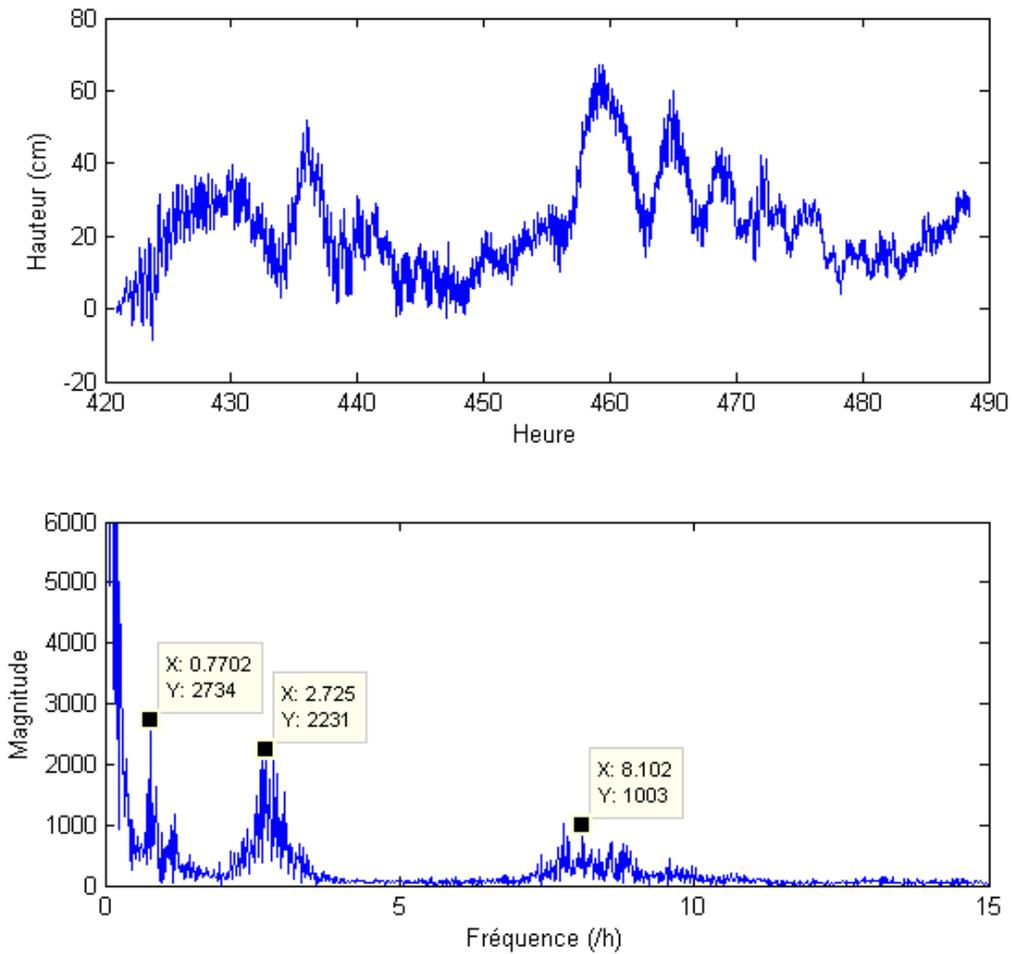


Figure 23: Seiche du 17 au 20 janvier 2009, Brest

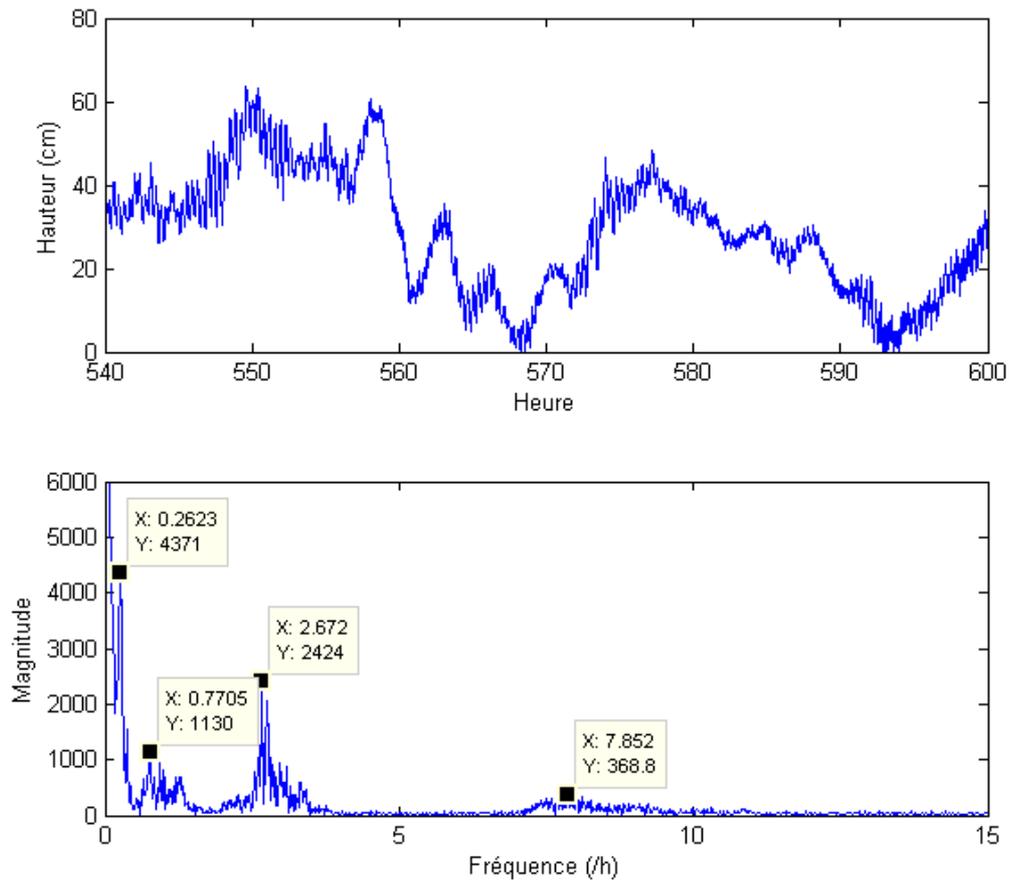


Figure 24: Seiche du 22 au 24 janvier 2009

Parmi les fréquences présentant des amplitudes élevées, on retrouve des valeurs proches de celles déjà observées lors de l'analyse à partir des données issues de NUNIEAU. Il s'agit de $2,73 \text{ h}^{-1}$ et $8,10 \text{ h}^{-1}$ pour la première seiche, et de $2,67 \text{ h}^{-1}$ et $7,85 \text{ h}^{-1}$ pour la deuxième seiche.

Il faut toutefois faire la distinction entre ces deux valeurs. Si on retrouve des amplitudes fortement marquées, quel que soit l'échantillon, pour la fréquence la plus basse, la situation est différente pour l'autre fréquence. Les valeurs d'amplitude relative à cette dernière sont plus bien plus faibles. Pour la seiche du 22 au 24 janvier, l'augmentation d'amplitude est peu marquée et le maximum d'amplitude est près de sept fois plus faible

De plus, il apparaît de manière plus nette des pics d'amplitude pour les fréquences de $0,7 \text{ h}^{-1}$ et $0,26 \text{ h}^{-1}$. Ces fréquences n'apparaissent pas lors de l'étude à partir des données analogiques.

2.2.2.2 Marégraphe de Cherbourg

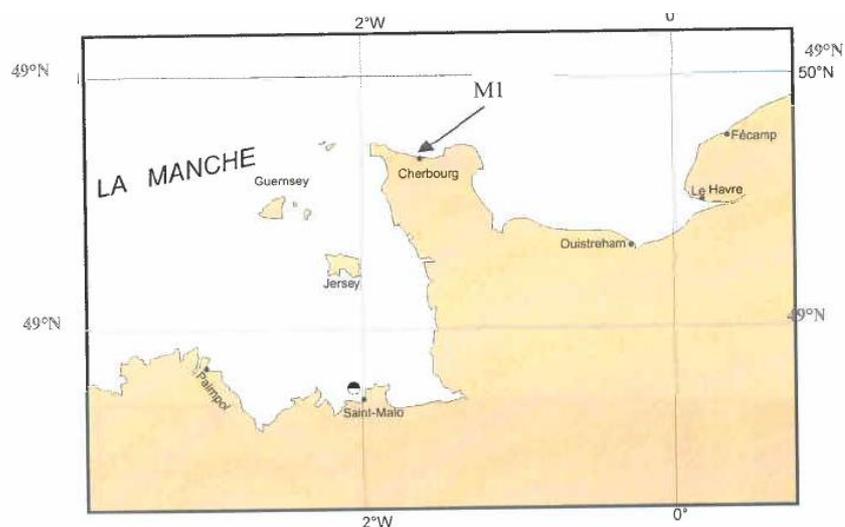


Figure 25: Situation du port de Cherbourg (Source SHOM)

Le marégraphe de Cherbourg est situé dans le port militaire.

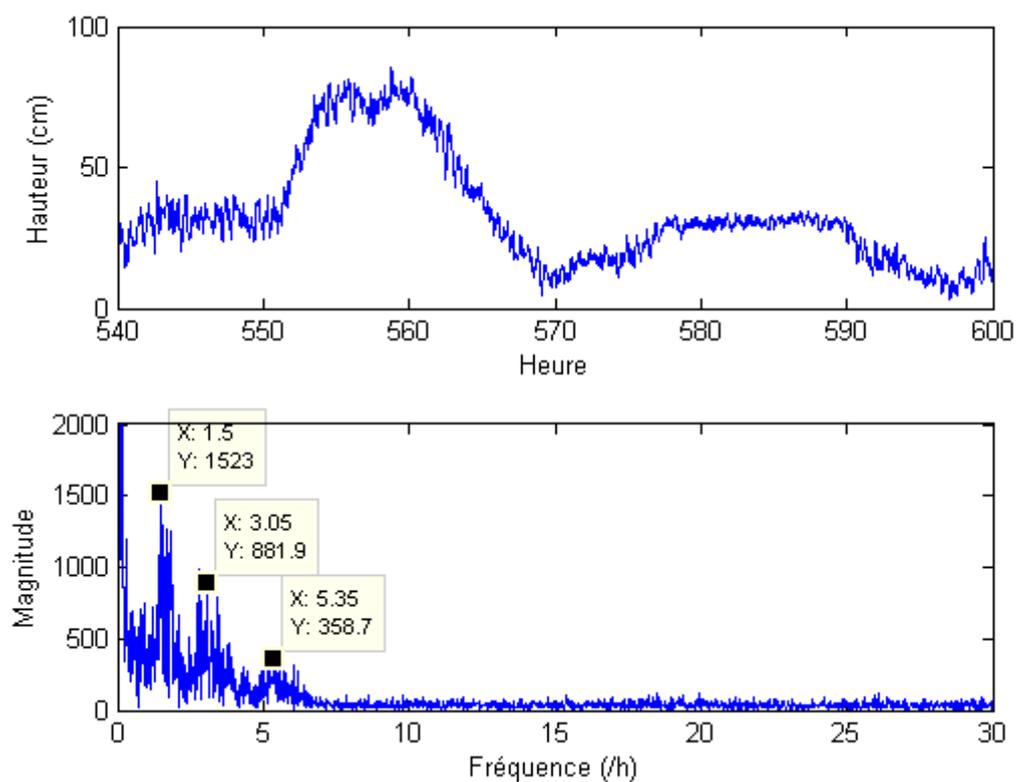


Figure 26: Seiche 22-24 janvier 2009

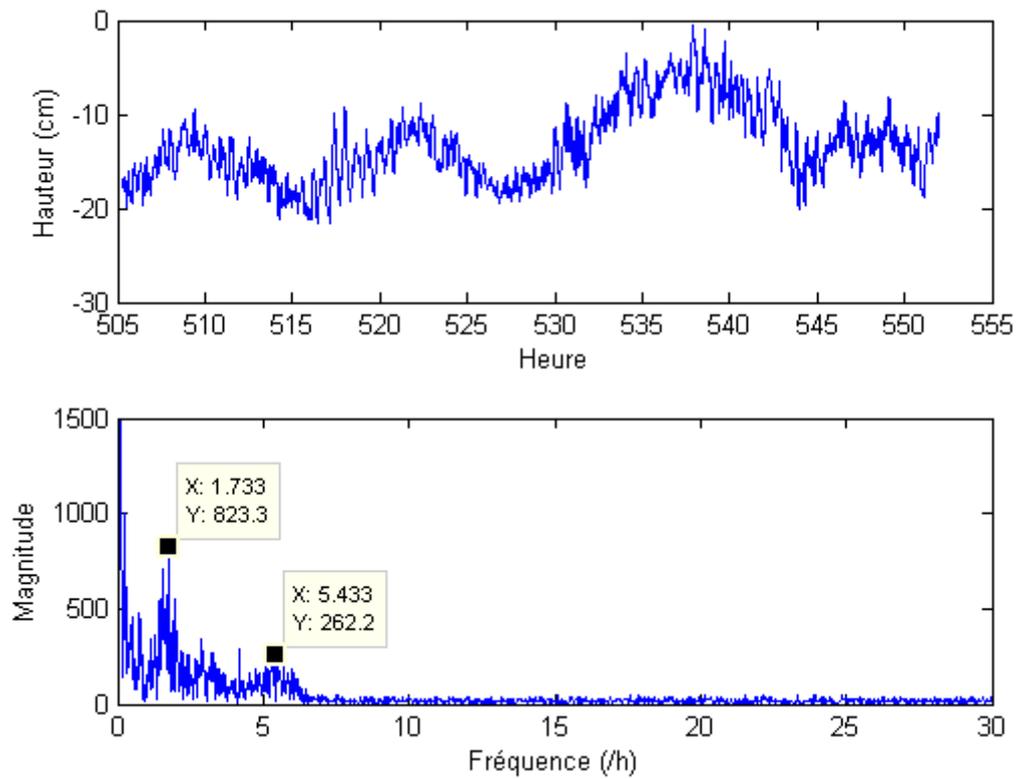


Figure 27: Seiche 21-23 février 2009

L'étude des signaux de seiche de deux périodes différentes laisse apparaître des pics de magnitude pour les fréquences proches de $1,6 \text{ h}^{-1}$ d'une part et de $5,4 \text{ h}^{-1}$ d'autre part.

