



LEGOS
14, avenue Edouard-Belin
31400 Toulouse



Nelly ROUSSEAU

Master 2R Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales
2007-2008

A photograph of a coastal landscape. In the foreground, there are dark, mossy rocks. A white metal structure, likely a measurement station, is built on the rocks. The water is a deep blue, and in the background, there is a large, flat-topped mountain or plateau under a clear blue sky.

*Tendance actuelle du niveau marin dans
les TAAF
Les appareils de mesures et leurs erreurs*

Maître de stage : Laurent TESTUT, Physicien adjoint

Stage de février à juin 2008 effectué au LEGOS à Toulouse



Photo de première page : Le marégraphe de Saint-Paul

Extraite du site :

http://www.legos.obs-mip.fr/fr/observations/rosame/reseau/saint_paul/

Remerciements

Avant tout chose, je tiens à remercier Laurent pour sa disponibilité, Philippe Téchiné pour la rapidité avec laquelle il m'a donné les données, ainsi que Florence Birol et Mathilde Cancet pour l'extraction des données altimétriques et le programme de corrélation trace/marégraphe, Belen Martin-Miguez pour l'envoi de son article, Claire Maraldi pour la carte de la bathymétrie de la région de Kerguelen/Saint-Paul, ainsi que toutes les autres personnes que j'oublie qui m'ont aidé pendant ce stage.

Résumé

L'objectif de ce stage a été dans un premier temps de caractériser et valider les appareils de mesures du niveau marin et dans un second temps d'évaluer l'évolution actuelle du niveau marin dans les TAAF et plus particulièrement aux îles Kerguelen et Saint-Paul. La caractérisation des appareils de mesure a permis de montrer l'importance de la forme du puits de tranquillisation dans l'incertitude sur les mesures à l'échelle de marée. De même, je montre que les capteurs de pression dérivent et que cela peut avoir une forte influence sur la tendance du niveau marin que l'on peut calculer. La seconde étape a été l'évaluation de l'évolution actuelle du niveau marin à travers deux outils de mesures : les marégraphe et l'altimétrie. Ces deux méthodes ont permis de montrer que marégraphe et altimétrie enregistrent une très faible augmentation du niveau marin entre 0 et 2 mm/an.

Mots-clés :

Marégraphe, radar, échelle de marée, dérive instrumentale

Note

Toutes les figures contenues dans ce rapport ont été réalisées dans le cadre de ce stage (sauf mention contraire).

Table des matières

I. INTRODUCTION	2
A. PETIT HISTORIQUE	2
B. AUJOURD'HUI	2
C. LES AVANCEES SCIENTIFIQUES	2
D. HISTORIQUE DES DONNEES DANS LES TAAF	3
1. CHRONOGRAMMES DE KERGUELEN	3
2. CHRONOGRAMME DE LA TERRE ADELIE	4
II. OUTILS MATHEMATIQUES	5
A. MOYENNE, VARIANCE, ... D'APRES EMERY W. ET THOMSON R [2]	5
1. LES DONNEES INSTANTANEEES	5
2. LES DONNEES MOYENNES	6
B. PROPAGATION DE L'ERREUR D'APRES PRESS W. H. ET AL. [4]	6
C. LE TEST DE VAN DE CASTEELE D'APRES MARTIN MIGUEZ B. ET AL. [6]	7
III. VALIDATION DES LECTURES A L'ECHELLE DE MAREE	8
A. LES DONNEES BRUTES	8
B. QUALITE LIEE AUX CONDITIONS DE MESURES	10
C. QUALITE LIEE AU PUIITS	10
D. LES TRAITEMENTS	12
E. RESULTATS	13
IV. CALCUL DES DERIVES DES MAREGRAPHES	14
A. LES CAPTEURS DE PRESSION	14
1. DONNEES BRUTES	14
2. LES TRAITEMENTS	16
3. RESULTATS	17
B. LES RADARS	18
1. LES DONNEES BRUTES	18
2. LES TRAITEMENTS	19
3. RESULTATS	19
V. ALTIMETRIE	19
A. PREPARATION DES DONNEES ALTIMETRIQUES	20
B. CORRELATION MAREGRAPHE / ALTIMETRIE	21
C. TENDANCE DU MAREGRAPHE ET TENDANCE ALTIMETRIQUE	22
D. RESULTATS	24
VI. DISCUSSION	25
VII. CONCLUSION	26
VIII. BIBLIOGRAPHIE	26
IX. ANNEXES	27

I. Introduction

A. Petit historique

L'intérêt pour la marée a été progressif, la mesure de celle-ci a d'abord permis l'établissement de cartes précises de la bathymétrie des fonds marins peu profond. En effet, à cette époque, la bathymétrie est mesurée à partir de sonde depuis la surface de l'eau. Afin que toutes les mesures aient une même référence, il fallait retirer une certaine valeur en fonction de la marée par rapport à un point de référence généralement fixé dans un port. Ensuite, avec les connaissances plus approfondies en astronomie, il devint intéressant de calculer les harmoniques de la marée de chaque région. Ce sont ces harmoniques qui permettent aujourd'hui de prédire la marée avec plusieurs années d'avance. A l'époque des premières mesures du niveau de la mer, celles-ci se faisaient par lecture sur une échelle de marée, la précision était donc plus ou moins grande selon l'état de la mer, de la visibilité : les échelles étaient parfois relativement loin et n'étaient visibles qu'à la longue vue, de plus la précision de l'échelle varie d'une échelle à l'autre avec une graduation allant du cm au dm.

B. Aujourd'hui

Depuis 1840 environ, ce sont les marégraphes qui mesurent le niveau de la mer. On a d'abord utilisé des marégraphes analogiques, c'est-à-dire les marégraphes à flotteur qui sont plongés dans un puits de tranquillisation qui les place à l'abri de la houle et du clapot. Les flotteurs oscillent en fonction des marées et par un savant jeu de poulies permettent une mesure sur un rouleau de papier déroulant en fonction du temps. Cela permet une régularité et une plus grande précision des mesures. Cependant ce système nécessite la présence d'observateurs qui vont faire des lectures simultanées à l'échelle de marée et sur le marégramme afin de pouvoir annoter ce dernier et conserver une trace de l'échelle spatiale et temporelle sur la feuille. Depuis avec l'arrivée de l'ère du numérique, les marégraphes sont numériques et réalisent automatiquement des mesures selon un pas de temps déterminé et enregistrent les données puis les envoient par satellite. Ce sont ces mesures que l'on cherche à calibrer ici, l'objectif est de déterminer la dérive de la mesure au marégraphe grâce aux lectures réalisées en même temps à l'échelle de marée qui va servir d'étalon, en associant celle-ci aux calibrations du marégraphe faites avant la mise à l'eau et après la sortie de l'eau.

C. Les avancées scientifiques

Depuis quelques années, beaucoup de publications ont pour sujet l'évolution du niveau marin. La plupart d'entre elle utilise les données marégraphiques. On trouve ainsi des auteurs comme Mitchum et al. [7] et Woodworth et al. (2005) [8] qui allient les données mesurées par les marégraphes et par les altimètres des satellites pour estimer l'augmentation du niveau marin. Ils se servent des marégraphes pour calibrer les satellites. Cela signifie qu'il considère que les marégraphes ne dérivent pas ou que la dérive est suffisamment faible pour ne pas être prise en compte. Mais est-ce vraiment le cas ? Wöppelmann et al. (2006) [9], Pouvreau et al. (2006) [3] et Church et al. (2006) [1] ont recours aux archives et aux données actuelles pour déterminer l'évolution de la marée ainsi que celle d'une onde semi-diurne. Pour les données actuelles, ils utilisent les données d'un marégraphe. Là encore, on peut se poser la question de la dérive de cet appareil. Quel en est l'importance de cette dérive : peut-elle influencer ou non l'évolution que l'on va observer ? L'objectif de cette étude est donc de quantifier la dérive des marégraphes. Et de la qualifier : doit-on la prendre en compte. Est-elle propre à chaque marégraphe ? Est-elle influencée par l'environnement dans lequel se situe le marégraphe ?

Pour cela, je me suis servie des marégraphes qui constituent le réseau ROSAME (Réseau d'Observation Subantarctique et Antarctique du niveau de la MEr). Ce réseau a été créé au début des années 1990 par Christian Le Provost, il regroupe quatre bases scientifiques faisant parties des TAAF (Terres Australes et Antarctiques Françaises _ cf. Figure ci-contre, extraite du site nommé ci-dessous) : Kerguelen, Crozet, Saint-Paul et Dumont D'Urville dont on peut voir les données marégraphiques en temps réel sur le site du LEGOS (Laboratoire d'Etude en Géophysique et Océanographie Spatiale) :

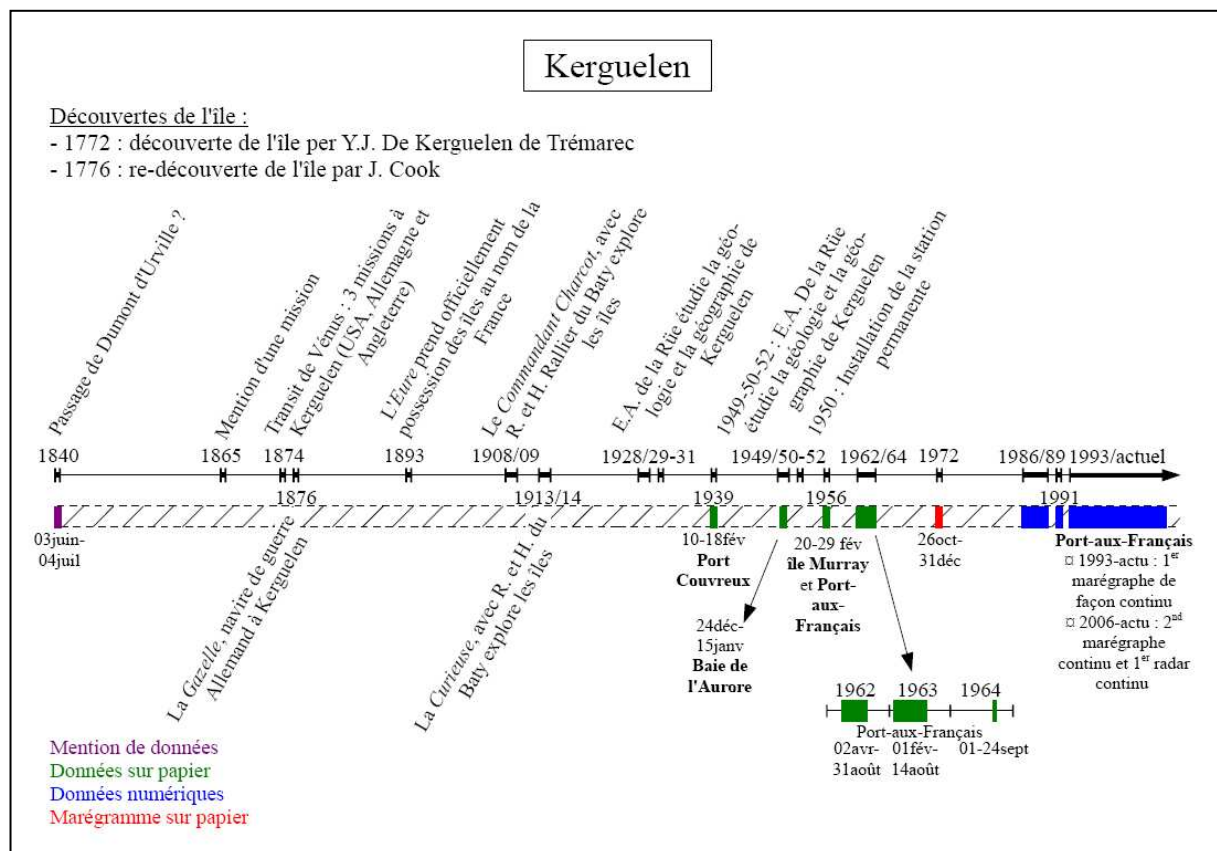


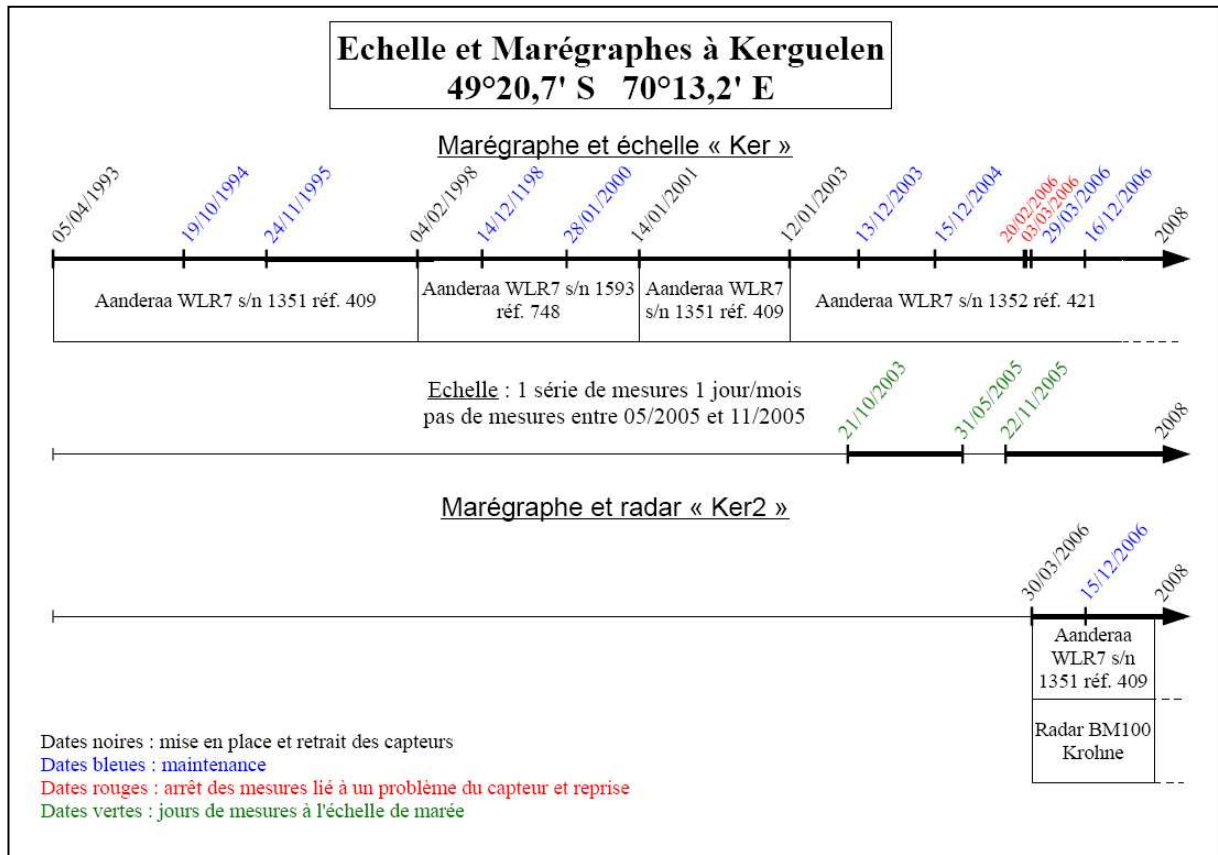
<http://www.legos.obs-mip.fr/fr/observations/rosame/>. La base de Kerguelen est une base occupée à l'année et en parallèle des mesures réalisées pas les 2 marégraphes et un radar, des mesures à l'échelle de marée sont réalisées par une équipe de volontaires à l'aide technique (VAT).

D. Historique des données dans les TAAF

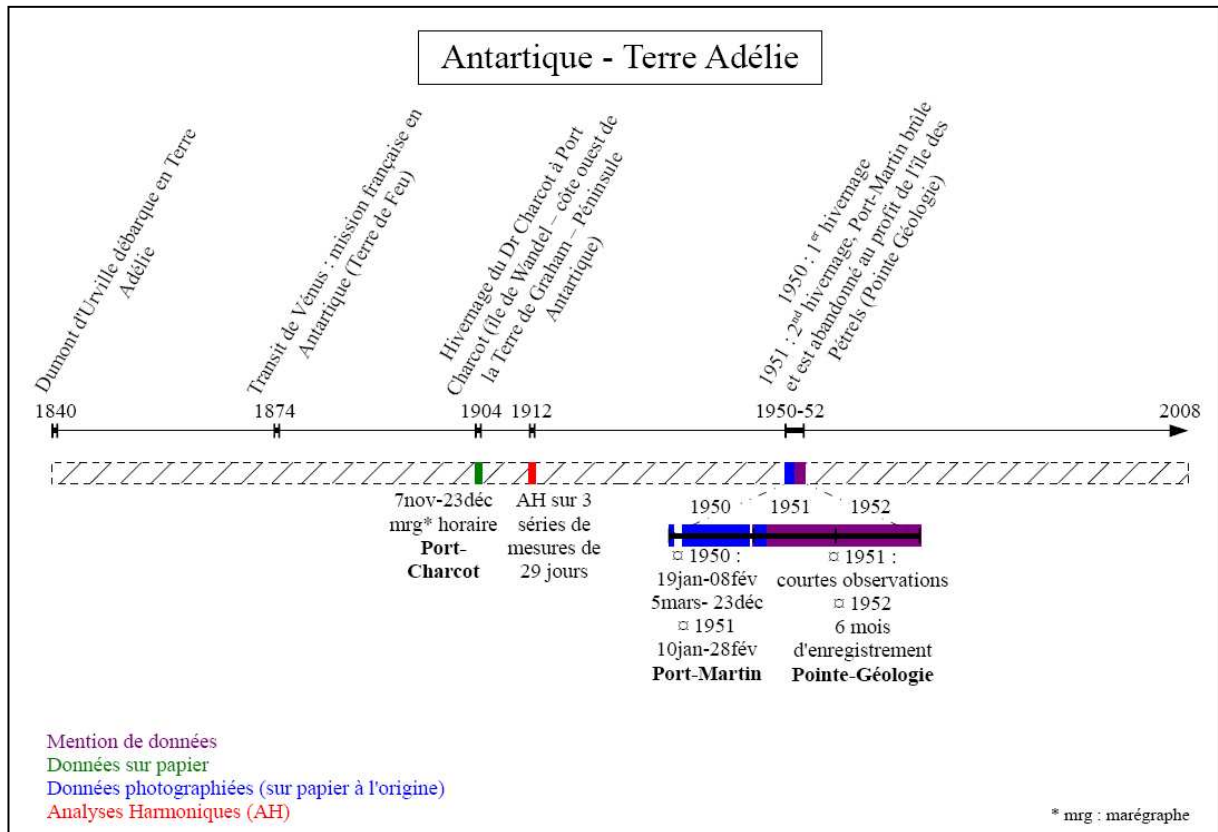
La première étape de mon stage fut de retracer l'historique des missions à Kerguelen et en Terre Adélie afin de découvrir les données les plus anciennes qui permettront par la suite de retracer l'évolution du niveau marin depuis ces époques jusqu'à aujourd'hui. Ce travail de reconstruction de l'évolution du niveau marin n'a pu être fait dans le cadre de ce stage.

1. Chronogrammes de Kerguelen





2. Chronogramme de la Terre Adélie



II. Outils mathématiques

A. Moyenne, variance, ... d'après Emery W. et Thomson R [2]

1. Les données instantanées

Les données étudiées sont regroupées par échantillons de N mesures supposées indépendantes, x . Par conséquent, elles suivent la loi de distribution normale ou Gaussienne. La moyenne de l'échantillon de N données x_1, x_2, \dots, x_N est :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{A.1})$$

La moyenne de l'échantillon est une estimation non biaisée de la moyenne réelle de la population, μ . La moyenne de l'échantillon localise le centre de masse de la distribution des données tel que :

$$\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) = 0 \quad (\text{A.2})$$

C'est-à-dire que la moyenne de l'échantillon divise les données de telle manière qu'il y ait autant de « poids » négatifs et positifs, $x' = x_i - \bar{x}$, autour de la valeur moyenne, \bar{x} .

La moyenne de l'échantillon donne le centre de masse de la distribution des données mais pas sa largeur. Pour déterminer comment les données s'étendent autour de la moyenne, nous avons besoin d'une mesure de la variabilité de l'échantillon : sa variance. Pour les données utilisées en (A.1), la variance de l'échantillon est la moyenne du carré de la déviation de l'échantillon par rapport à la moyenne de l'échantillon :

$$s'^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{A.3})$$

La déviation standard de l'échantillon (ou écart-type instantané), $s' = \sqrt{s'^2}$, la racine carrée positive de (A.3), est une mesure de la différence typique d'une valeur donnée par rapport à la valeur moyenne de tous les points donnés. En général, ceci diffère de la variance réelle de la population, σ^2 , et de l'écart-type de la population, σ . Comme défini par (A.3), la variance de l'échantillon est une estimation biaisée de la variance réelle de la population. Une estimation non biaisée de la variance de la population est obtenue à partir de :

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{A.4a})$$

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^N (x_i)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right] \quad (\text{A.4b})$$

où le dénominateur $N - 1$ exprime le fait que nous avons besoin d'au moins deux valeurs pour définir la variance d'un échantillon, s^2 , et son écart-type, s . L'utilisation de l'estimation s à la place de s' est souvent débattue par les océanographes, bien qu'il doive être noté que la différence entre les deux valeurs diminue avec l'augmentation de la taille de l'échantillon. La différence est significative uniquement pour les petits échantillons ($N < 30$). Parce que s' a une erreur carrée moyenne plus petite que s et que s est une estimation non biaisée quand la moyenne de la population est connue a priori, nous recommandons d'utiliser (A.4b).

Les données que l'on va utilisées ici sont considérées comme ayant une distribution de population normale (ou Gaussienne), cela signifie que l'on peut suivre la règle générale empirique pour les données :

$\mu \pm \sigma$ couvre approximativement 68% des mesures ;
 $\mu \pm 2\sigma$ couvre approximativement 95% des mesures ;
 $\mu \pm 3\sigma$ couvre approximativement la plupart (99%) des mesures ;

2. Les données moyennes

Si l'on prend non plus les données instantanées mais les données moyennes, on obtient pour la moyenne des données :

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{x}_i = \mu \quad (\text{A.5})$$

Avec μ la moyenne exacte.