Les valeurs de magnitude élevées autour de 3 h^{-1} , relevées pour la seiche du 22 au 24 janvier, sont également visibles pour la seiche du 21 au 23 février, mais dans une moindre mesure.

2.2.2.3 Marégraphe de Dieppe

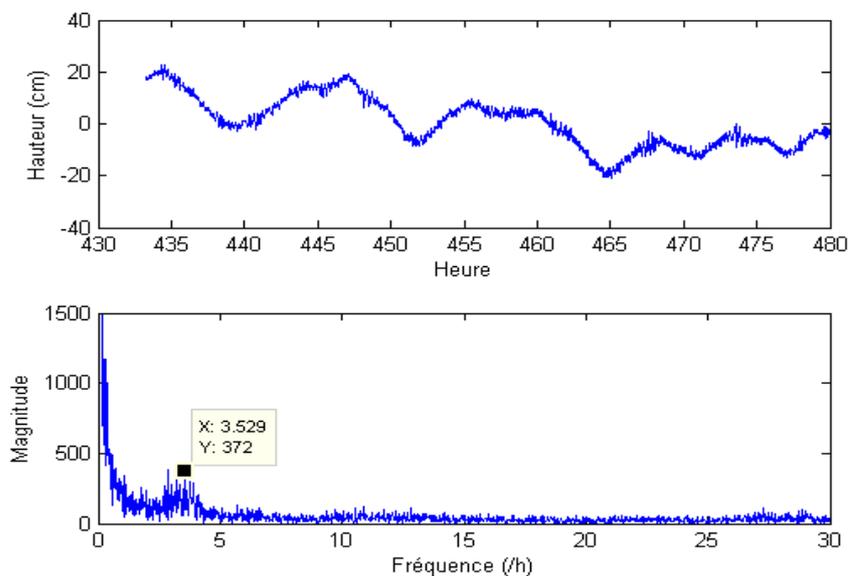


Figure 28: Seiche 18-19 Avril 2009

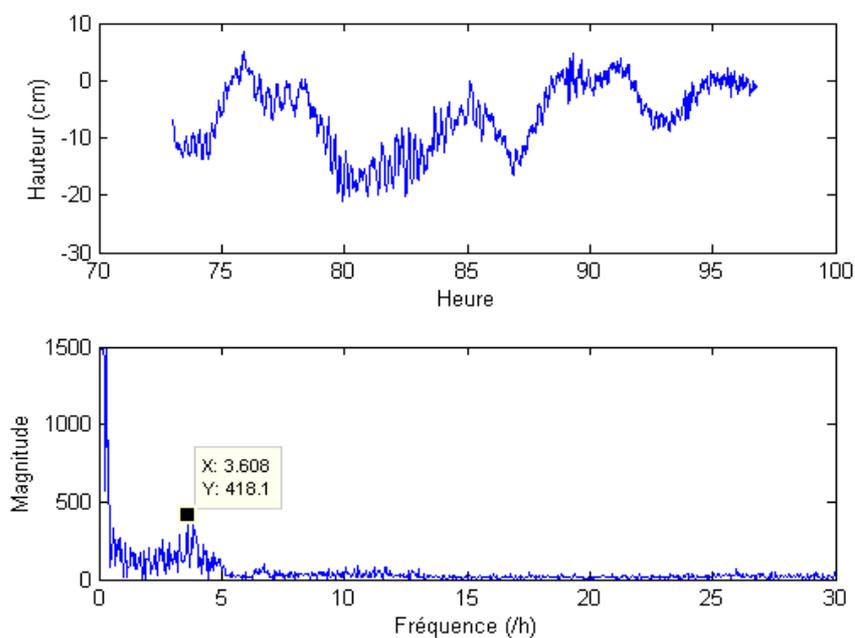


Figure 29: Seiche 3 mai 2009

Pour les deux seiches sélectionnées, un seul pic de magnitude est visible, pour une fréquence proche de $3,5 \text{ h}^{-1}$

2.2.3 Récapitulatif

Les valeurs approchées de période de seiche qu'il a été possible de déterminer sont les suivantes :

➤ **Port-Tudy** : 4,2 mn.

➤ **Brest** :

A partir des données analogiques : 7,5 mn et 23 mn.

A partir des données numériques : 7,5 mn, 22 mn, 85,7mn et 230mn.

➤ **Cherbourg** : 11mn, 20 mn et 37,5mn.

➤ **Dieppe** : 17mn.

3 MODELE NUMERIQUE : REFONDE

Le logiciel REFONDE, dispose d'un module SEICHE, qui permet de calculer la période propre et le mode propre des seiches ; en résolvant l'équation de Berkhoff par éléments finis. Les résultats obtenus seront comparés aux périodes propres de seiche déterminées lors de la partie précédente, par analyse fréquentielle.

L'utilisation de REFONDE nécessite de déterminer une zone fermée. Il est donc nécessaire de déterminer une frontière, qui sera composé du trait de côte et d'une ligne imaginaire, appelée bord ouvert, délimitant la limite entre la zone étudiée et la mer ouverte.

Les sites de Port-Tudy et Brest ont été choisis pour le calcul

3.1 Brest

Les données de base utilisées par le logiciel sont la bathymétrie et les coordonnées du contour de la zone du port.

Un maillage, paramétrable est ensuite appliqué sur le domaine.

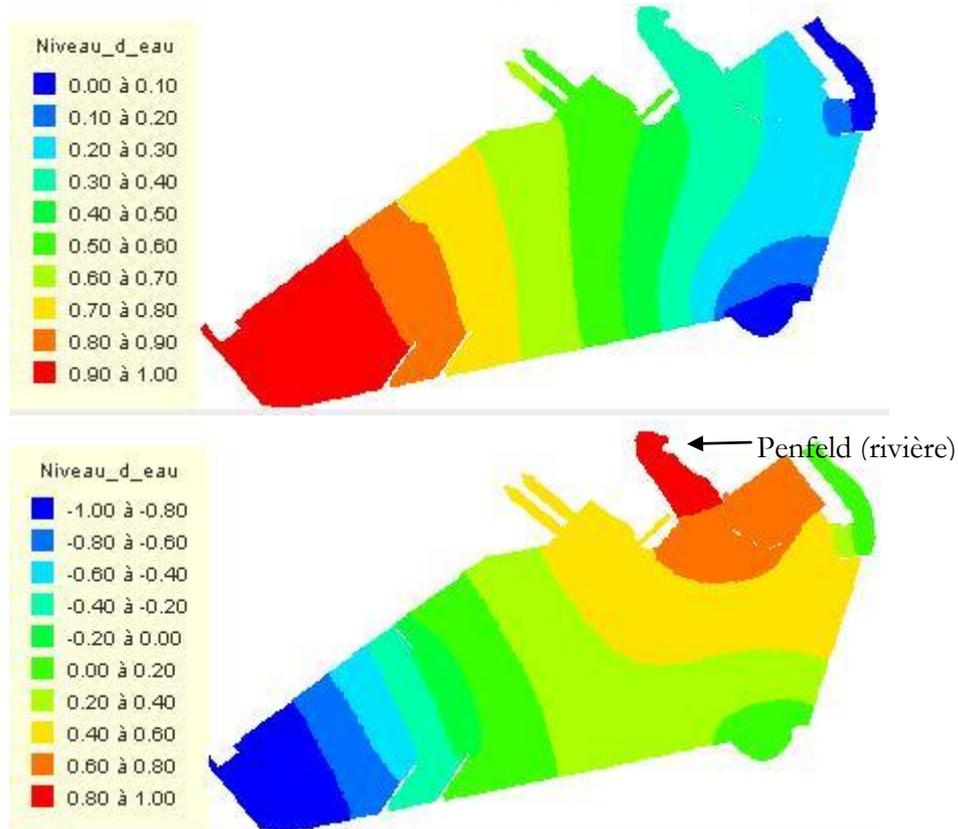


Figure 30: Forme de la seiche mode 1 (en haut) et mode 2 (en bas)

La Figure 30 montre les formes de seiches obtenues pour une cote d'eau de 1m ZH (Zéro Hydrographique).

Les niveaux d'eau précisés sur la figure sont des valeurs normalisées. Ils précisent les variations de hauteur d'eau suivant les nœuds et ventres de l'onde stationnaire. Le mode 1 correspond à la seiche uninodale.

En choisissant une cote d'eau de 5 m, les seiches gardent la même forme, mais les périodes obtenues sont différentes.

Cote eau	Mode 1	Mode 2
1 m	947 s (15,8 mn)	415 s (6,9 mn)
5 m	743 s (12,4 mn)	321 s (5,4 mn)

Tableau 4: Période des seiches à Brest

La précision du maillage influence peu les résultats. Un maillage de 4900 nœuds a été utilisé pour le calcul précédent. Le même calcul avec un maillage de 590 nœuds conduit à des valeurs de période très légèrement inférieures (entre 2 et 3%).

La seiche de mode 1 correspond à l'agitation de l'ensemble du plan d'eau. La seconde seiche est plus localisée à proximité de la Penfeld (rivière se jetant dans la zone du port).

Seiche \ Méthode de calcul	REFONDE	Analyse fréquentielle
Mode 1	12,4 à 15,8 mn	22 mn
Mode 2	5,4 à 6,9 mn	7,5 mn

Tableau 5: Comparaison avec l'analyse fréquentielle

Il y a une dispersion assez importante entre les deux méthodes pour la seiche uninodale. La différence atteint 30%. Mais pour la seiche de mode 2, les valeurs sont plus proches, et la différence n'est que de 20%.

REFONDE peut également donner les modes supérieurs, mais il n'y a pas de correspondance avec les résultats de l'analyse fréquentielle. A l'inverse, les seiches de périodes supérieures à 1h ne trouvent pas de correspondance avec le calcul de REFONDE.

3.2 Port-Tudy

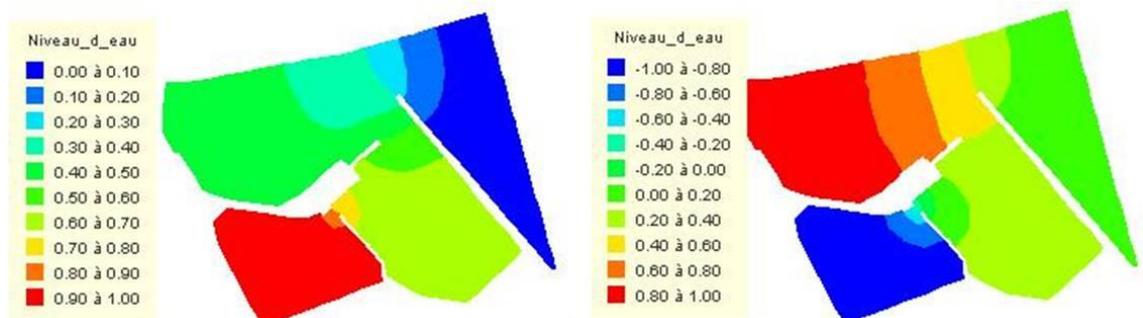


Figure 31: Forme de seiches à Port-Tudy pour les modes 1 (à gauche) et 2 (à droite)

Les calculs ont été effectués en choisissant une hauteur d'eau de 2m, puis de 4m. Dans les deux cas, l'allure des seiches obtenue est identique (Figure 31).