Pour la variance, on obtient :

$$\begin{aligned}
 s'^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\bar{x}_i - \bar{\bar{x}} \right]^2 \\
 s'^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - \mu \right]^2 \\
 s'^2 &= \frac{1}{N} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i - \mu]^2 \\
 s'^2 &= \frac{s_{inst}^2}{N} \quad (\text{A.6})
 \end{aligned}$$

La variance des données moyennes est donc celle des données instantanées divisées par le nombre de valeur. De la même manière, on obtient $s^2 = s_{inst}^2/N$. l'écart-type à la moyenne est donc : $\sigma_{moy} = \sigma_{inst}/\sqrt{N}$.

B. Propagation de l'erreur d'après Press W. H. et al. [4]

Nous considérons le problème de l'adaptation d'un jeu de N points de données (x_i, y_i) en une modélisation d'une ligne droite :

$$y(x) = y(x ; a, b) = a + bx \quad (\text{B.1})$$

Ce problème est souvent nommé *régression linéaire*. Nous supposons que l'incertitude σ_i associée à chaque mesure y_i est connue, et que les données x_i sont connues sans erreur.

Pour mesurer l'accord du modèle avec les données, nous utilisons la fonction du χ^2 (B.2) qui est dans ce cas :

$$\chi^2(a,b) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - a - b \cdot x_i}{\sigma_i} \right]^2 \quad (\text{B.2})$$

Si la mesure de l'erreur est distribuée normalement, alors la fonction χ^2 donne la meilleur précision dans l'estimation des paramètres a et b ; si l'erreur n'est pas distribuée normalement, alors l'estimation n'a pas la précision maximum, mais peut toujours être utile dans un sens pratique.

L'équation (B.2) est minimisée pour déterminer a et b. A ce minimum, les dérivées de χ^2 en a et b s'annulent.

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{\partial \chi^2}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - a - b \cdot x_i}{\sigma_i^2} \right] \\
 0 &= \frac{\partial \chi^2}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i \cdot (y_i - a - b \cdot x_i)}{\sigma_i^2} \right] \quad (\text{B.3})
 \end{aligned}$$

Ces conditions peuvent être réécrites sous une forme plus pratique si nous définissons les sommes suivantes :

$$\begin{aligned}
S &\equiv \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} & S_x &\equiv \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2} & S_y &\equiv \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\sigma_i^2} \\
S_{xx} &\equiv \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} & S_{xy} &\equiv \sum_{i=1}^N \frac{x_i \cdot y_i}{\sigma_i^2}
\end{aligned} \tag{B.4}$$

Avec ces définitions (B.3) devient :

$$\begin{aligned}
a \cdot S + b \cdot S_x &= S_y \\
a \cdot S_x + b \cdot S_{xx} &= S_{xy}
\end{aligned} \tag{B.5}$$

La solution de ces deux équations à deux inconnues est calculée comme :

$$\begin{aligned}
a &= \frac{S_{xx} \cdot S_y - S_x \cdot S_{xy}}{\Delta} \\
b &= \frac{S \cdot S_{xy} - S_x \cdot S_y}{\Delta} \\
\Delta &\equiv S \cdot S_{xx} - (S_x)^2
\end{aligned} \tag{B.6}$$

Les équations (B.6) donnent la solution pour la meilleure modélisation des paramètres a et b.

Nous devons estimer l'incertitude sur les estimations de a et b, l'erreur de mesure dans les données introduit une certaine incertitude dans la détermination de ces paramètres. Si les données sont indépendantes, alors chacune ajoute sa propre incertitude aux paramètres. La considération de la propagation des erreurs montre que la variance σ_f^2 dans la valeur de chaque fonction doit être :

$$\sigma_f^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \left[\frac{\partial f}{\partial y_i} \right]^2 \tag{B.7}$$

Pour la ligne droite, les dérivées de a et b par rapport à y_i peuvent être directement évaluées à partir des solutions :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial a}{\partial y_i} &= \frac{S_{xx} - S_x \cdot x_i}{\sigma_i^2 \cdot \Delta} \\
\frac{\partial b}{\partial y_i} &= \frac{S \cdot x_i - S_x}{\sigma_i^2 \cdot \Delta}
\end{aligned} \tag{B.8}$$

En sommant tous les points comme en (B.7), nous obtenons :

$$\begin{aligned}
\sigma_a^2 &= S_{xx} / \Delta \\
\sigma_b^2 &= S / \Delta
\end{aligned} \tag{B.9}$$

qui sont les variances des estimations de a et b, respectivement.

C. Le test de Van de Castele d'après Martin Miguez B. et al. [6]

Afin de caractériser les mesures aux marégraphes, on utilise le test de Van de Castele. Ce test permet de caractériser les erreurs du marégraphe. Il s'agit de comparer un marégraphe avec un étalon, par exemple des lectures à l'échelle, les deux appareils étant situés dans un même lieu ou suffisamment proche pour que les signaux qu'ils renvoient soient très semblables.

Les deux appareils mesurant la même chose, la différence entre les deux devraient être nulle sinon constante au cours du temps, et ce quelque soit l'amplitude de la mesure. Pour cela, on calcul la différence entre les deux mesures, H' (de l'appareil testé) et H (de l'étalon) : $DH = H' - H$. Le diagramme de Van de Castele est un graphique de DH en fonction de H, soit :

$$H = f(DH) = f(H' - H)$$

Selon les cas, on obtient les figures 1a à 1f. La figure 1a illustre le cas où seul le bruit instrumental affecte la mesure du marégraphe. Dans les autres figures, on peut détecter des problèmes de mesures :

- Un problème d'échelle qui induit une pente dans le diagramme : sur la figure 1b, ce type de problème apparaît quand les deux instruments mesurent une amplitude différente de la marée. La pente du diagramme est proportionnelle à l'erreur d'échelle.

- La figure 1c illustre le cas d'un décalage horaire entre les deux instruments. Pour l'un des deux appareils, on a un retard de l'horloge. Ce retard se reflète sous la forme d'un ellipsoïde dans le diagramme de Van de Castele la proportion de l'axe de l'ellipsoïde peut permettre une évaluation approchée du décalage horaire entre les deux instruments.

- La quatrième image (Fig. 1d) est un exemple d'un type d'erreur difficilement détectable avec d'autres analyses de comparaison. On a une oscillation périodique, malgré un bon écart-type ($rms < 1$ cm), qui suggère un mauvais fonctionnement de l'un des capteurs. Il s'agit, ici, d'une erreur due à un problème de l'algorithme d'interpolation utilisé pour le radar FMCW. Ce type de problème peut également être détecté par comparaison du contenu spectral des deux signaux (Martin Miguez et al. (2005) [5]). Cependant, ce type d'analyse spectrale ne peut être réalisée sur des séries temporelles courtes ou comportant des trous tandis que le diagramme de Van de Castele ne demande qu'un ou deux cycles de mesures de la marée pour visualiser l'erreur.

- La figure 1e montre le cas où l'un des deux appareils de mesure (ici, un radar acoustique) a une exécution douteuse à marées basses. Les capteurs acoustiques doivent prendre en compte plusieurs paramètres pour pouvoir calculer la distance entre le capteur et la surface de l'eau. Dans le cas du radar acoustique, l'existence de gradients de température entre le capteur et la surface de l'eau peut provoquer des erreurs. Celles-ci vont être d'autant plus grande que la distance entre le capteur et la surface de l'eau augmente. C'est ce qui explique la forme du diagramme.

- La dernière figure (1f) illustre le cas où le test de Van de Castele sert à réaliser une première évaluation de l'exécution d'un nouvel équipement. Dans ce cas, on ne s'attend pas à un décalage temporel, les deux appareils étant synchronisés. Cependant, on voit immédiatement un problème pour les faibles et grandes amplitudes de mesures (marées hautes et basses). Ici, c'est un radar à impulsion qui pose problème : les signaux sont relativement sensibles à l'interaction avec certains matériaux et l'installation de ce type d'appareil dans un tube peut être la cause de ces problèmes visualisés dans le diagramme de Van de Castele.

Au vu de ces figures, on peut donc dire que le diagramme de Van de Castele est un très bon outil pour compléter une analyse de mesures réalisées sur un capteur.

III. Validation des lectures à l'échelle de marée

A. Les données brutes

Les mesures à l'échelle de marée sont réalisées par session d'observation de plusieurs heures dans la journée, ceci une fois par mois. La prise de mesure ne se fait pas ponctuellement à l'heure dite, il s'agit en réalité d'une série de mesures instantanées, effectuée autour de l'heure ronde et moyennée. Les mesures se font selon un protocole précis avec 2 personnes, l'une pour lire à l'échelle la mesure et l'autre pour la noter et indiquer le moment de la mesure. En 2003, à Kerguelen, une mesure est effectuée toute les minutes en commençant 2 minutes avant l'heure ronde et en terminant 2 minutes après. A partir de 2004, toujours dans ce même laps de temps, les mesures ont été effectuées toutes les 10 secondes, ce qui fait une valeur finale moyennée sur 25 mesures. Depuis 2007, les mesures

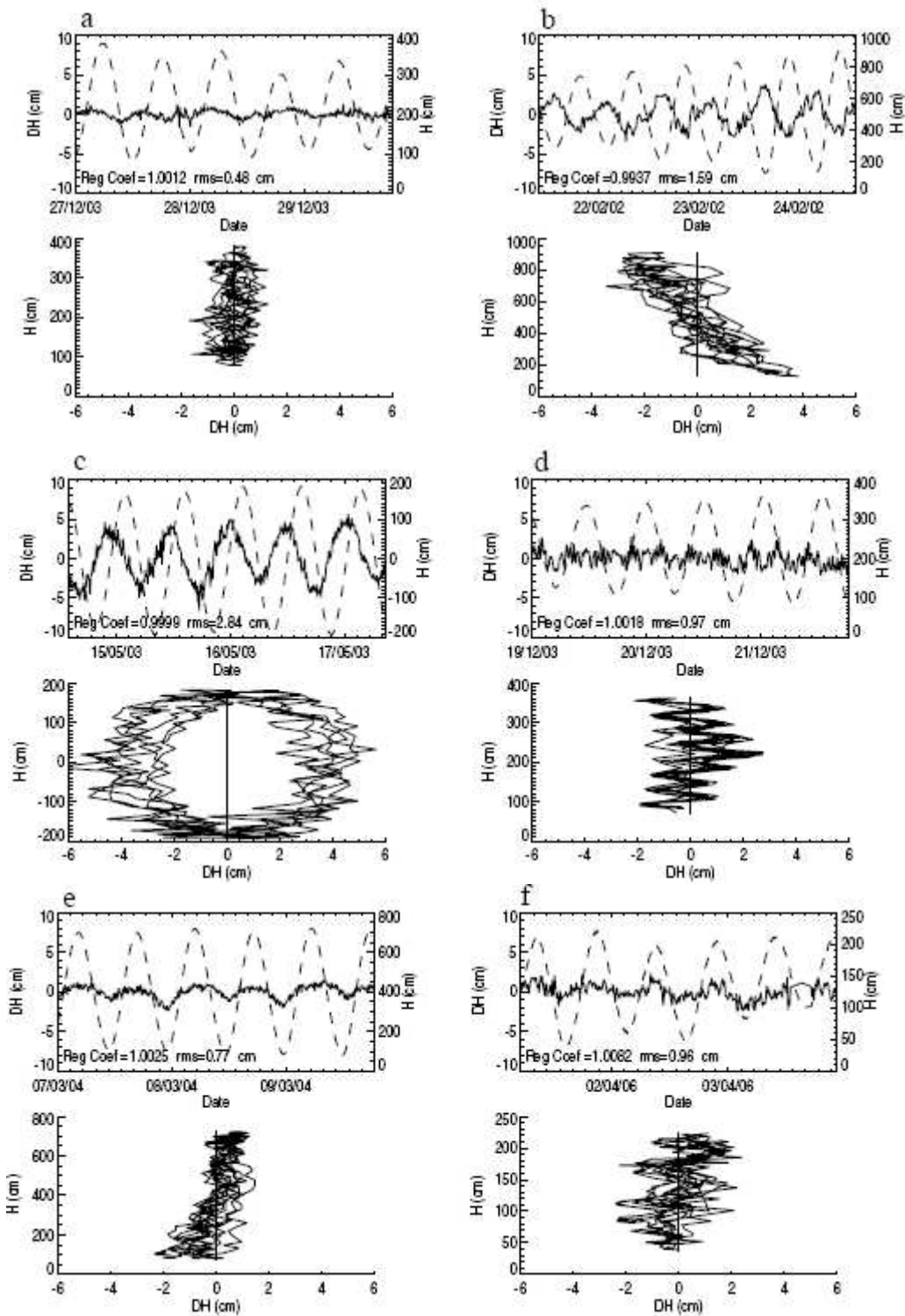


Figure 1 _ Exemples de diagrammes de Van de Casteele (extrait de Martin Miguez B. et al. [n°]) _
 Illustration de différents problèmes instrumentaux ou temporels

sont effectuées toutes les 5 secondes, soit une valeur finale moyennée sur 49 mesures. La prise en compte d'un plus grand nombre de mesures permet d'améliorer la précision théorique sur la moyenne de l'heure ronde. Ainsi pour une erreur (écart-type) sur les mesures instantanées de 1 cm nous obtenons les incertitudes théoriques suivantes :

$$\sigma_{2003} = \frac{\sigma}{\sqrt{5}} \approx 0,45 \text{ cm} \quad \sigma_{2004} = \frac{\sigma}{\sqrt{25}} \approx 0,19 \text{ cm} \quad \sigma_{2007} = \frac{\sigma}{\sqrt{49}} \approx 0,13 \text{ cm}$$

Une fois le relevé fait, un document contenant le lieu, les opérateurs, le fruit (l'inclinaison) de l'échelle s'il y a lieu, la date, les observations sur les conditions dans lesquelles ont été faites les mesures (météorologie, état de la mer, ...), ainsi que la totalité des mesures, et la moyenne à l'heure moyenne. Depuis septembre 2007, un fichier formaté de type « .xls » est utilisé facilitant la tâche des opérateurs, et permettant un envoi automatique des données aux utilisateurs. Pour plus d'information sur les lectures à l'échelle de marée et l'évolution des formats se reporter à l'annexe A. Nous appellerons « mesures » l'ensemble des valeurs instantanées lues à l'échelle et « lecture » la valeur issue de la moyenne autour de l'heure ronde à laquelle est associé l'écart-type : σ/\sqrt{N} .

Une partie de mon travail de stage a été consacrée à l'étude de ces lectures à l'échelle de marée. L'objectif étant de qualifier l'échelle qui nous servira par la suite d'étalon fondamental pour l'étude du niveau de la mer à l'aide des marégraphes ou de l'altimétrie. Depuis la mise en place des lectures à Kerguelen en 2003, une cinquantaine de sessions ont eu lieu, comprenant chacune une dizaine de lectures. Sachant que chaque lecture comprend 5, 25 ou 49 mesures brutes. Ces sont donc près de 10000 mesures brutes que j'ai eu à traiter et analyser dans cette première partie de stage.

B. Qualité liée aux conditions de mesures

La qualité des lectures dépend des conditions dans lesquels elles sont réalisées, c'est-à-dire de la météo en générale qui va influencer la visibilité de l'échelle de marée avec le vent, les vagues, et la pluie. L'état du puits intervient également dans la qualité des lectures : la présence d'algues va plus ou moins boucher le trou de liaison avec la mer et fausser les lectures. Ainsi, en prenant en compte ces différents paramètres, relativement subjectifs malgré tout, on a établi un premier code qualité allant de 0 à 5 :

- 0 : données inexploitable
- 1 : pas d'information
- 2 : beaucoup de vent, mer agitée, houle
- 3 : vent, mer peu agitée
- 4 : pas de vent, peu de houle, mer calme
- 5 : pas de vent, pas de houle, mer plate

Les données inexploitable (code qualité 0) seront systématiquement ignorées et ne seront donc pas prise en compte dans le traitement. On retrouvera donc, après traitement, un code qualité de 1 à 5.

C. Qualité liée au puits

Un second problème pour la qualité des données est la forme du puits elle-même. Il existe deux possibilités qui peuvent d'ailleurs être associées : la première est liée au point d'entrée de l'eau dans le puits ①, la seconde est liée à la quantité d'eau dans le puits ② :

► ① L'influence des mouvements de la mer autour du puits va être d'autant plus grande dans le puits que la quantité d'eau est faible et que l'on est proche du point d'entrée de l'eau du puits. En effet, la houle va se propagée plus facilement à l'intérieur du puits lorsque le niveau de la mer est proche de l'entrée du puits, ce qui va favoriser le clapot à l'intérieur du puits et par conséquent rendre plus difficile et plus bruitée la lecture à l'échelle. Lorsque le niveau de la mer monte, l'énergie des vagues entre de moins en moins dans le puits et l'effet de la houle est par conséquent moindre dans le puits, les mesures sont donc plus faciles et plus précises.

► ② Le point d'entrée de l'eau dans le puits est situé légèrement au dessus de la base du puits, ce qui fait qu'il y a toujours une certaine quantité d'eau minimale dans le puits (cf. Figure 2). Cette disposition induit, lorsqu'on est proche de ce niveau, un « offset », c'est-à-

dire un biais systématique dans le puits. De plus, le puits est placé de telle façon que lors des basses mers importantes, il est complètement à sec. Ainsi une partie des mesures ne peut être réalisée.

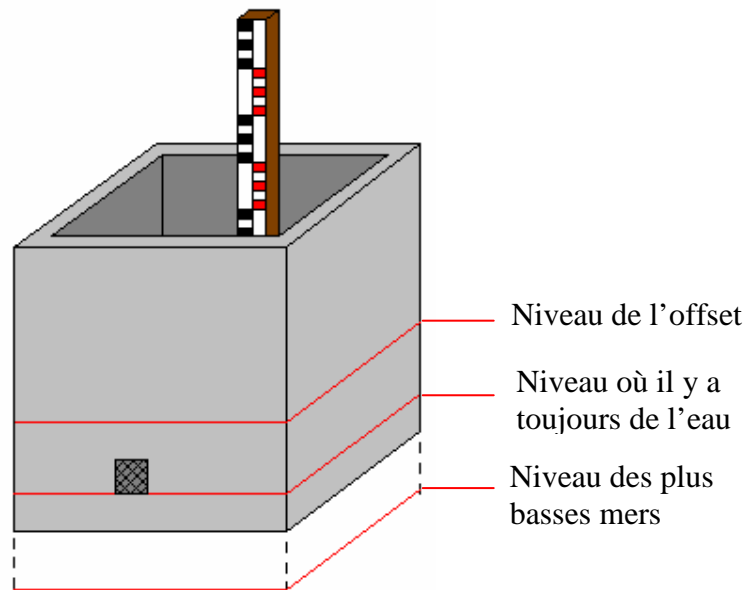


Figure 2 _ Schéma d'un puits (non à l'échelle)

Afin de vérifier ces deux types d'« influence » de la forme du puits sur les mesures, Nous avons effectué différents traitements sur les mesures brutes. Dans un premier temps, nous avons tracé la valeur moyenne des écarts-types (sur les mesures brutes) en fonction de la hauteur d'eau dans le puits. . Cela permet de visualiser l'influence de la houle à l'intérieur du puits (cf. figure 3). On retrouve le même type de courbe en réalisant un calcul théorique en prenant des valeurs d'amplitude et de périodicité typique de la houle et en calculant l'écart-type de celle-ci puis celle du puits.

Pour ce qui est de l'offset, il est nécessaire d'avoir un élément de comparaison, on prendra, par exemple, les mesures du marégraphe. Ces mesures vont permettre de réaliser un diagramme de Van de Castele en comparant les mesures horaires de l'échelle, E , et du marégraphe, M . On va donc tracer $\Delta = M - E$ en fonction de E . S'il y a réellement un offset, on devrait obtenir une figure ressemblant à la figure 1e, ce qui permettra de définir la hauteur de cet offset et de ne pas prendre en compte les mesures à l'échelle qui lui sont inférieurs, et qui sont donc faussée. Afin d'affiner la valeur de l'offset, on peut calculer l'écart-type (instantané ou sur la moyenne) des Δ par tranche de hauteur de 5 ou 10 cm. On devrait obtenir une courbe avec un écart-type relativement constant et faible pour E supérieur à l'offset et un écart-type d'autant plus grand que E est inférieur à l'offset.

Enfin, un dernier problème est lié aux erreurs de copies, entre autre lors de la numérisation (par exemple : un 8 dans une série horaire de lectures comprises entre 86 et 89). On a le plus souvent un écart-type sur les valeurs très important dans ce cas. Il suffit alors de rajouter un « flag », sur les séries horaires comportant ce genre de problème. Avec l'offset et les erreurs de copies, on obtient un flag codé de 0 à 2 :

- 0 : pas de problème

- 1 : des données inférieures au seuil dans la série horaire de mesure
- 2 : des problèmes dans les mesures de la série horaire (écart-type instantané ≥ 5)