Cote eau	Mode 1	Mode 2
2 m	275 s (4,6 mn)	143 s (2,4 mn)
4 m	209 s (3,5 mn)	106 s (1,8 mn)

Tableau 6: Période des seiches à Port-Tudy

Seiche\ Méthode de calcul	REFONDE	Analyse fréquentielle
Mode 1	3,5 à 4,6 mn	4,12 à 4,5 mn
Mode 2	1,8 à 2,4 mn	-----

Tableau 7: Comparaison des valeurs de période obtenues:

Le module seiche du logiciel REFONDE, en imposant un noeud au niveau du bord ouvert, mène à des résultats qui peuvent être biaisés.

L'utilisation du module agitation, qui utilise une méthode de balayage des fréquences, devrait donner des meilleurs résultats pour le calcul des périodes, ainsi qu'une estimation du facteur d'amplification.

4 RECHERCHE D'ELEMENTS DECLENCHEURS DES SEICHES

Il s'agit de déterminer l'origine des seiches. La recherche est basée sur l'étude des marégrammes de plusieurs ports pour l'année 2007. Ils ont permis d'estimer les hauteurs de seiche avec une fréquence horaire. Le travail a consisté à :

- comparer les hauteurs de seiche des différents ports, pour estimer l'étendue géographique de la cause,
- .confronter les hauteurs de seiches et les conditions météorologiques, pour étudier une éventuelle corrélation,
- ,confronter les hauteurs de seiches et les données de houle d'autre, afin de déterminer d'éventuelles corrélations.

4.1 Relevés des hauteurs de seiche de différents ports

Le SHOM dispose d'un réseau de marégraphes permanents transmettant des données en temps réel. Le service de gestion de ce réseau observe que les épisodes de seiche apparaissent en période hivernale simultanément dans plusieurs ports équipés de marégraphes.

Il peut donc être intéressant de mener une étude comparative entre les relevés de seiche de quelques ports

4.1.1 Port-Tudy

Le relevé des hauteurs de seiche est effectué en examinant les marégrammes papier. A l'aide du quadrillage du papier, la hauteur de la seiche en est déduite pour chaque heure.

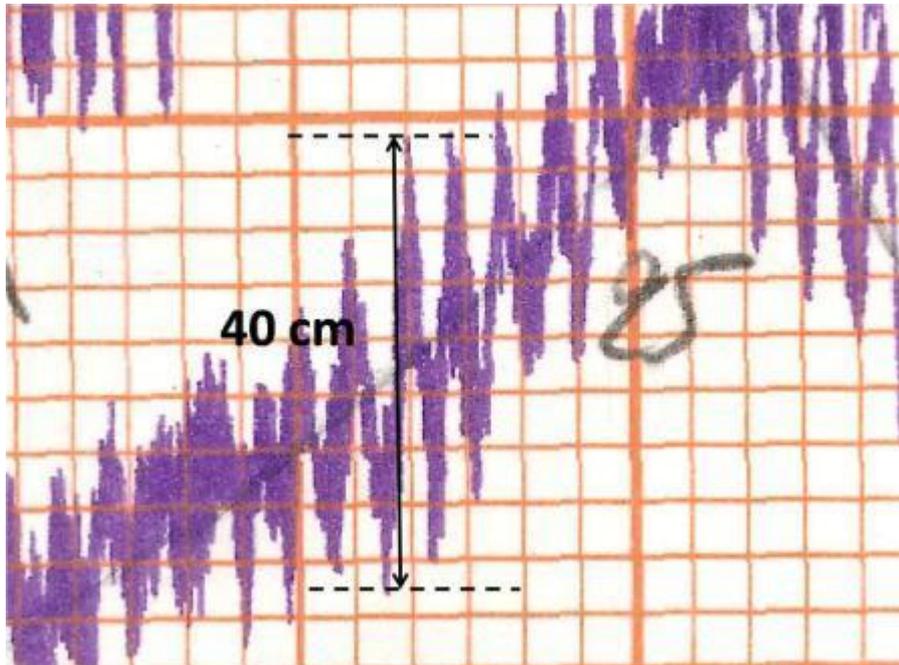


Figure 32: Estimation de la hauteur de seiche à Port-Tudy (25 février 2007)

La variation de la hauteur d'eau due à la marée étant faible devant l'amplitude de la seiche, on estime la hauteur de la seiche en mesurant directement la différence de hauteur d'eau entre un minimum et un maximum consécutifs

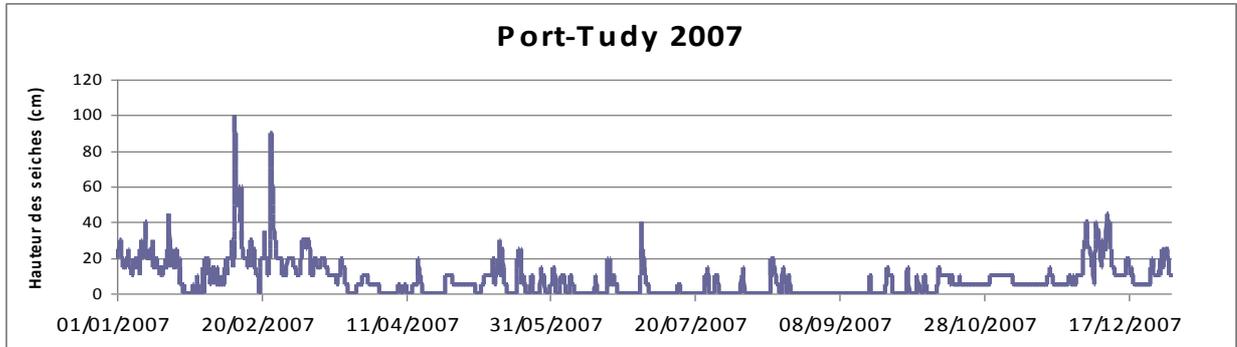


Figure 33: Estimation de la hauteur des seiches. Port-Tudy 2007

Deux pics de seiche apparaissent au mois de février, avec une hauteur maximum qui dépasse les 90 cm.

De manière générale, les hauteurs de seiches les plus importantes sont atteintes pendant la saison hivernale, c'est-à-dire aux mois de janvier, février et décembre. Pour ces mois, des hauteurs de 40 cm sont atteintes.

Cependant, le pic de 40 cm atteint au mois de juillet montre que des seiches d'amplitude importante peuvent tout de même être observées en été.

La durée des seiches est variable, pouvant aller de quelques heures à quelques jours.

4.1.2 Brest

La méthode pour déterminer les hauteurs de seiche diffère de celle mise en oeuvre à Port-Tudy. Les données utilisées sont les données du marégraphe numérique du SHOM. Les hauteurs d'eau sont données toutes les 10 minutes. Or d'après l'analyse spectrale réalisée (à partir des données numériques) pour ce port, les seiches les plus actives sont celles de période 20mn. Celles-ci devraient donc apparaître dans le marégramme. Pour obtenir le signal de seiche, la procédure est la même que lors de l'analyse fréquentielle : la prédiction est soustraite au niveau observé. Une fois le signal de seiche extrait, la solution retenue consiste à « découper » le signal en tranches d'une heure. Sur chaque plage horaire, le maximum et le minimum des hauteurs d'eau sont notés. Ces deux valeurs fixent en quelque sorte l'enveloppe de la courbe. La différence entre le maximum et le minimum donne l'épaisseur de l'enveloppe et donc une estimation de la hauteur de la seiche.

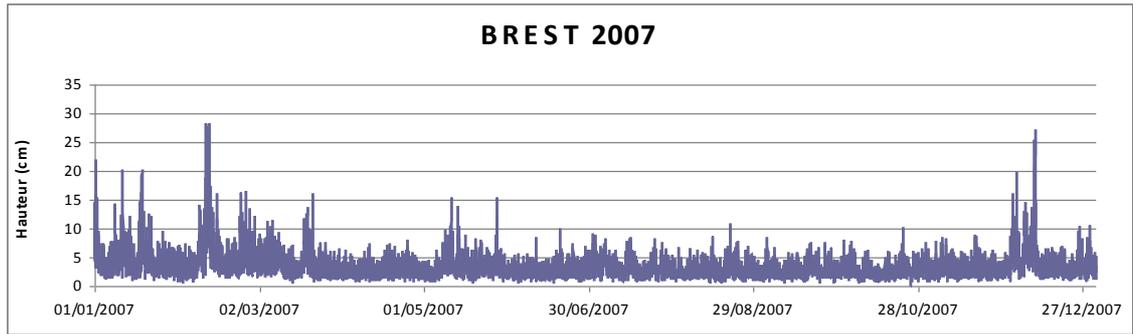


Figure 34: Estimation de la hauteur des seiches, Brest 2007.

Les amplitudes de seiche sont bien plus faibles que celles constatées pour Port-Tudy. Pour l'année considérée, la hauteur ne dépasse pas les 30 cm (soit une amplitude maximale de 15 cm).

De la même manière que pour Port-Tudy, la période hivernale est la période où les seiches sont les plus importantes. Toutefois, des seiches de hauteur conséquente apparaissent pendant les mois de mai et juin. La comparaison avec le graphique de Port-Tudy indique que certains pics de seiche apparaissent aux mêmes moments dans les deux ports.

4.1.3 Le Conquet

Les données proviennent du marégraphe numérique du SHOM. La méthode pour l'évaluation des hauteurs de seiche est donc la même que pour le port de Brest.

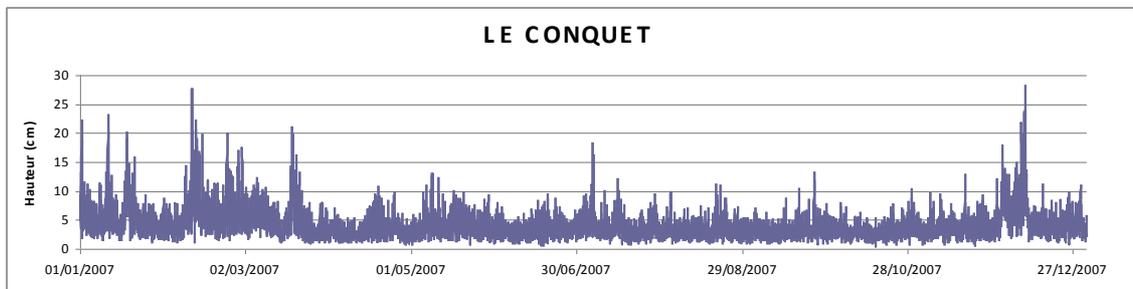


Figure 35: Estimation de la hauteur des seiches, Le Conquet 2007

La remarque sur la prédominance des seiches en hiver est également valable dans le cas de ce port.

Ce graphique présente des similarités avec celui de Brest ; ceci est dû à la proximité des deux ports.

4.1.4 Cherbourg

Les données sont issues du marégraphe numérique permanent du SHOM.

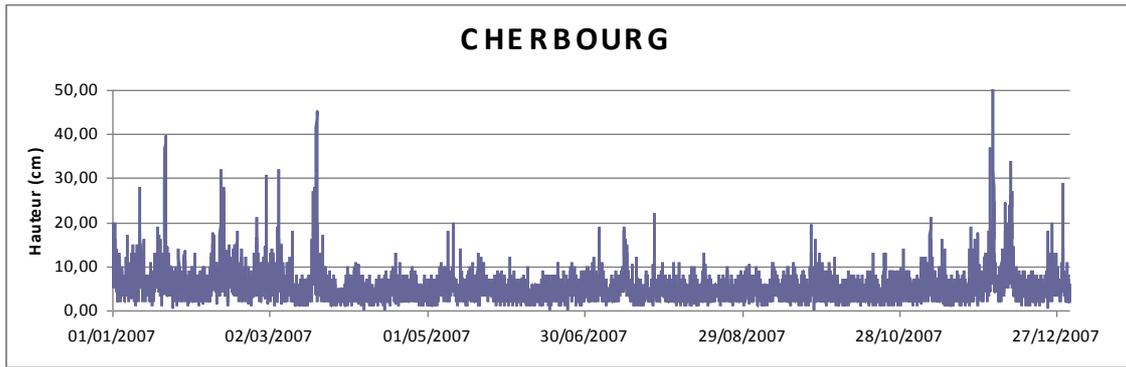


Figure 36: Estimation de la hauteur des seiches, Cherbourg 2007.

La hauteur maximale atteinte par les seiches (50cm) est plus élevée que dans les deux ports précédents.

La saison dite « hivernale » des seiches s'étend ici jusqu'à la fin du mois de mars. Là encore certains pics de seiche semblent avoir des correspondances avec les autres graphiques.

4.1.5 Comparaison entre les ports

Afin d'étudier plus précisément les similarités apparentes des graphes précédemment présentés. L'étude comparative se porte sur les périodes où les seiches sont les plus importantes.

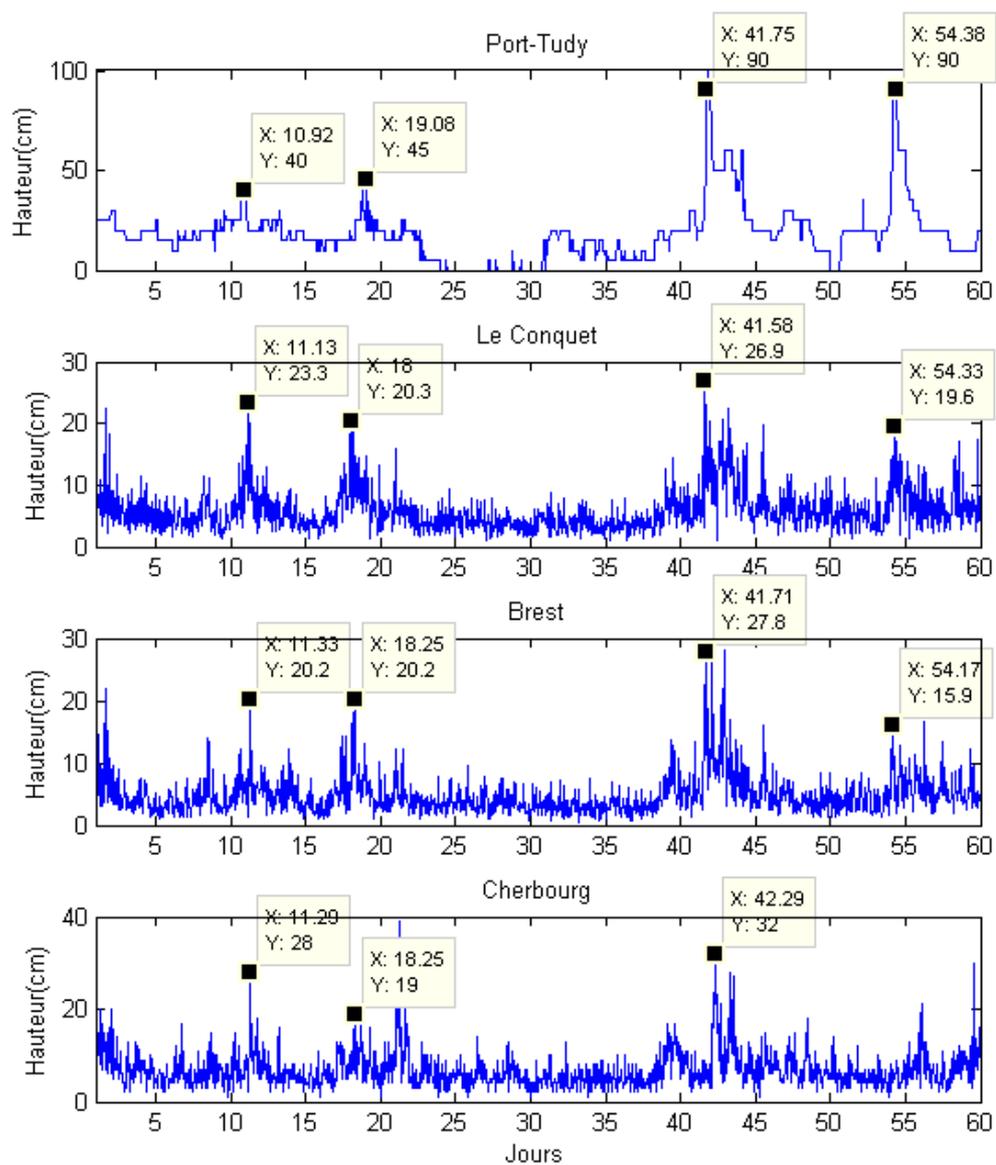


Figure 37: Comparaison des hauteurs de seiche (Janvier-février)

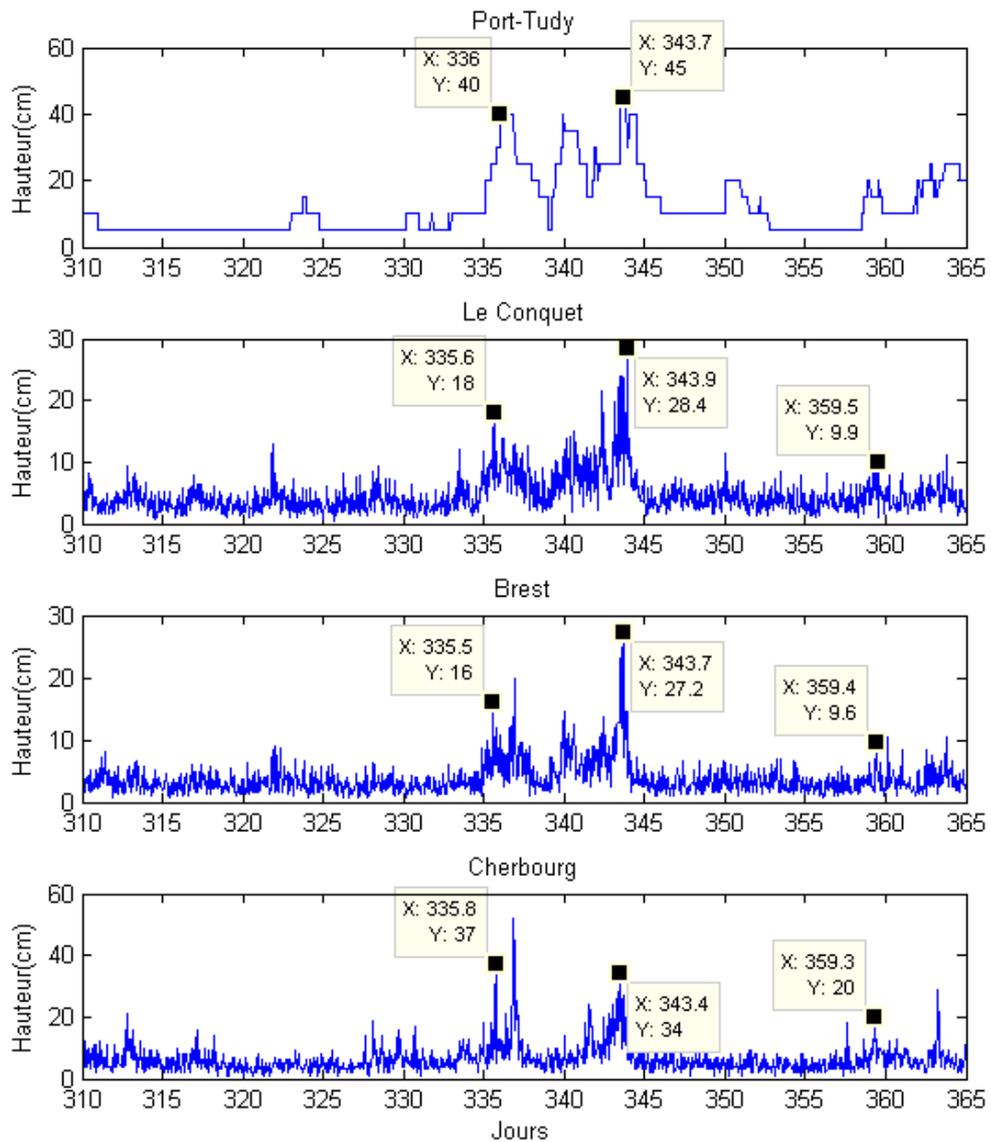


Figure 38: Comparaison des hauteurs de seiche (Novembre-décembre 2007)

Pour les deux périodes sélectionnées, les correspondances sont nombreuses entre les graphes. Certains pics de seiche se retrouvent dans les 4 ports étudiés, avec des décalages de quelques heures seulement (Figure 37 et Figure 38)

La relation n'est pas systématique, mais elle est de plus en plus vérifiée à mesure que l'on considère des épisodes de forte amplitude.

Pour tenter de vérifier ces hypothèses, les coefficients de corrélations entre les hauteurs de seiches des différents ports sont calculés. Le résultat est présenté dans les Tableau 8 et 9.

Tableau 8: Période du 1er janvier au 1er mars

	Port-Tudy	Le Conquet	Brest	Cherbourg
Port-Tudy	1	0,49	0,44	0,22
Le Conquet	0,49	1	0,49	0,29
Brest	0,44	0,49	1	0,24
Cherbourg	0,22	0,29	0,24	1

Tableau 9: Période du 6 novembre au 31 décembre

	Port-Tudy	Le Conquet	Brest	Cherbourg
Port-Tudy	1	0,6	0,58	0,41
Le Conquet	0,6	1	0,6	0,42
Brest	0,58	0,6	1	0,42
Cherbourg	0,41	0,42	0,42	1

Les coefficients r déterminés ne permettent pas à priori de conclure à une forte corrélation linéaire entre les mesures (coefficients variant de 0,22. à 0,58).

Les coefficients relatifs au port de Cherbourg sont les plus faibles de tous ($< 0,5$). Mais pour la deuxième période, les coefficients de corrélation entre Port-Tudy, Le Conquet et Brest sont proches de 0,6, ce qui confirme une légère corrélation entre les ports.

Ces coefficients peuvent paraître faibles, mais la méthode d'estimation des hauteurs de seiche induit des imprécisions entraînant une incertitude dans la précision des coefficients de corrélation.

L'étude des graphes de seiche suggère fortement l'existence d'une relation entre les événements de seiche de ces ports (en particulier, l'analyse graphique). Cela permet de conclure que les ondes de seiches sont en partie dues à un phénomène pouvant avoir une grande emprise géographique (Manche et Atlantique).

	Hauteur moyenne	Ecart-type	Hauteur maximale
Port-Tudy	7,8 cm	9,9 cm	100 cm
Le Conquet	4 cm	2,5 cm	28,4 cm
Brest	3,4 cm	2,2 cm	28,3 cm
Cherbourg	5,3 cm	3,3 cm	52 cm

Tableau 10: Synthèse des relevés de seiche 2007

4.2 Etude des données météo

Le but est de déterminer une éventuelle corrélation entre les hauteurs de seiche relevées à Port-Tudy et les données de mesures météorologiques 2007, fournies par METEO-France.

4.2.1 Etude de la pression atmosphérique et de la vitesse du vent

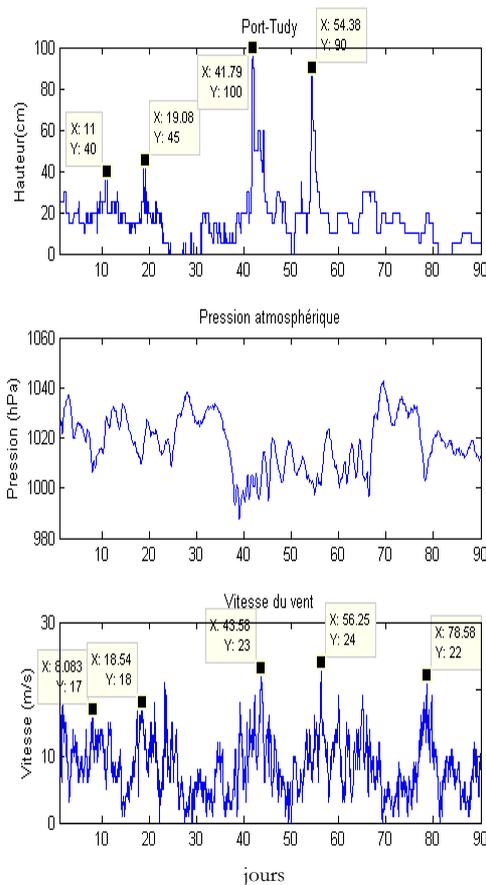


Figure 39: Du 1er janvier au 31 mars 2007

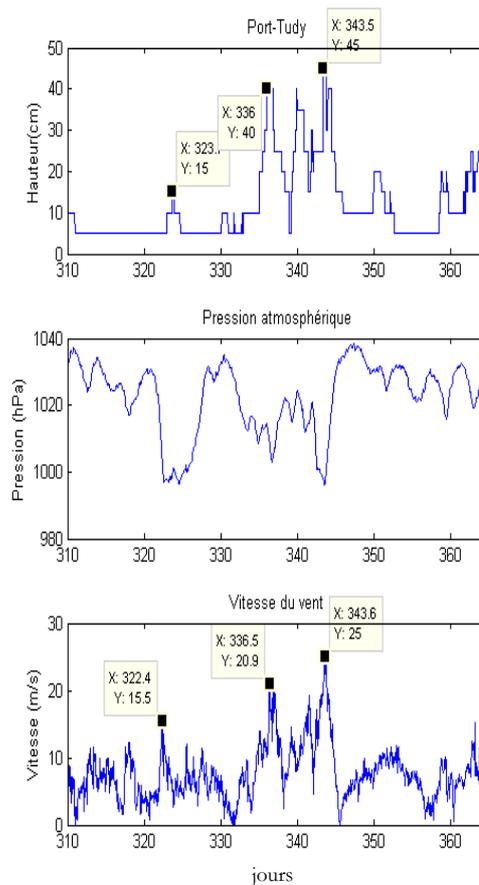


Figure 40: Du 6 novembre au 31 décembre 2007

- Le vent

Un examen rapide des graphes permet de noter une similarité entre la hauteur des seiches et la vitesse du vent. De nombreux pics de vent coïncident parfois avec des pics de seiche. Cependant il n'y a pas toujours simultanéité, et les vitesses de vent les plus élevées apparaissent certaines fois avant la hauteur maximale de seiche, et d'autres fois après. De plus, le 19 mars 2007 (jour 78), le vent dépasse les 20 m/s alors qu'il n'y a pas de formation de seiche.