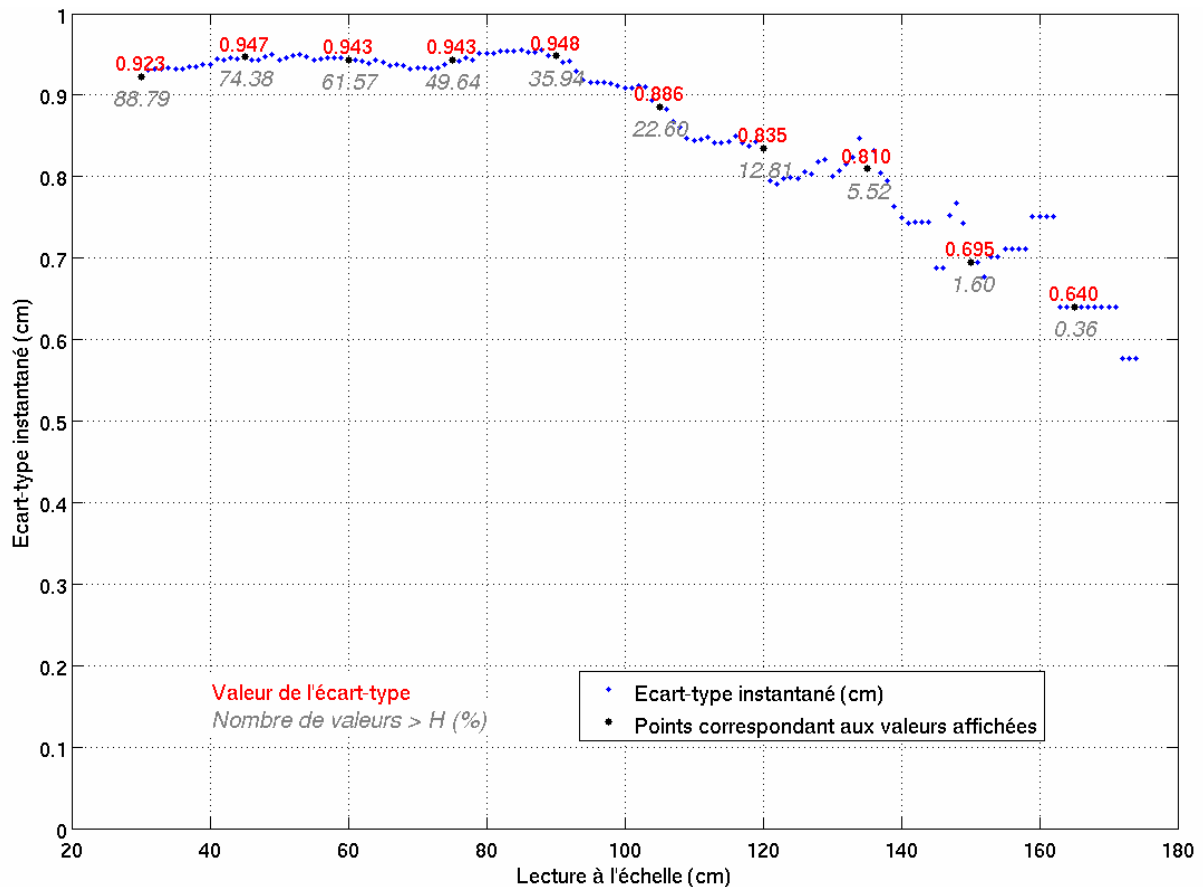


Figure 3 _ Ecart-type des mesures instantanées en fonction de la hauteur lue à l'échelle (H)

D. Les traitements

Un premier traitement des données brutes, consiste à supprimer les codes qualités 0 (données inexploitable) mais également les flags 2 (écarts-types instantanés supérieurs à 5). Le second « traitement » consiste à visualiser l'influence de la forme du puits sur la propagation de la houle à l'intérieur de celui-ci : on s'aperçoit alors que l'écart-type est stable jusqu'à une hauteur d'eau d'environ 80 cm (cf. Figure 3). On a alors une valeur de l'ordre de 0.9 cm pour les écarts-types instantanés et de 0.18cm pour les écarts-types sur la moyenne, cette valeur diminue pour des hauteurs supérieures à 80 cm jusqu'à atteindre 0.6 et 0.12 cm respectivement pour une hauteur de 150 cm. Cela signifie que la précision sur la mesure est d'autant plus grande que la hauteur lue est supérieur à 80 cm, pour les valeurs inférieures la précision est de l'ordre de 0.9 cm sur les valeurs instantanées et de 0.18 cm sur les moyennes horaires (c'est-à-dire les « lectures »).

Pour ce qui est de l'offset, il faut réaliser un diagramme de Van de Casteele. On sait que la différence entre les hauteurs lues à l'échelle et celles lues aux marégraphes est en moyenne de 48,33 cm. Aussi, on va représenter non pas la différence $\Delta = M - E$ tel quelle mais plutôt l'écart à la moyenne des Δ , ce qui permettra d'avoir des valeurs normalement centrés sur zéro et de bien visualiser les problèmes qu'il pourrait y avoir. La figure 4a représente ce diagramme et on voit clairement qu'il y a un problème au moment des basses mers : les

valeurs sont toutes inférieures à zéro. Cela signifie qu'il y a bien un problème de lecture à l'échelle pour des hauteurs faibles, qui est lié à la présence d'eau résiduelle dans le fond du puits. Pour préciser la hauteur en dessous de laquelle les lectures sont faussées, une moyenne des Δ par tranche de 10 cm permet de mieux visualiser le problème (cf. Figure 4a). On voit alors que les valeurs inférieures à 30 cm environ sont très décalées par rapport au zéro. Ce qui signifie que l'on a bien un offset dans le puits de Kerguelen. Pour préciser cette valeur, on utilise encore une fois l'écart-type. On obtient la figure 4b, qui confirme la hauteur de 30 cm comme hauteur minimale viable pour les lectures à l'échelle. Par conséquent, toutes les valeurs inférieures à cette hauteur minimum vont être supprimées avant le calcul de la moyenne de chaque série horaire et le nombre d'observation va être recalculer en conséquence : une série horaire ayant initialement 49 mesures et comportant 5 mesures inférieures à 30 cm aura une moyenne calculée à partir de 44 mesures, 44 devenant alors le nombre d'observation réalisée ou tout au moins le nombre d'observation ayant servi au calcul de la moyenne.

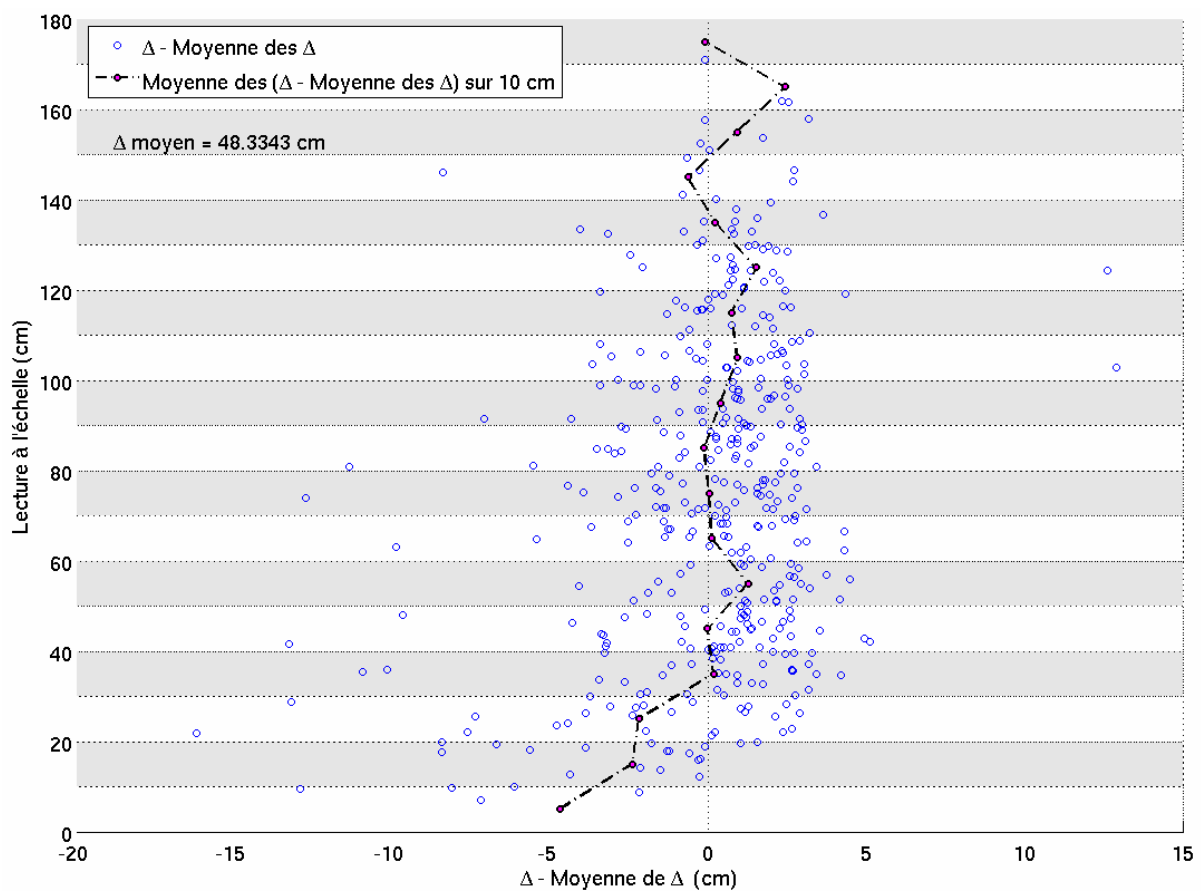


Figure 4a _ Diagramme de Van de Castele et moyenne de ($\Delta -$ moyenne de Δ) sur 10 cm

E. Résultats

Dans un premier temps, les données brutes (lectures instantanées) sont regroupées sans discrimination dans le fichier « lect_brutes.txt » avec le code qualité et le flag qui permettront par la suite de visualiser rapidement les séries horaires comportant des problèmes.

Ensuite, le traitement permet de créer un second fichier « lect_traitees.txt » qui regroupe les lectures horaires, c'est-à-dire les moyennes des séries horaires, et ce après retrait des séries ayant une qualité 0 ou un flag 2, et retrait des valeurs inférieures à l'offset qui est de 30 cm. A ces lectures, sont ajoutés les écart-types instantanés et sur les moyennes.

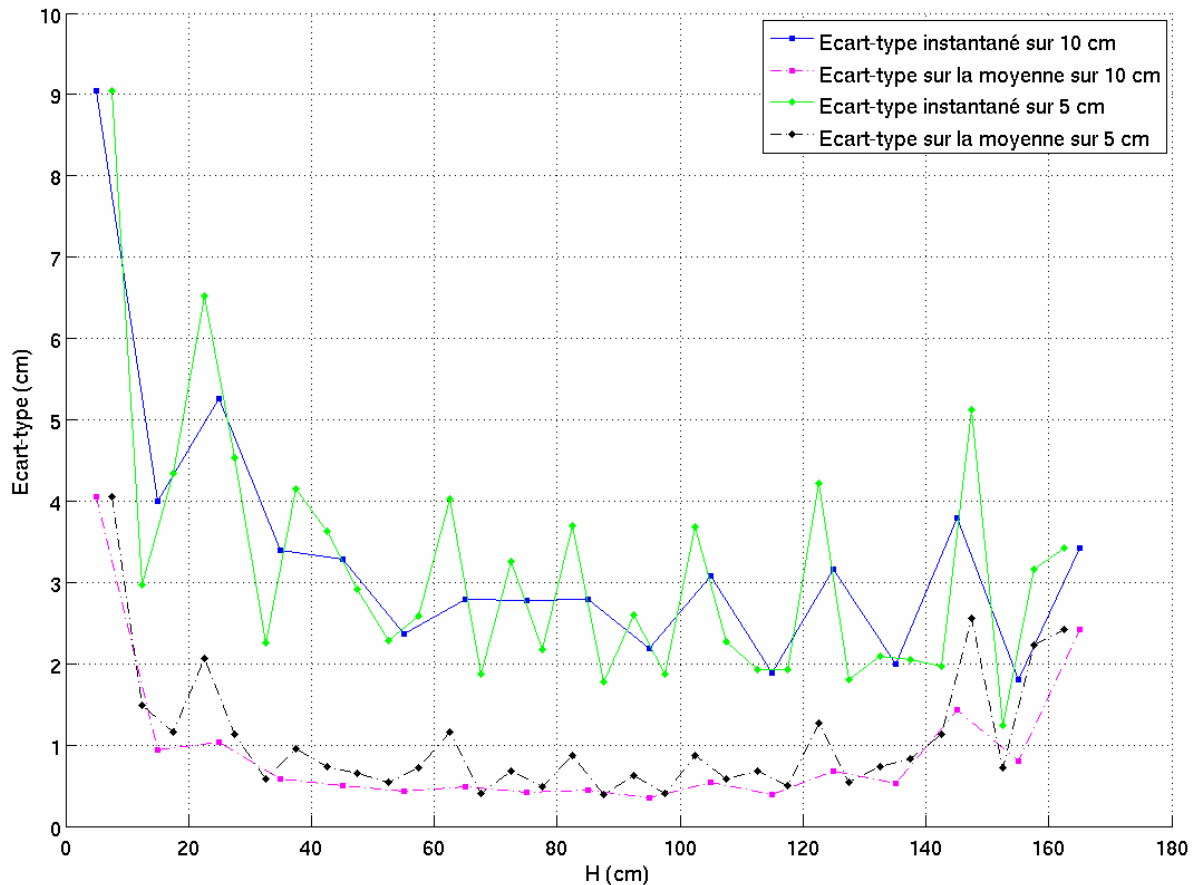


Figure 4b _ Ecart-type sur 5 et 10 cm du diagramme de Van de Castelee

IV. Calcul des dérives des marégraphes

A. Les capteurs de pression

1. Données brutes

Les capteurs de pression sont des appareils de mesures, et comme la plupart des appareils de ce type sont soumis à des dérives. C'est pourquoi, dans le cas des capteurs de pression, une calibration est effectuée avant la mise à l'eau et après la sortie de l'eau. Ces calibrations permettent de retrouver la véritable valeur de la mesure et d'avoir une idée de la dérive du capteur de pression entre la date de la première calibration, avant la mise à l'eau, et la date de recalibration, après la sortie de l'eau.