Le coefficient de corrélation entre la hauteur de seiche et la vitesse de vent est de 0,32 pour la première période et de 0,61 pour la période.

La conclusion est que les vitesses de vent et les hauteurs de seiche fortes se produisent le plus souvent dans les mêmes périodes (analyse graphique). Cependant, les coefficients de corrélation ne sont pas très importants.

- **La pression atmosphérique**

Suite à l'examen des graphes, les seiches se produisent souvent après une chute de la pression atmosphérique. C'est le cas du 10 février (jour 41), la seiche a atteint 1 m et la pression a chuté de 40 hPa en 4 jours.

Cependant, ceci n'est pas systématique : seiche le 23 février (jour 54) d'amplitude comparable, sans que la pression n'ait connu de baisse significative. De plus, du 17 au 19 novembre (jours 320 à 322), la pression a baissé de 30 hPa sans apparition de seiche.

Ces éléments permettent de conclure que les variations de pression atmosphérique, considérées à une échelle horaire ne peuvent pas être le seul élément déclencheur des ondes de seiche.

4.2.2 Etude de la direction du vent

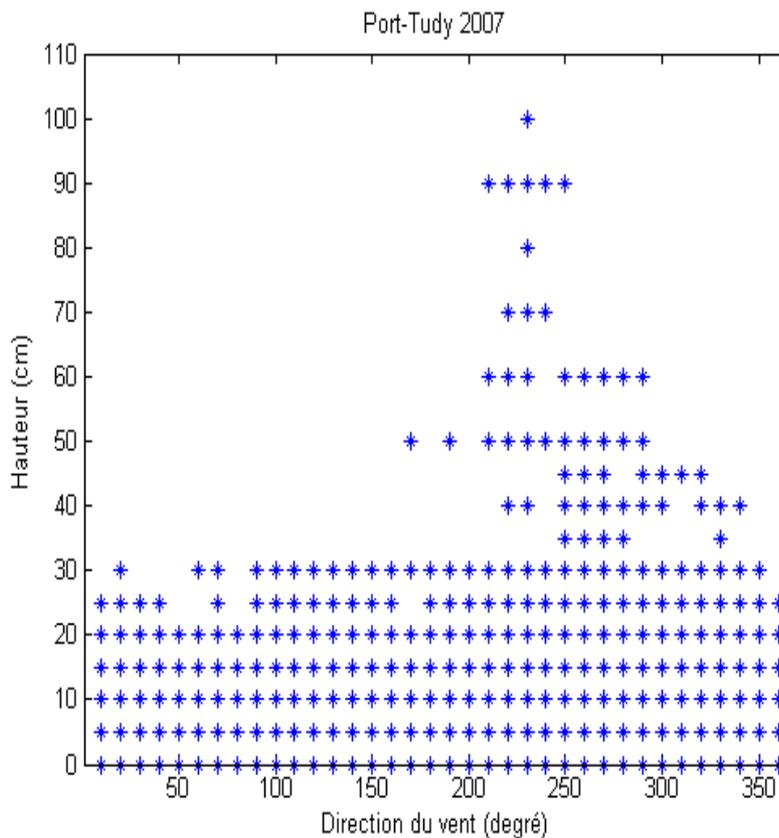


Figure 41: Hauteur des seiches en fonction de la direction vent

Les seiches de moins de 30cm peuvent se produire pour toutes les directions de vent. Mais pour les hauteurs de seiche supérieures, le secteur angulaire se rétrécit à mesure que l'amplitude croit. La direction privilégiée pour l'apparition des seiches est donc la direction 230° , c'est-à-dire sud-ouest.

4.3 Etude des données de houle

4.3.1 Port-Tudy

Les données de houle utilisées sont celles fournies par le modèle de houle SURFOUEST, développé par le SHOM.

Le modèle a donc été utilisé pour déterminer les données de houle pour l'année 2007, pour un point situé entre l'île de Groix et le continent (47.7° nord, -3.48° ouest).

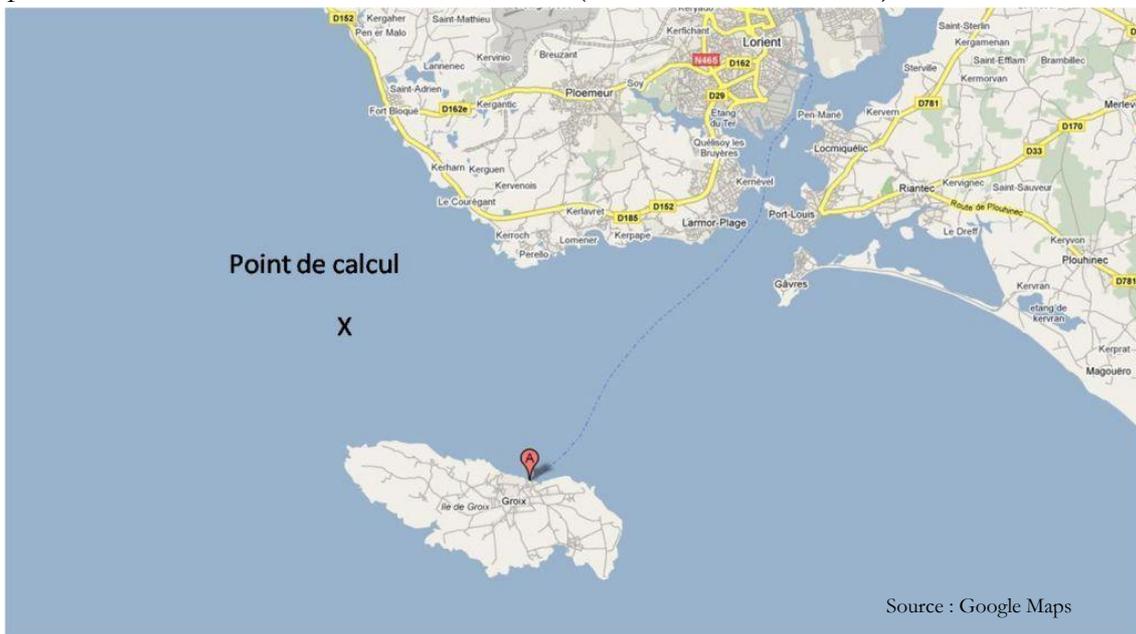


Figure 42: Position du point de calcul de houle:

Les paramètres qui ont été utilisés sont les suivants :

- H_s : hauteur significative des vagues, il s'agit de la hauteur moyenne du tiers des vagues les plus grosses,
- T_p : période de pic, c'est la période pour laquelle la fonction de densité spectrale est maximale. C'est environ la moyenne des périodes de 15 à 20 vagues bien formées.

4.3.1.1 Etude de la période de la houle

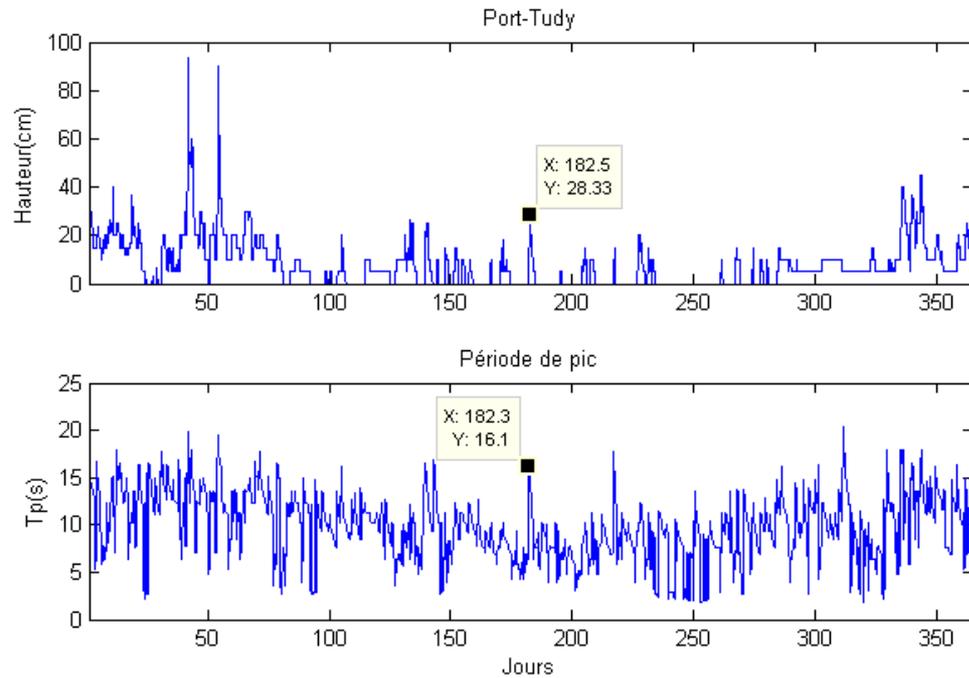


Figure 43: Comparaison hauteur de seiche et période de pic de la houle

De nombreux pics de période coïncident avec des pics de seiche, cependant on n'observe pas de correspondance systématique. Le coefficient de corrélation est de 0,53.

Mais un jour en particulier attire l'attention, il s'agit du 1^{er} juillet 2007 (jour 182). Ce jour présente une seiche relativement importante (40 cm) pendant la saison estivale. Il ne correspond pas à un événement remarquable pour le vent ni pour la pression atmosphérique, cependant la période de la houle est importante ce jour là. Les seiches tendent donc à apparaître lorsque la période de la houle est grande.

4.3.1.2 Prise en compte de la hauteur de la houle

Pour tenter de trouver un lien plus étroit, l'idée est de comparer les hauteurs de seiche avec le nombre $.Hs^2 \cdot T_p$. Ce nombre peut être vu comme un coefficient lié à l'énergie de la houle.

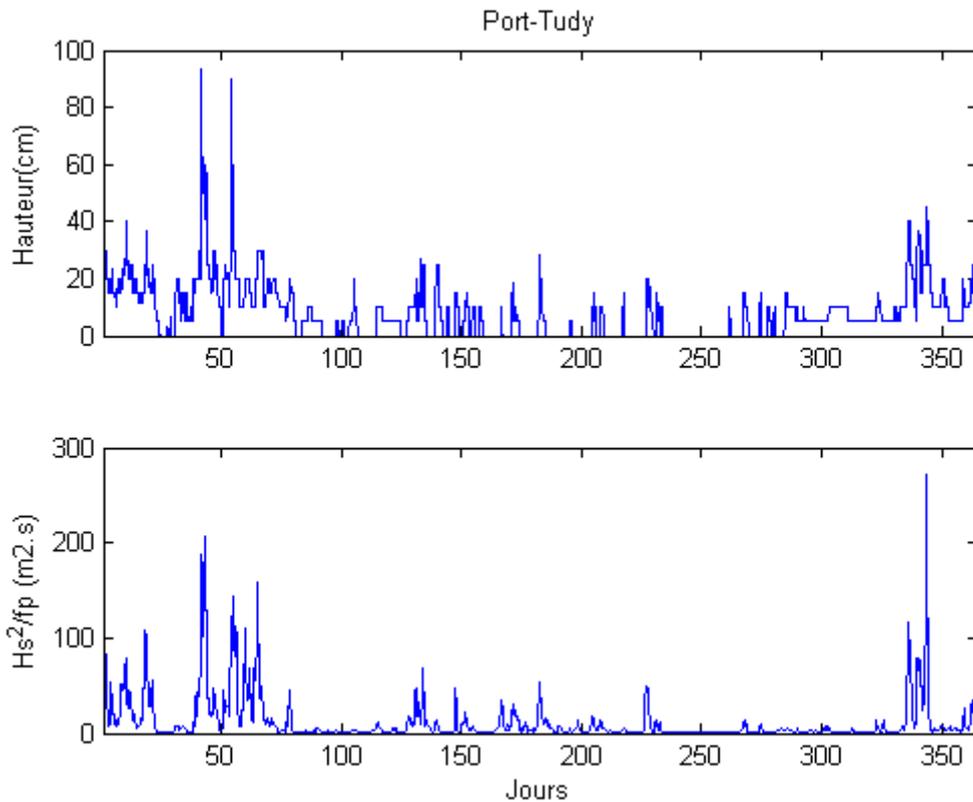


Figure 44: Comparaison hauteur de seiche et $H_s^2 \cdot T_p$.

La relation est cette fois très nette, les pics de seiches supérieurs à 20 cm ont pour la quasi-totalité d'entre eux des correspondances avec un pic pour le coefficient $H_s^2 \cdot T_p$.

Le coefficient de corrélation a une valeur de 0,78, alors que les coefficients de corrélation avec la force du vent et la pression atmosphérique n'étaient que de 0,39 et -0,19. (pour l'année complète).

4.3.1.3 Le Conquet

Afin de vérifier l'hypothèse du lien étroit entre les vagues et les seiches, la comparaison a cette fois été effectuée de la même manière pour Le Conquet.

Le point de mesure a été choisi à proximité de l'île d'Ouessant, à proximité donc du port étudié.

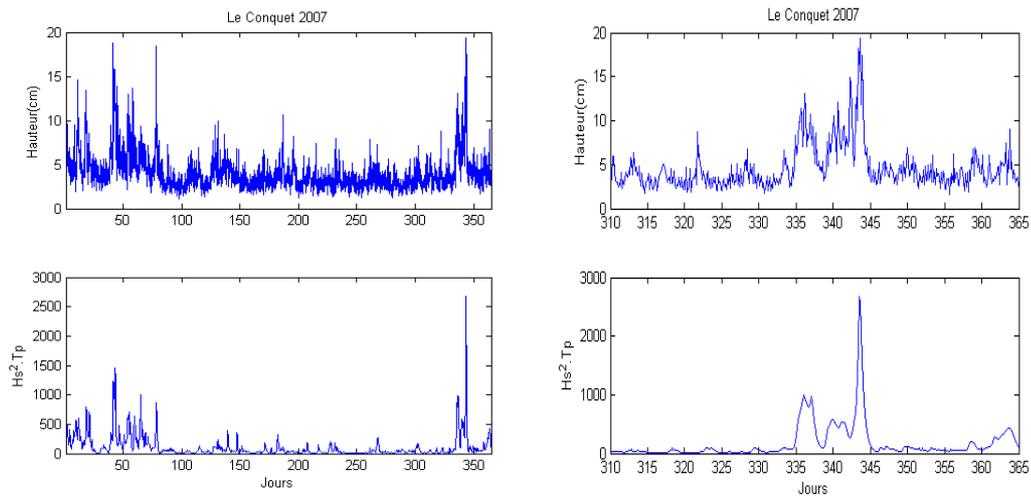


Figure 45: Corrélation $H_s^2 \cdot T_p$ et hauteur de seiche

Que ce soit pour l'année complète ou pour une période donnée (10 novembre-31 décembre), les similarités des graphes de seiche et du coefficient $H_s^2 \cdot T_p$ sont marquées. Le coefficient de corrélation pour l'année complète est de 0,72, et en considérant la période de seiche isolément (jours 310 à 365), le coefficient est de 0,81.

La corrélation entre la houle et les ondes de seiche est donc relativement importante, comme pour Port-Tudy.

4.3.2 La houle et les ondes infragravitaires

Formations des ondes longues liées aux trains de vague

Les ondes infra-gravitaires ont une période supérieure à 20s. Ces ondes longues aux interactions entre les trains de houle se propagent dans l'océan. Dans le cas de deux ondes monochromatiques, de périodes respectives f_1 et f_2 . Il peut alors y avoir formation d'ondes de fréquence f_1+f_2 , d'une part, et f_1-f_2 d'autre part. Si f_1 et f_2 sont proches, alors la nouvelle fréquence f_1-f_2 peut être très petite et correspondre à une onde infra-gravitaire.

La variation du niveau moyen provoquée par le passage successif des vagues du train forme une onde longue.

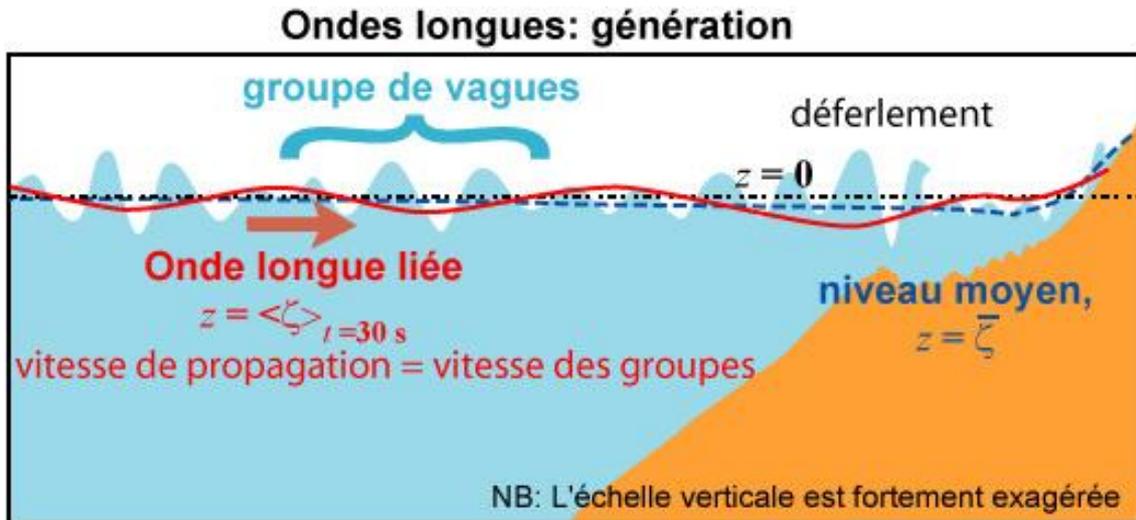


Figure 46: Onde longue liée à un train de vagues (Source: SHOM)

Distinction entre mer de vent et houle

La mer de vent est un système de vagues situé dans la zone même où souffle le vent qui l'a créée. En sortant de la zone d'action du vent, les vagues continuent de se propager librement pour former la houle. Ces deux systèmes se distinguent en particulier par leurs propriétés spectrales. La houle est constituée par des vagues de fréquences plus faibles que celles de la mer de vent. Son spectre est également plus étroit. Or, lors de l'interaction entre trains de vagues, la probabilité d'obtenir des ondes longues sera d'autant plus élevée que les fréquences des vagues seront proches. La houle est donc le système de vague privilégié pour la formation d'ondes longues liées aux trains de vague.

Et une valeur élevée de T_p est la caractéristique de la présence de houle. C'est pourquoi, dans les relevés de période de houle présentés ci-avant, une valeur élevée de T_p est le signe de la présence de houle

Libération des ondes longues

En arrivant sur la côte, la diminution de la profondeur provoque le déferlement des vagues. La dissipation de ces ondes libère alors les ondes longues. Celles-ci vont alors se propager suivant leurs propres caractéristiques. En fonction de la nature du milieu, elles peuvent alors se réfracter ou être réfléchies.

4.3.3 Conclusion

Il apparaît donc que les ondes longues amenées par la houle sont un des éléments déclencheurs des seiches à Port-Tudy et Le Conquet. Et d'après les observations de 4.1.5, il semble que cela soit le cas des ports de Brest et Cherbourg.

4.4 Retour sur Port-Tudy

La houle arrivant de l'océan atlantique présente des caractéristiques similaires sur de grands domaines. Les ondes de seiches touchant ces ports sont donc comparables. Or les seiches présentent des amplitudes bien plus élevées à Port-Tudy.

C'est donc la configuration locale qui doit jouer un rôle.

4.4.1 Période des bassins concernés

Fréquences propres du bassin situé entre l'île de Groix et le continent :



Figure 47: Largeur du bassin entre Groix et Lorient (A partir d'une carte Google Maps)

Par une approximation grossière, l'espace entre Groix et le continent (Courreaux de Groix) est assimilé à un bassin de profondeur homogène.

La formule établie par MERIAND donne alors la période des oscillations propres :

$$T = \frac{2 * L}{n * \sqrt{gh}}$$

L : Longueur du bassin

g : Accélération de la pesanteur

h : Profondeur moyenne

n : Nombre entier .

On prendra h=25m

Le calcul donne :

n=1 : T=10mn30

n=2 : T=5mn15

Or, une simulation réalisée avec le logiciel MARS 2D développé par l'IFREMER [10] a montré que le bassin réagissait fortement (amplification de 2,2) aux ondes de période 5mn. Cela confirme donc le calcul approximatif réalisé ci-dessus.

Enfin, les simulations effectuées sous REFONDE montrent que le bassin plus restreint du port a une période propre de 4,5mn. Ces deux bassins, en contact, présentent donc des fréquences propres très proches. Cela peut contribuer à l'amplification des amplitudes des ondes de seiche.

4.4.2 La houle

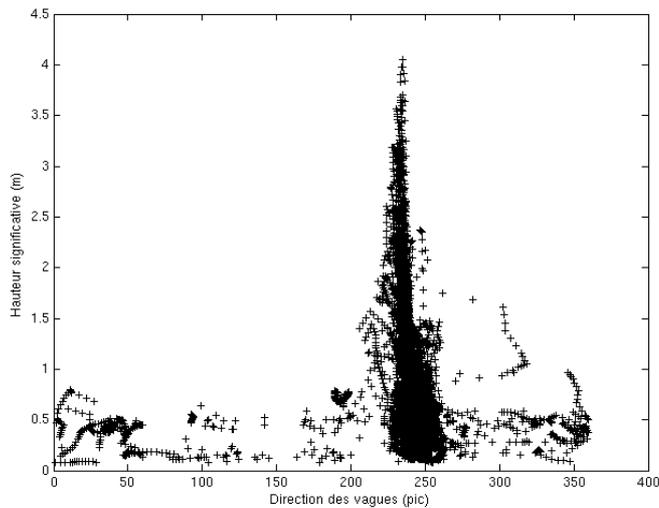


Figure 48: Direction de la houle à proximité de Groix en 2007 (Données SHOM)

Le graphe ci-dessus montre que la direction 230° (Sud-Ouest) est la direction privilégiée des vagues les plus grosses. La houle, à l'origine des seiches, provient donc principalement de cette direction.

Houle venant du S - W
Arrivant le 28 avril à 15 h
Caractéristiques au large :
Période significative : 11"
Hauteur significative : 1,53 m
Longueur d'onde : 189 m
Hauteur significative au point H
après réfraction : 1,20 m

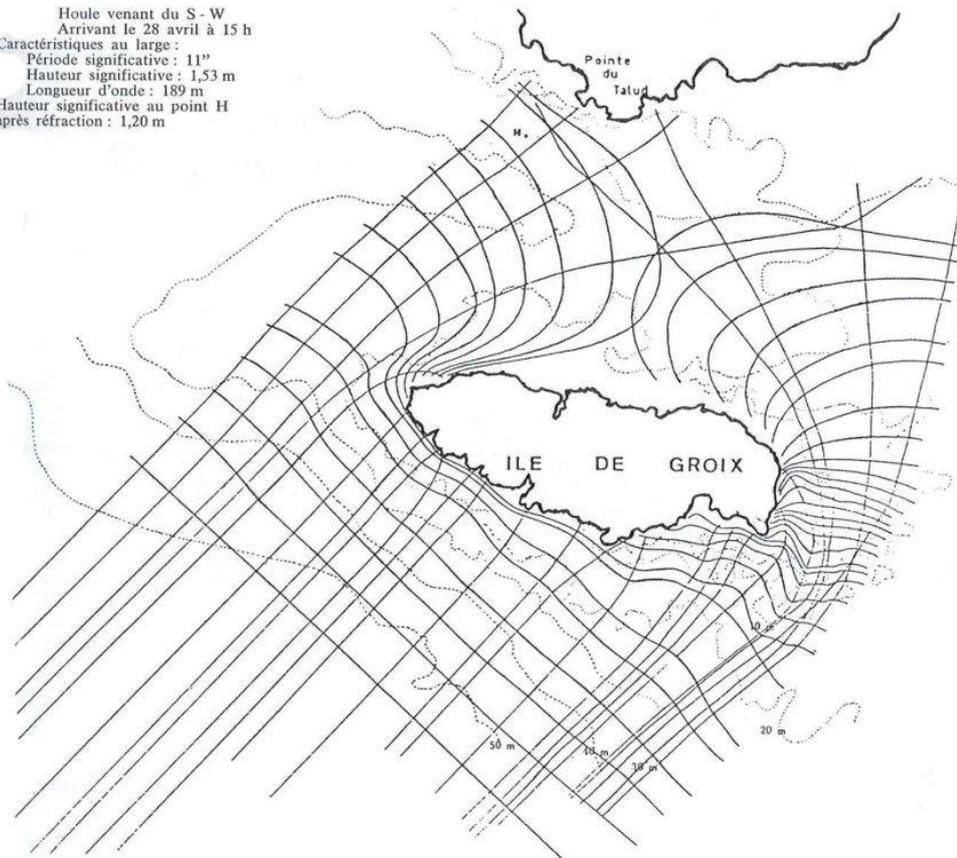


Figure 49: Plan de vagues (Source: Catalogue sédimentologique des côtes françaises)

Sous l'influence de la présence de l'île et de la remontée des fonds, la houle est réfractée. Les ondes passant de chaque côté de Groix ont une trajectoire déviée puis interagissent au niveau du bassin des Courreaux de Groix. Une étude approfondie de cette interaction pourrait montrer si elle contribue à augmenter l'excitation du bassin.