Les capteurs de pression ne mesurent pas le niveau de la mer directement, mais des valeurs brutes, non physiques que l'on va nommer N . La première valeur correspond à la température N_T , la seconde à la pression de fond, N_B (B pour « Bottom » : « fond » en anglais), et la dernière la conductivité, N_C . La calibration permet de déterminer les coefficients qui vont permettre de passer des valeurs brutes aux valeurs physiques. Il est indispensable d'avoir la température car les coefficients permettant de calculer la pression de fond, P_B , varient selon la gamme de température où l'on se trouve (cf. Figure 5). Ensuite avec la pression atmosphérique, P_A , la densité, ρ , et la gravité, g , on peut calculer le niveau marin, $slev$ (pour « sea level ») :

$$slev = \frac{P_B - P_A}{\rho \cdot g}$$

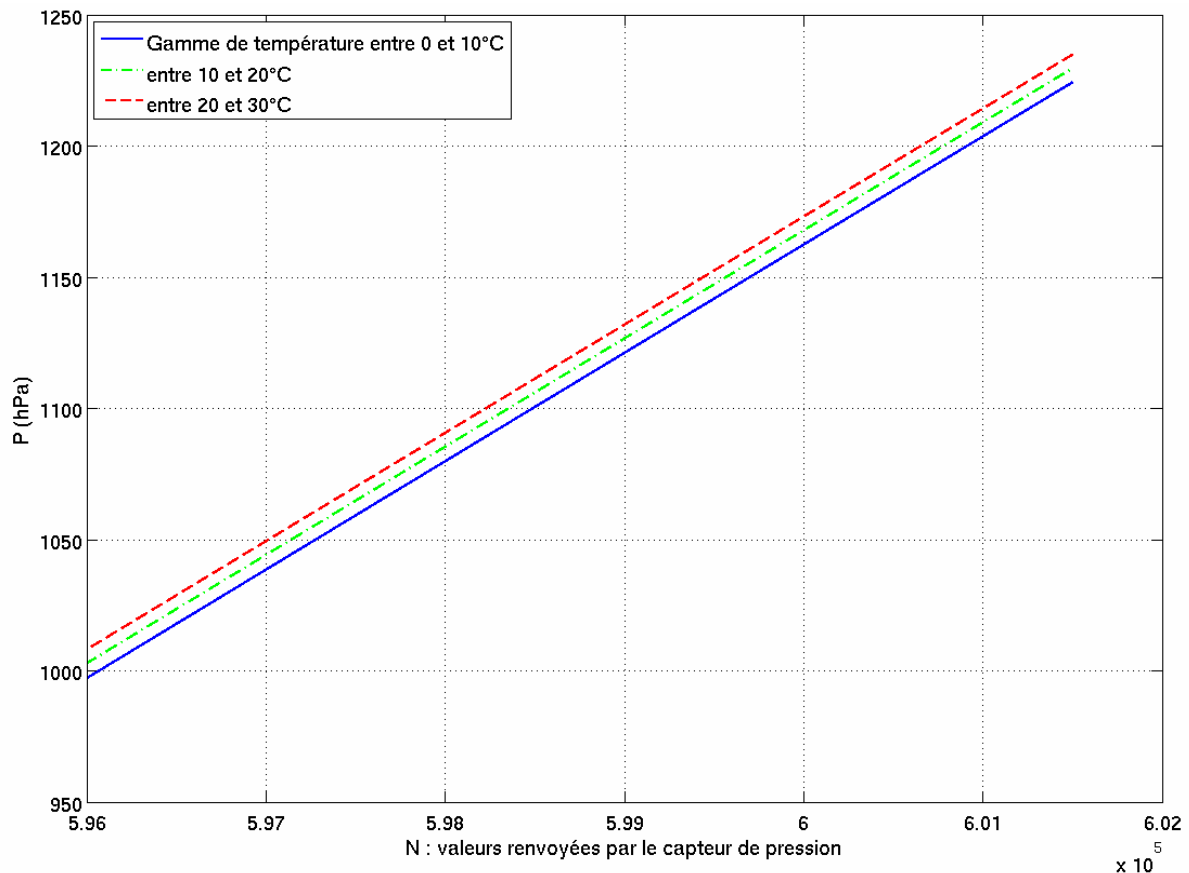


Figure 5 _ Pression fonction de N et de la gamme de température

Le problème qui se pose ici est que la dérive du capteur de pression va influencer sur le niveau marin que l'on va calculer ensuite. Par conséquent, les calibrations avant et après utilisation de l'appareil vont permettre d'avoir une première approximation de la dérive de la mesure. Le problème étant que ces calibrations ne sont pas fait le jour même de la mise à l'eau où du retrait de l'eau mais parfois jusqu'à quelques années avant ou après. Les conditions dans lesquelles s'est trouvé le capteur de pression sont donc différentes dans le temps et cela peut jouer sur la dérive. On va cependant considérer, ici, que la dérive est linéaire dans le temps. Les mesures réalisées à l'échelle devraient permettre de le vérifier. Une première approximation de la dérive est donc de calculer la dérive linéaire des coefficients, et la pression de fond qui en découle entre les deux calibrations.

Comme on a pu le voir précédemment, les marégraphes ne font pas une mesure « brutes » du niveau marin mais ils mesurent des valeurs brutes, N, qui permettent à partir de coefficients d'obtenir (dans le cas présent -il existe plusieurs types de marégraphe-) la pression de fond et la température de l'eau :

$$T = \text{coeff}_{T1} + \text{coeff}_{T2} \cdot N_T + \text{coeff}_{T3} \cdot N_T^2 + \text{coeff}_{T4} \cdot N_T^3$$

$$P_B = \text{coeff}_{B1} + \text{coeff}_{B2} \cdot N_B + \text{coeff}_{B3} \cdot N_B^2 + \text{coeff}_{B4} \cdot N_B^3$$

Les coefficients pour la pression varient en fonction de la température selon trois possibilités : $0 \leq T < 10^\circ\text{C}$, $10 \leq T < 20^\circ\text{C}$ et $20 \leq T < 30^\circ\text{C}$. Dans le cas de Kerguelen, les températures sont généralement comprises entre 0 et 10°C .

A ces mesures, s'ajoutent celles d'un deuxième appareil qui va mesurer la pression atmosphérique. L'ensemble de ces mesures va permettre d'obtenir le niveau marin grâce à la formule suivante :

$$\text{slev} = \frac{P_B - P_A}{\rho \cdot g}$$

- $g = 9,78049 \text{ m/s}^2$, la gravité
- ρ s'obtenant à partir des formules suivantes (formules de l'UNESCO) (avec T, la température et S, la salinité) :

$$p_0 = 5890 + 38.T - 0,375.T^2 + 3.S$$

$$a_1 = 1779,5 + 11,25.T - 0,0745.T^2 - (3,8 + 0,01.T).S$$

$$a_0 = 0,698$$

$$\rho = p_0 / (a_1 + a_0.p_0)$$

Dans ce cas, la température (de l'eau) est celle mesurée par le marégraphe et la salinité est fixée à 33 psu* .

2. Les traitements

Le traitement des données marégraphiques consiste ici en une correction des dérives instrumentales. Dans un premier temps, on corrige la dérive de la pression de fond, en calculant la dérive des coefficients de calibration. Pour cela, on suppose que la dérive est linéaire dans le temps. On fait la même chose pour la densité (dérive de la température).

A partir de la pression de fond et de la densité corrigées de la dérive, on obtient un niveau marin en partie corrigé de la dérive instrumentale. Il manque encore la correction de la dérive atmosphérique, qui est réalisée à l'aide des données de pression atmosphérique fournit par Météo France. On peut cependant l'approximer en regardant la tendance de la pression atmosphérique : à Kerguelen, elle est de l'ordre de $-0,59 \text{ hPa/an}$ (cf. Figure 6). Or, la tendance de la pression atmosphérique mesurée par Météo France à Kerguelen, qui est régulièrement corrigée et peut donc servir de référence, est de l'ordre de $0,013 \text{ hPa/an}$ sur une période d'un peu plus de cinquante ans. Par conséquent, la tendance observée sur le capteur Orion couplé au marégraphe est due en grande partie à la dérive de l'appareil de mesure. Sur la période commune au marégraphe et aux mesures « météo » (1993/2002), on a une tendance pour les mesures météo de $0,025 \text{ hPa/an}$ et pour les mesures Orion, une tendance de $-0,59 \text{ hPa/an}$. Soit une sous-estimation de la pression atmosphérique de l'ordre de $-0,615 \text{ hPa/an}$ pour le capteur Orion, ce qui est énorme au regard de ce que l'on cherche. On a donc une augmentation artificielle du niveau marin d'environ $6,15 \text{ mm/an}$ liée à l'appareil de mesure de la pression atmosphérique. Il ne faut pas oublié cependant que chaque tendance comporte une part d'erreur liée à l'incertitude sur les mesures. Pour estimer cette erreur, on se sert des formules de Press et al. [4] (cf. II.B.). On obtient pour l'erreur sur la tendance du niveau marin avant correction : $+8,7 \pm 2 \text{ mm/an}$, et après correction : $-1,9 \pm 2 \text{ mm/an}$. Dans les deux, cas (avant et après correction de la dérive instrumentale), l'erreur est de l'ordre de 2 mm/an ce qui n'est pas négligeable surtout pour la tendance après correction où l'erreur est plus grande que la tendance elle-même, ceci est dû au fait qu'à chaque correction de la dérive (pression de fond et atmosphérique), on induit une erreur supplémentaire.

Une question que l'on peut se poser est : est-ce que les capteurs de pression dérive tous de la même manière et du même ordre de grandeur ? pour répondre à cette question, j'ai calculé la dérive d'un appareil entre chaque calibrations, le tableau suivant résume la situation pour le capteur WLR7 1351_409 :

Date de		Lieu où le marégraphe a fonctionné	Dérive instrumentale (hPa/an)
calibration	recalibration		
14/03/1991	31/08/2000	Kerguelen	+ 0,70
31/08/2000	10/10/2003	Kerguelen	- 0,48
10/10/2003	08/06/2007	Saint-Paul	+ 0,66

* psu : practical salinity unit (soit : unité de salinité pratique), 1psu = 1g de sel (Na+Cl-) par kg d'eau de mer.