Le caractère exceptionnel de l'amplitude des seiches à Port-Tudy est dû à la configuration du site. La proximité des fréquences propres des Courreaux de Groix et du port contribue certainement à ce phénomène. L'influence de la réfraction particulière de la houle reste à démontrer.

CONCLUSION

Cette étude a montré que le logiciel NUNIEAU, développé par le CETE Méditerranée, permet non seulement de numériser les signaux de marée, mais qu'il est également adapté à la numérisation des seiches. Il permet d'obtenir un signal numérique à partir de données analogiques, y compris lorsque les oscillations sont de courtes périodes. Cela sera utilisable pour d'autres études en appliquant par exemple ce principe à l'exploitation de signaux de tsunami.

Les données issues de NUNIEAU d'une part, les données numériques fournies par les marégraphes numériques d'autre part, ont permis d'estimer les périodes des seiches des ports de Port-Tudy, Le Conquet, Brest, Cherbourg et Dieppe. Ces valeurs sont issues de différentes analyses :

- analyse graphique des marégrammes,
- analyse fréquentielle,
- exploitation du logiciel REFONDE, développé par le CETMEF.

Des valeurs du même ordre de grandeur ont été obtenues à l'aide du logiciel REFONDE, pour Port-Tudy et BREST. Il n'a toutefois pas été possible de retrouver la seiche de période supérieure à 1h observées lors de l'analyse fréquentielle. Une explication serait que celle-ci correspond à l'oscillation du plan d'eau formé par la rade de Brest, qui n'était pas modélisé dans REFONDE.

Les graphes présentant les hauteurs de seiche des ports proches de la frontière Atlantique-Manche présentant de fortes similarités.

Les données météorologiques de Port-Tudy n'ont pas permis de déterminer un lien direct entre les variations de pression atmosphérique et les seiches, même si certaines similitudes apparaissent. Le vent fort est fréquemment présent lors des épisodes de seiche, avec une tendance à être orienté au sud-ouest. Toutefois, l'absence de vent fort lors de la formation de certaines seiches, laisse penser que le vent ne peut pas être l'unique élément déclencheur.

Il apparaît que les seiches de Port-Tudy, Le Conquet et Brest sont dues principalement aux ondes infragravitaires liées aux trains de vagues, accompagnant l'arrivée de la houle longue formée au large. En considérant un paramètre faisant intervenir la hauteur significative de la houle ainsi que sa période de pic, le coefficient de corrélation avec la hauteur des seiches s'élève à 0,8. Ce paramètre montre la bonne corrélation entre la houle et les seiches. Il est très probable que ce raisonnement soit valable pour Cherbourg, même si le calcul n'a pas pu être effectué.

Enfin, une explication de l'exceptionnelle amplitude de la seiche de Port-Tudy pourrait être la double résonance induite par la présence de deux bassins (bassin Ile de Groix-Lorient et bassin portuaire de Port-Tudy) et la proximité de leurs fréquences propres.

RECOMMANDATIONS

Suite à cette étude, les recommandations suivantes sont préconisées :

- Mesures marégraphiques : il est conseillé d'opter pour une période d'acquisition des données inférieure à au moins cinq fois la période de la seiche. Au vu des périodes rencontrées dans cette étude, 1 minute semble être un compromis satisfaisant.
- Niveaux extrêmes : dans les cas où les seiches n'ont pas été enregistrées au niveau des marégraphes (filtrage), il est conseillé de rajouter une hauteur correspondant à l'amplitude de la seiche. La méthodologie pour calculer cette valeur est à définir (maximum annuel, moyenne annuel...).
- Sécurité de la navigation : les forts courants dus aux seiches pourraient être étudiés plus précisément. Des mesures de courants pourraient être spécifiées pour connaître plus précisément l'impact des seiches sur la navigation. L'analyse fréquentielle de ces courants doit permettre de retrouver le signal de seiche.
- Prévisions de seiches : l'information sur la fonction de transfert entre état de mer, données météorologiques et hauteur de seiche pourrait être affinée, ce qui pourrait conduire à la mise en place d'un système de prévision des seiches.

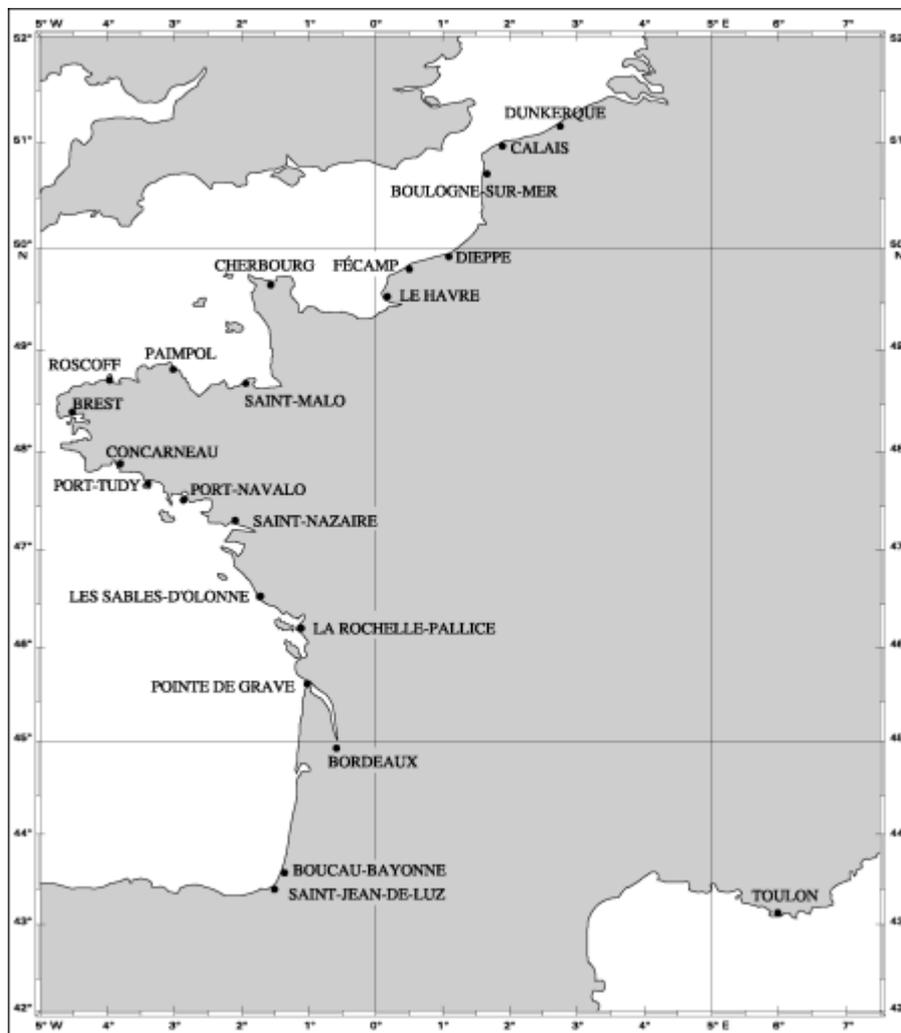
BIBLIOGRAPHIE

- [1] CRACOSKY P., 1979, *Les seiches*, Mémoire de Travail de Fin d'Etude au Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables.
- [2] Fatio de DUILLIER., 1742, *Seiches ou flux et reflux du lac de Genève*, Hist.Ac.Roy, Des Sciences, p. 26-31.
- [3] FOREL, *Le Lemman*, tome II
- [4] CHRYSTAL, 1903-1906, *On the hydrodynamical theory of seiches*, Proceeding of the Royal Society of Edimburg.
- [5] STERNECK, 1915, *Hydrodynamische theorie der halbtägigen gezeiten des Mittelmers*, Sitz.K.Akad.Wiss.Wien.Marh.Natur.K1, V 129, Vienne.
- [6] GIESE G. S., CHAPMAN D. C., BLACK P. G. and FORNSHELL J. A., 1990, *Causation of Large-Amplitude Coastal Seiches on the Caribbean Coast of Puerto Rico*, American Meteorological Society, p. 1449-1458.
- [7] DE JONG M., 2004, *Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbor basins*, Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Tecnology.119p.
- [8] CANDELA J., SALVATORE MAZZOLA, CHERIF, SAMMARI, LIMEBURNER R., LOZANO C. J., PATTI B. and BONNANO A., 2003, *The "Mad Sea" Pheomenon in the Strait of Sicily*, Journal of Physical Oceanography, p. 2210-2230.
- [9] PONS F., SERGENT P., LAMBERT A., 2008, *Calcul des seiches à partir du logiciel REFONDE*, Xème Journées Nationales Génie Côtier 14-16 octobre 2008 Sophia Antipolis, 10p.
- [10] FLEITOUR J.B., 2004, *Etude relative aux phénomènes de seiche à Port-Tudy (Groix)*, Mémoire de stage ENSIETA, Conseil Général du Morbihan, 98p.
- [11] GOMI P., 1998, *Les seiches*, Mémoire de Travail de Fin d'Etude au Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables, 85p.
- [12] MERCER D., SHENG J., GREATBATCH R. J., BONANOVIC J., 2002, *Barotropic waves generated by storms moving rapidly over shallow water*, Journal of Geophysical Research, Vol.107, part 16, p.1-17.
- [13] HIBYA T., KAJIURA K., 1982, *Origin of the Abiki Phenomenon (a kind of Seiche) in Nagasaki Bay*, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol. 38, p. 172-182.

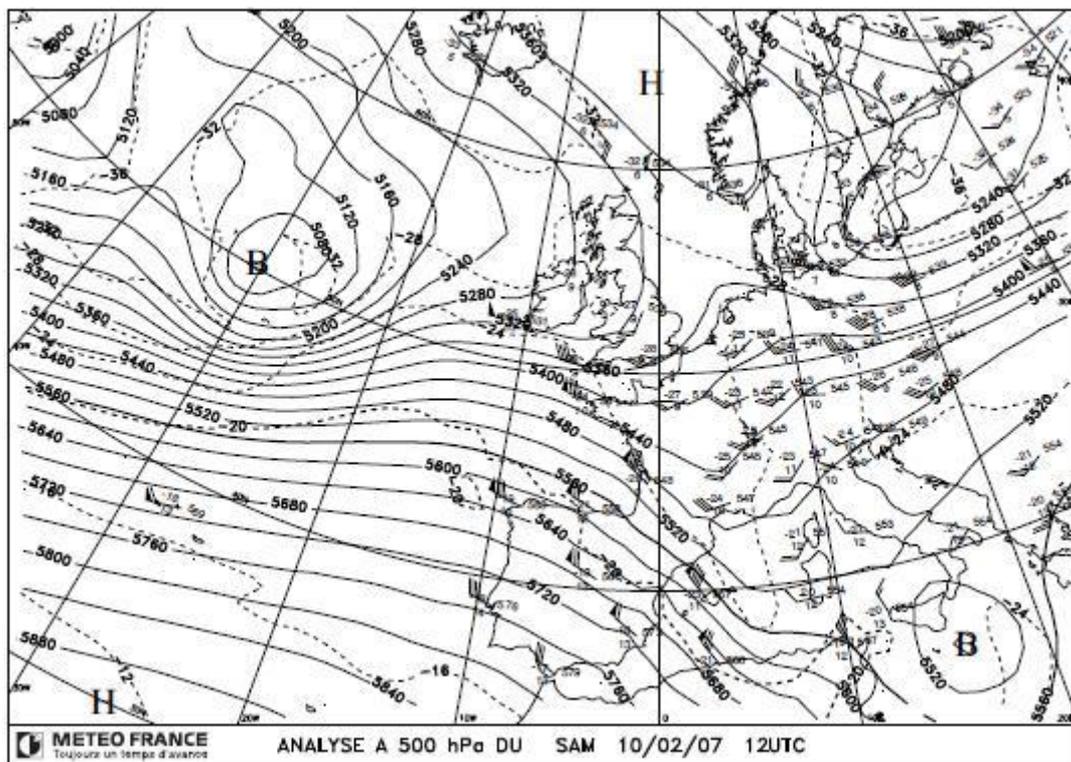
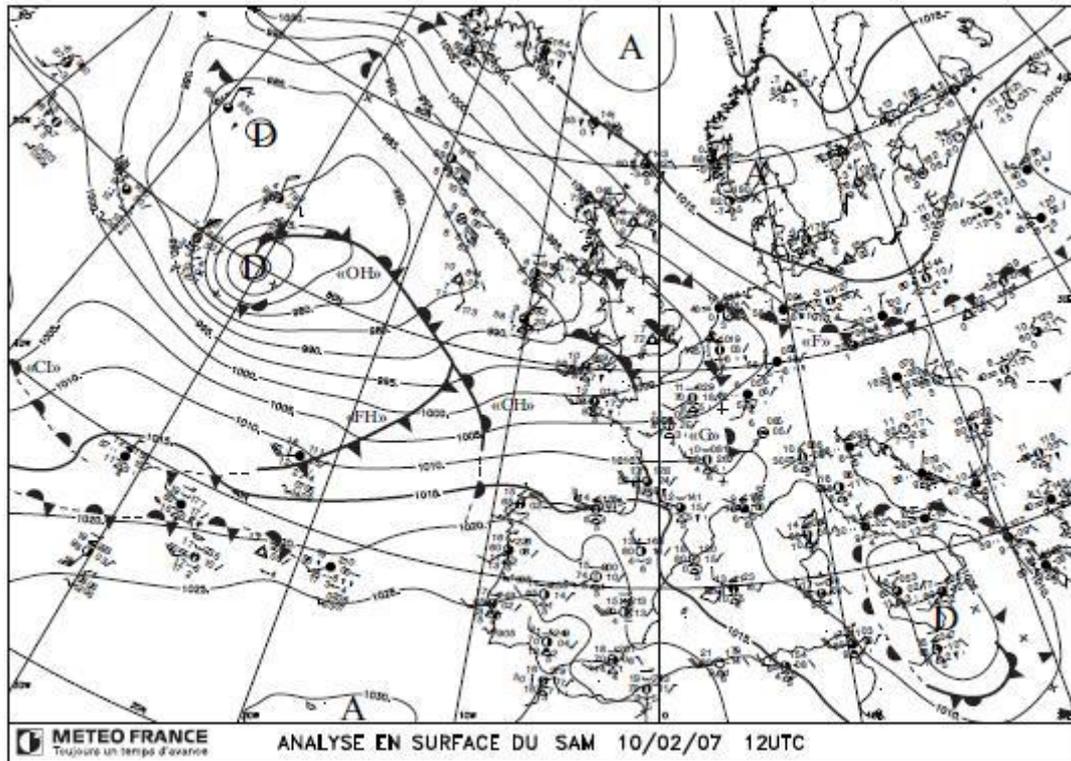
- [14] VILIBIC I., DOMIJAN N., CUPIC S., 2005, *Wind versus air pressure seiche triggering in the Middle Adriatic coastal waters*, Journal of Marine Systems 57, p.189-200.
- [15] GOMIS D., MONSERRAT S. and TINTORE J., 1993, *Pressure-Forced Seiches of Large Amplitude in Inlets of the Balearic Islands*, Journal of Geophysical Research, Vol 98, NO.C8, p. 14,347-14,445.
- [16] ICHYIE T. and DOWLING George B., 1960, *A note on the seiches of Alligator Harbor, Florida*, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol. 16, N°3, p.117-127.
- [17] RABINOVICH A. B. and MONTSERRAT S., 1998, *Generation of Meteorological Tsunamis (Large Amplitude Seiches) Near the Balearic and KURIL Islands*, Natural Hazards 18., p.27-55.
- [18] HERBERS T. H. C., EDGAR S., GUZA R.T. and O'REILLY W.C., 1995, *Infragravity frequencies (0.005-0.05), Motions of the Shelf. Part II. Free Waves*, Journal of Physical Oceanography, Vol 25, p. 1063-1079.
- [19] EVANGELIDIS D. A., *Infragravity waves on the continental shelf*, Master Thesis, Naval Postgraduate School Monterey, California.
- [20] OKIHIRO M., GUZA R. T., SEYMOUR R. J., 1993, *Excitation of Seiches Observed in a Small Harbor*, Journal of geophysical research, Vol.98, NO. C10, p18, 201-18,211.
- [21] de LESTANG PARADE et al. , 2009, *Etude des seiches dans la rade de Toulon*, ISITV.

ANNEXES

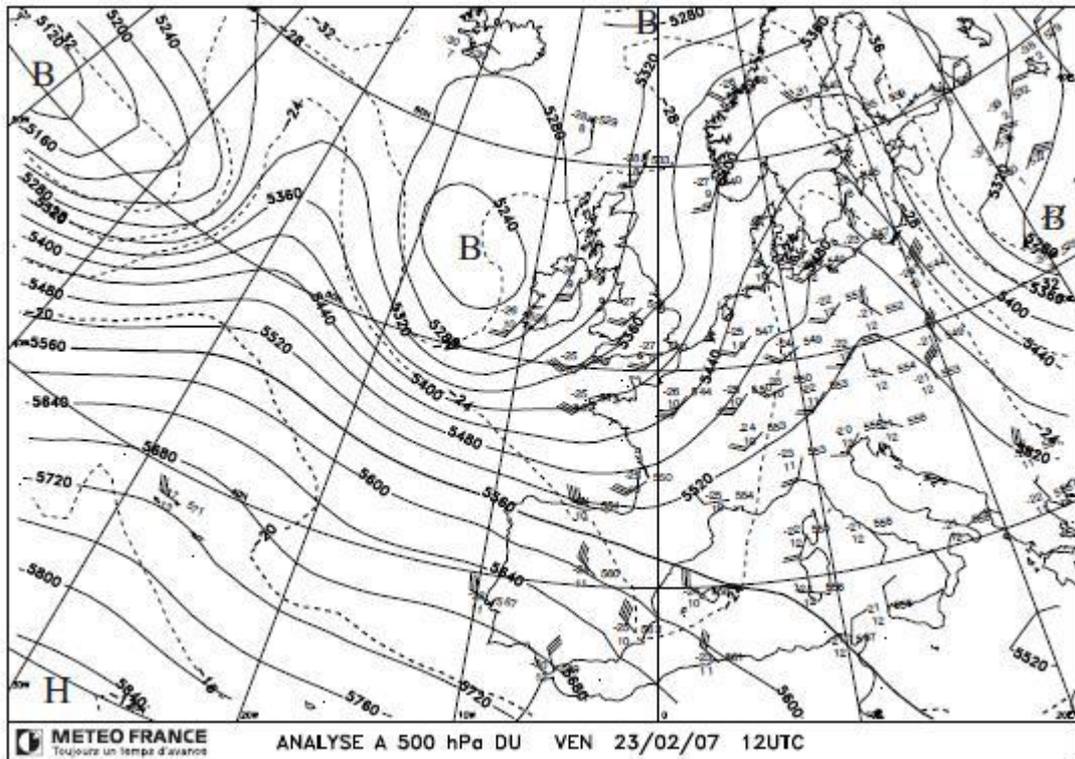
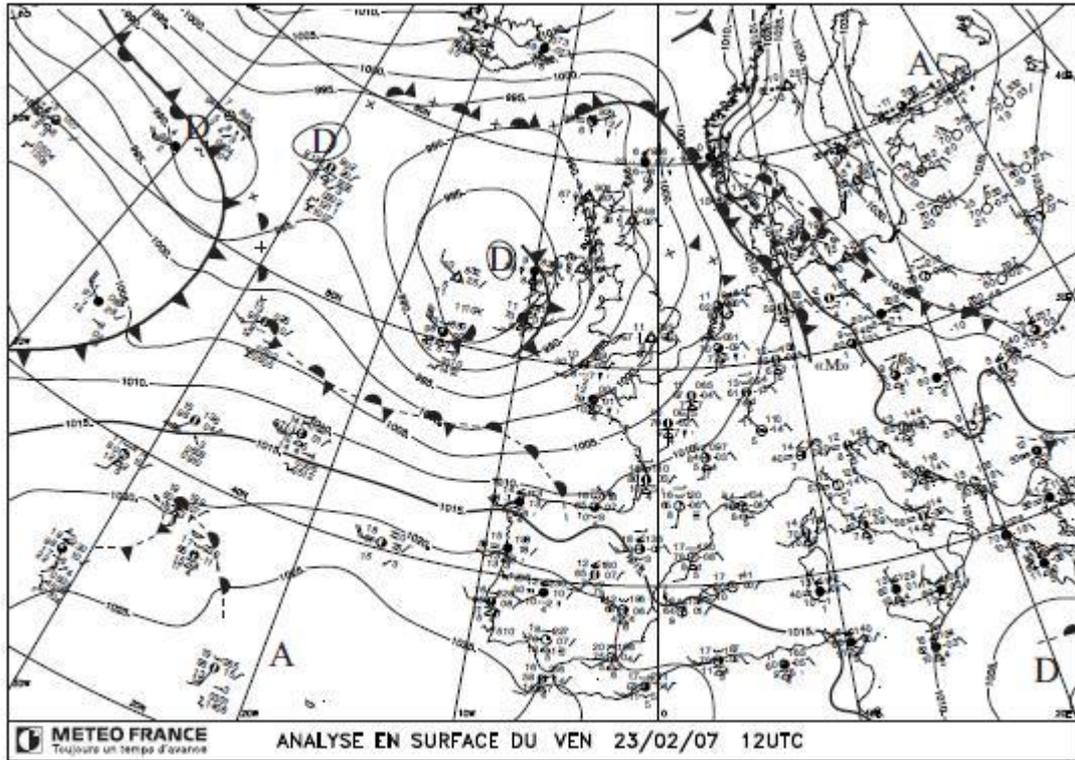
ANNEXE A : PRINCIPAUX PORTS DE L'ANNUAIRE DES MAREES 2005 (SHOM)



ANNEXE B : Situation météo du 10 février 2007



ANNEXE C : Situation météo du 23 février 2007



ANNEXE D : ROSE DES VENTS



ROSE DES VENTS

Vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 10 mn

de DÉCEMBRE 2006 à FÉVRIER 2007

ILE DE GROIX (56)

Indicatif : 56069001, alt : 41 m., lat : 47°39'06"N, lon : 03°30'06"W

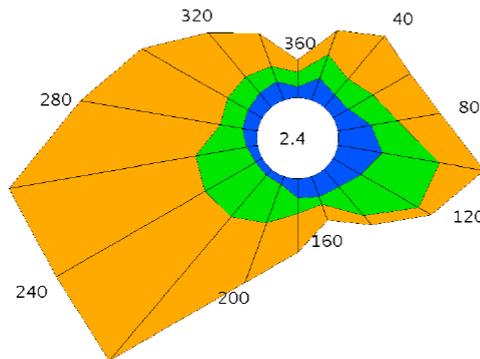
Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs horaires entre 0h00 et 23h00, heure UTC

Tableau de répartition

Nombre de cas étudiés : 2904

Manquants : 0

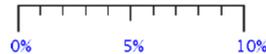


Dir.	[2.9;8.7 [[8.7;15.5 [> 15.5 kts	Total
20	1.1	1.1	1.2	3.3
40	0.7	0.9	2.5	4.2
60	0.8	1.2	1.9	3.9
80	1.5	1.2	1.9	4.6
100	2.0	2.6	2.0	6.6
120	1.4	3.0	0.6	5.0
140	1.0	1.7	0.6	3.3
160	1.0	0.4	0.7	2.1
180	0.9	0.7	1.7	3.3
200	0.4	1.9	2.8	5.1
220	0.4	2.4	8.4	11.2
240	0.3	2.6	7.6	10.5
260	0.5	2.3	8.4	11.2
280	0.7	1.0	6.3	8.0
300	0.7	1.1	4.4	6.2
320	0.8	0.9	2.6	4.3
340	0.9	0.7	1.6	3.2
360	0.5	0.7	0.5	1.7
Total	15.6	26.2	55.8	97.6
[0;2.9 [2.4

Groupes de vitesses (kts)



Pourcentage par direction



Dir. : Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° = Est, 180° = Sud, 270° = Ouest, 360° = Nord

Page 1/1

Edité le : 25/05/2009 dans l'état de la base

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Direction de la Production
42 avenue Gustave Coriolis 31057 Toulouse Cedex
Fax : 05 61 07 80 79 – Email : climatheque@meteo.fr