Ce tableau montre qu'un même capteur peut avoir une dérive positive ou négative et que l'ordre de grandeur de celle-ci varie. On ne peut donc pas prévoir quelle va être la dérive de l'appareil et donc programmer une correction automatique.

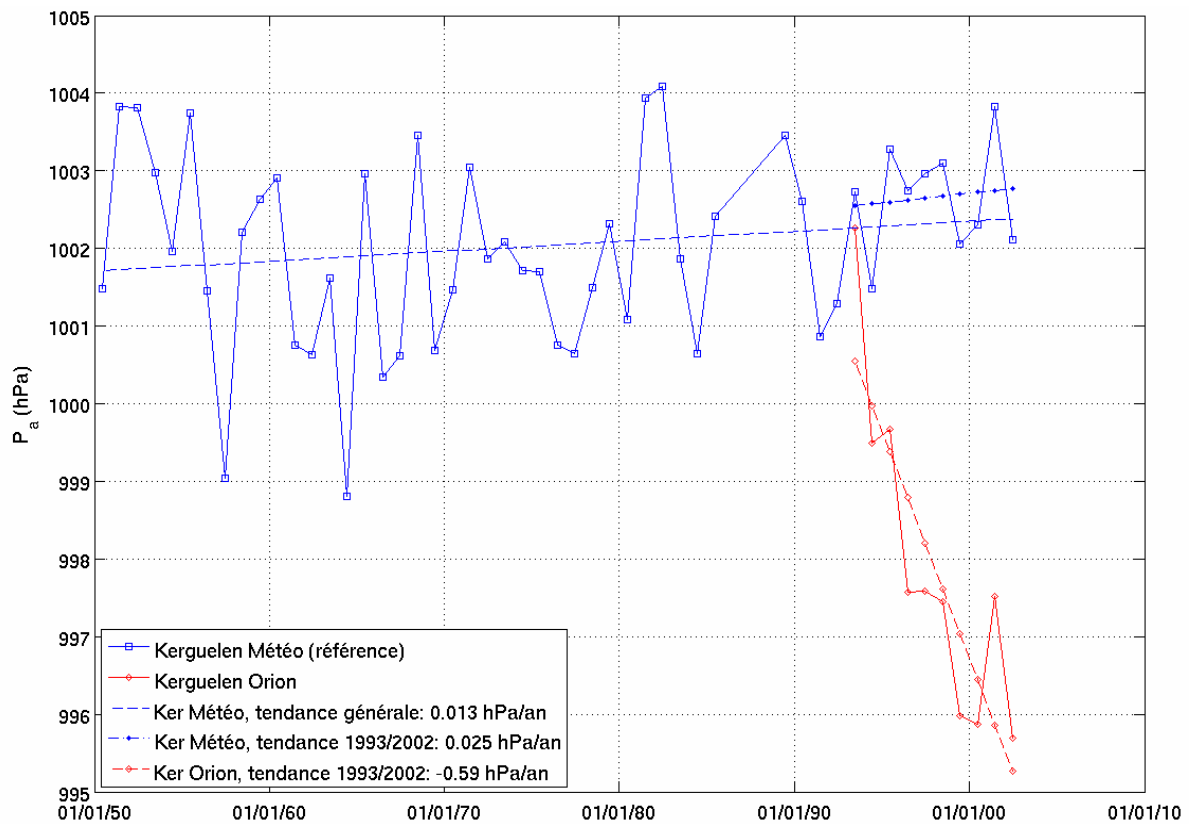


Figure 6 _ Moyenne annuelle de la pression atmosphérique de Kerguelen et tendance

3. Résultats

Pour le marégraphe de Kerguelen, en prenant les mesures telles quelles (sans correction), on obtient un niveau marin qui augmente de 8,7 mm/an entre 1993 et 2002. En corrigeant la densité, la pression de fond et la pression atmosphérique, on obtient une diminution de - 1,9 mm/an pour cette même période (cf. Figure 7). Les corrections appliquées n'ont pas un effet anodin sur la tendance du niveau marin. En revanche, il convient de vérifier l'hypothèse principale pour la dérive, qui est la linéarité de celle-ci. Pour cela une comparaison avec les données altimétriques et les mesures à l'échelle est nécessaire. De la même manière on peut corriger le niveau marin mesuré à Saint-Paul, en prenant pour référence de pression atmosphérique les mesures météo de l'île d'Amsterdam qui est située à une centaine de kilomètres de l'île de Saint-Paul et qui est globalement soumise au même régime météorologique. On obtient initialement une tendance à l'augmentation de 11,1 mm/an pour la période de 1995 à 1998, après correction cette tendance change et on a alors une diminution de - 7,4 mm/. Ce changement est énorme, mais il faut bien prendre en compte que la tendance du niveau marin pour Saint-Paul est calculée seulement sur quatre ans en moyenne annuelle, c'est-à-dire qu'elle est calculée avec quatre points ce qui est très peu. La tendance ainsi calculée est très influencée par les deux points extrêmes (cf. Figure 8). Il faut donc nuancer le résultat obtenu à Saint-Paul, notamment en prenant en compte les erreurs sur la tendance. On a avant correction : $11,1 \pm 10$ mm/an et après correction $-7,4 \pm 10$ mm/an. L'erreur sur la tendance dans les deux cas est énorme du même ordre de grandeur que la tendance elle-même cela est dû au peu de données servant au calcul comme je l'ai précisé précédemment. Dans les

deux cas, on passe d'une augmentation à une relative stabilité aucun signal ne sortant de la barre d'erreur. Cette différence avant et après correction n'est pas sans conséquence lorsque l'on veut étudier l'impact de l'évolution du niveau marin sur les côtes par exemple.

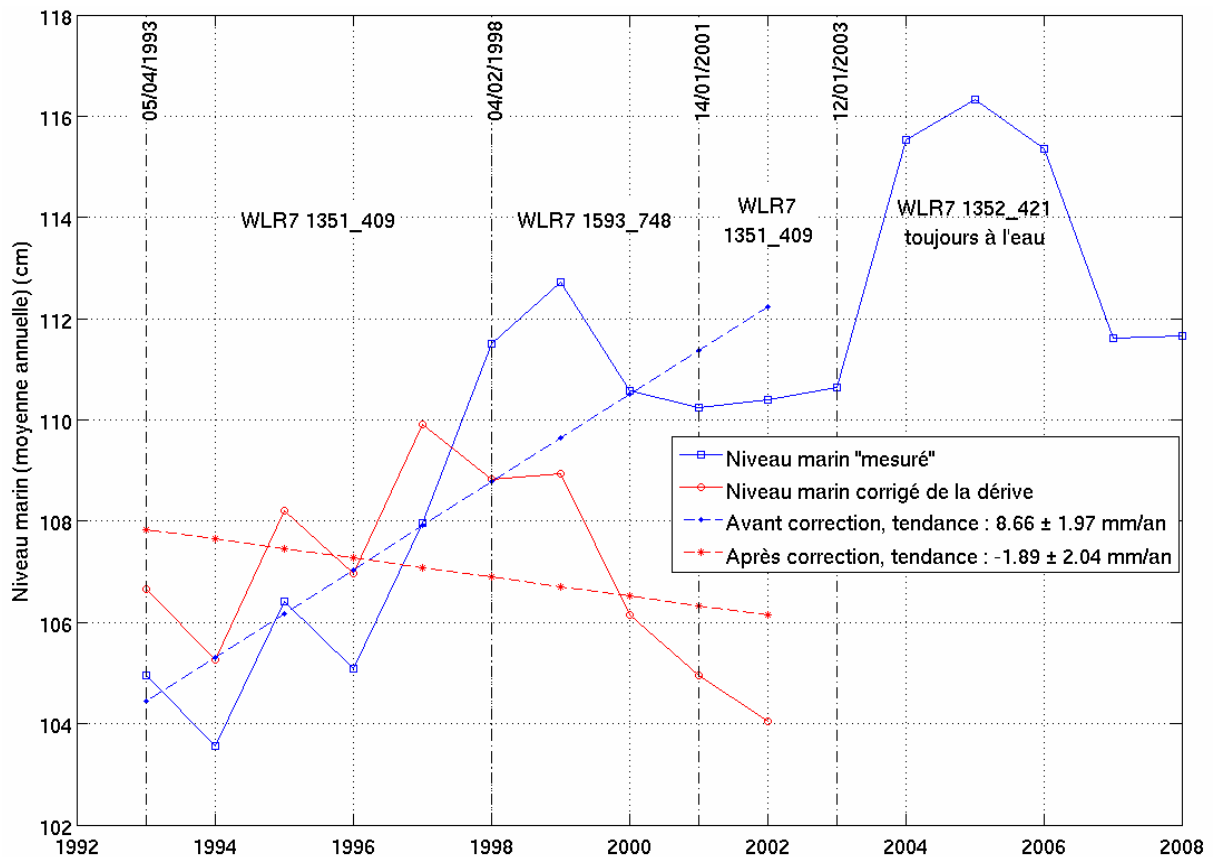


Figure 7 _ Moyenne annuelle du niveau marin à Kerguelen avant et après correction de la dérive instrumentale (correction de la pression de fond et de la densité)
 - les dates correspondent aux changements de marégraphe
 - WLR7 ssss_rrr : correspond au type de capteur avec son numéro de série (sss) et sa référence (rrr)

B. Les radars

1. Les données brutes

Les radars sont des appareils qui mesurent le temps mis par l'onde émise à parcourir la distance entre l'émetteur/capteur et la surface de l'eau en trajet aller/retour. Ce temps est ensuite converti en une distance qui correspond au tirant d'air entre l'appareil et la surface de l'eau. Pour avoir le signal de marée, il faut donc retrancher au signal la distance entre l'émetteur/capteur et le zéro de référence. De la même manière que pour les marégraphes, les données enregistrées par le radar peuvent être envoyées en temps réel aux utilisateurs. En plus du signal enregistré par le capteur, on trouve également l'écart-type instantané de chaque valeur.

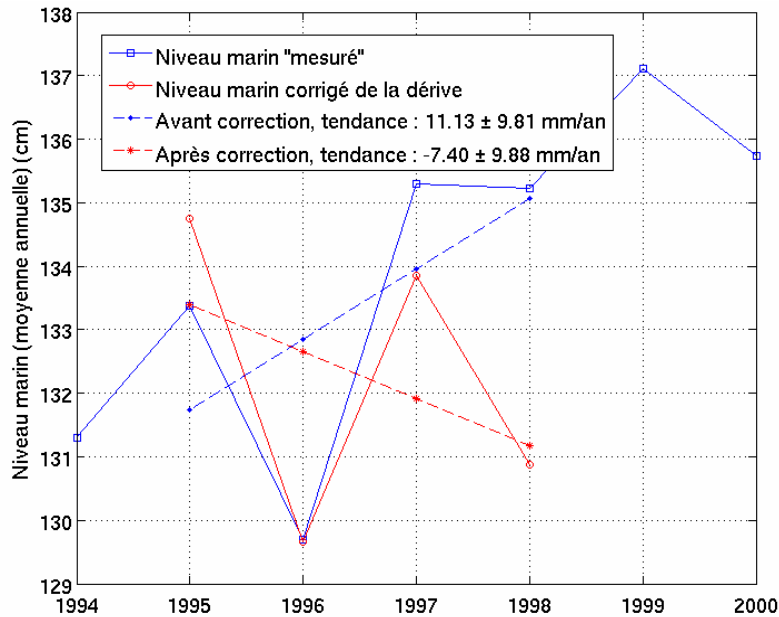


Figure 8 _ Moyenne annuelle du niveau marin à Saint-Paul avant et après correction de la dérive instrumentale ((correction de la pression de fond et de la densité)

2. Les traitements

Un premier traitement consiste à vérifier si, comme le marégraphe, l'appareil dérive. Pour cela, l'échelle de marée se révèle là encore un outil indispensable. Un premier regard sur la tendance, aux dates communes de mesures entre les deux appareils, permet de déterminer s'il y a ou non une dérive. Ensuite, le diagramme de Van de Castele permet de vérifier qu'il n'y a pas de soucis d'échelle ou de problème intrinsèque au radar.

3. Résultats

Le radar de Kerguelen 2 est un radar qui dérive très peu et qui n'a pas de problème d'échelle ou autre (cf. Figure 9) : le diagramme de Van de Castele ne montre pas de signal particulier qui pourrait mettre en évidence un problème intrinsèque à l'appareil de mesure, de plus, la pente du diagramme est faible et peut être considéré comme nul au vu du faible nombre de valeur, ce qui signifie que l'appareil n'a pas de problème d'échelle. Le radar peut donc, comme l'échelle, être utilisé comme référence, en parallèle de l'échelle. Et même, de façon préférentielle puisqu'il fonctionne vingt-quatre heures sur vingt-quatre alors que les mesures à l'échelle ne sont faites qu'un jour par mois.

V. Altimétrie

L'altimétrie est une autre forme de mesure du niveau marin, à une échelle beaucoup plus globale que les marégraphe. Elle va permettre de visualiser l'évolution du niveau marin. Dans le cas de Kerguelen et de Saint-Paul, la comparaison marégraphe/radar est possible car ces deux marégraphe ne sont pas utilisés pour la correction de la dérive des altimètres.

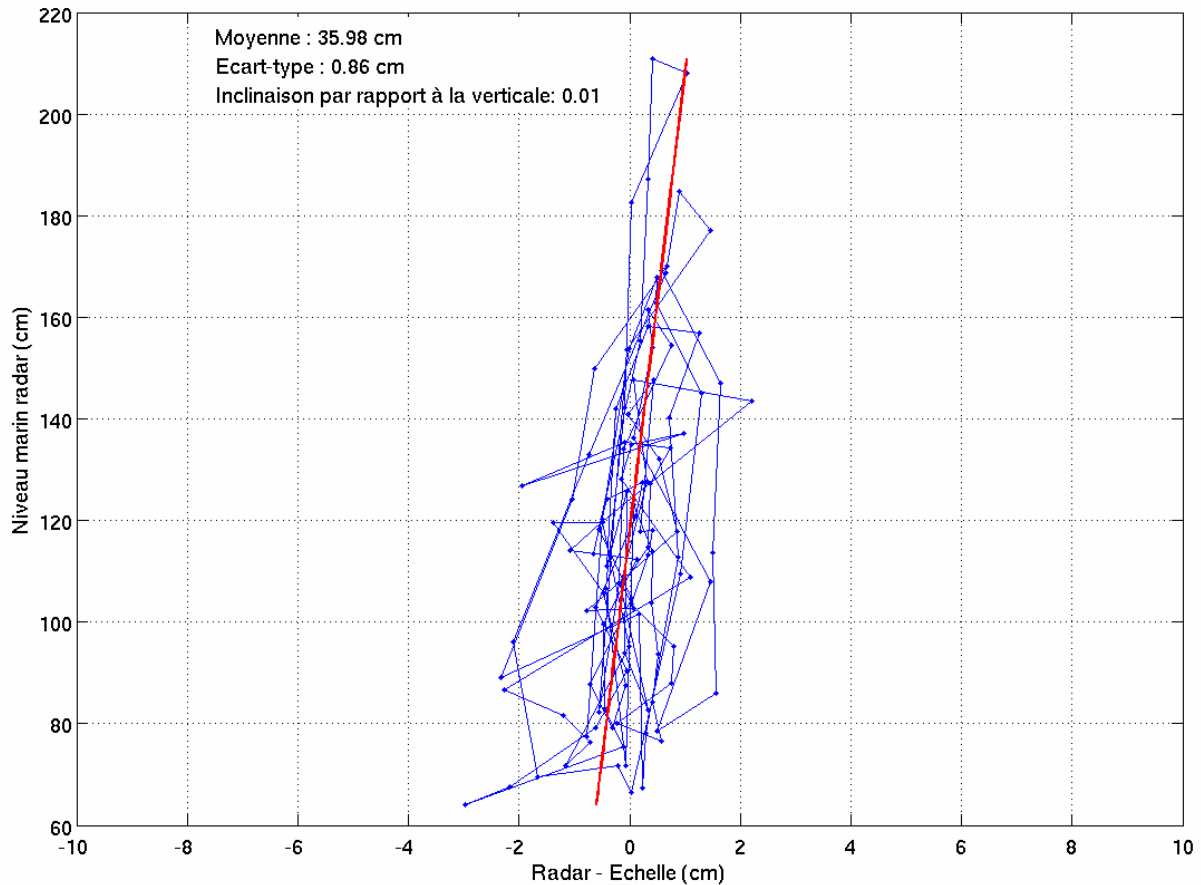


Figure 9 _ Diagramme de Van de Casteele Radar – Echelle de marée

A. Préparation des données altimétriques

Pour cette étude, les traces altimétriques de Topex/Poséidon (ci-après : TP) et Jason ont été utilisées. Il a donc fallu, une fois l'extraction des données réalisées, recaler les données de Jason sur les points des traces de TP. Les données altimétriques utilisées dans ce stage sont issues de la chaîne de traitement XTRACK développée au LEGOS. Cette chaîne de traitement est spécialement adaptée à l'altimétrie côtière. Les traces étant très proche, et parallèle selon la latitude, une interpolation sur la longitude a permis de retrouver les valeurs d'anomalie du niveau marin (SLA, Sea Level Anomaly) et du niveau moyen de la mer (MSSH, Mean Sea Surface Height) aux points de mesures de TP. Les données altimétriques offrent trois types de signaux (cf. Figure 10) :

- Le premier est le niveau marin (SLev, Sea Level), il correspond au signal observé tel quel.
- Le second est le niveau marin filtré de la marée (Filt), il correspond au signal observé auquel on a retiré les variations liées à la marée.
- Le dernier est le signal océanique (OSig, Oceanic Signal), il correspond au niveau marin corrigé de la marée et auquel on a retiré le baromètre inverse à l'aide d'un modèle.

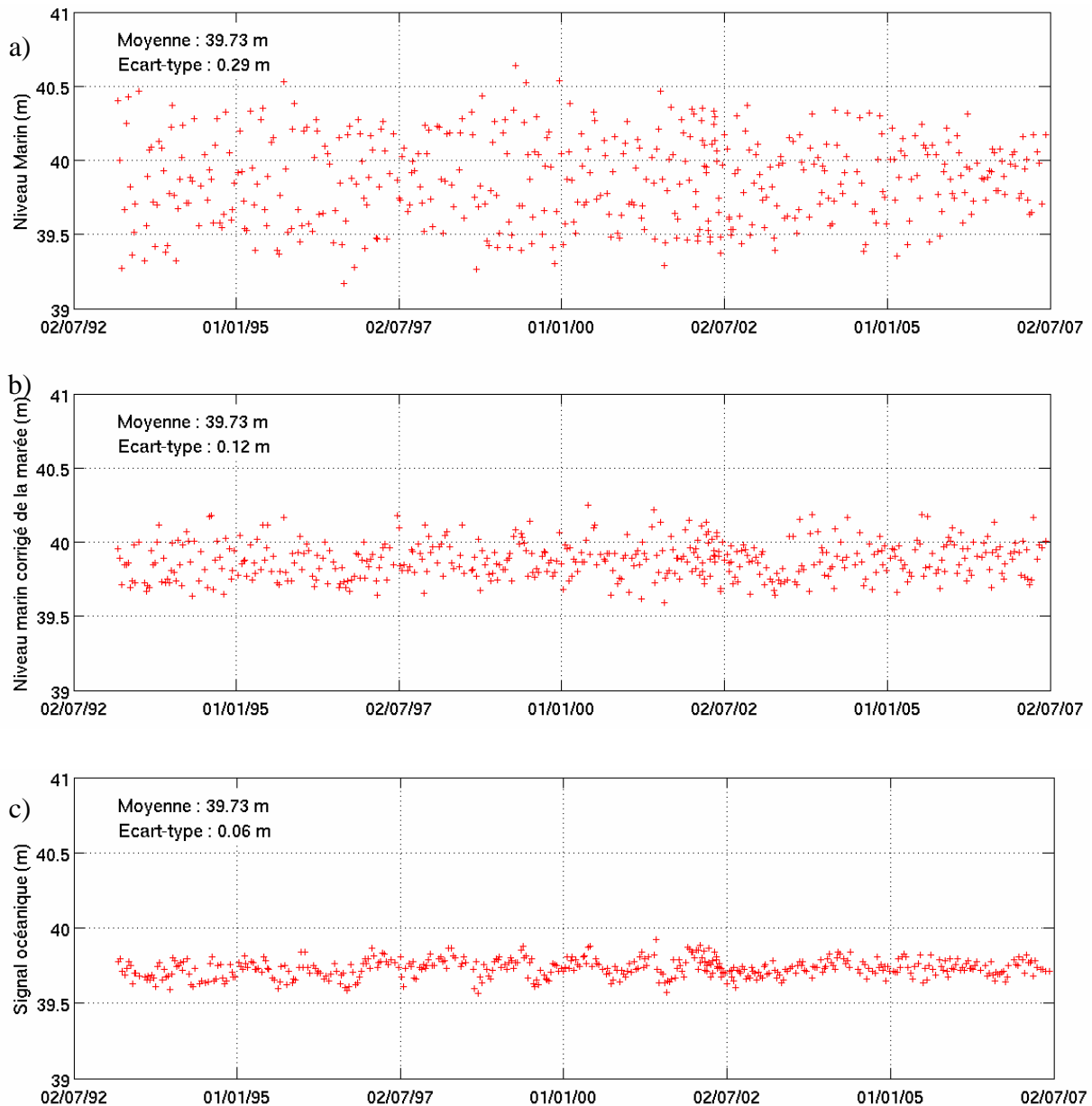


Figure 10 _ Exemple de mesures par altimétrie

a) Niveau marin

b) Niveau marin corrigé de la marée

c) Signal océanique (corrigée de la marée et du baromètre inverse)

La figure 10 montre nettement que le signal océanique a un écart-type plus petit que les autres, il est donc plus précis pour calculer une tendance. De plus, lorsque l'on travaille avec les mesures aux marégraphes, le fait d'utiliser le signal océanique permet de supprimer la dérive sur les mesures de la pression atmosphérique. En effet, en corrigeant du baromètre inverse, on supprime également la tendance de la pression atmosphérique dans les valeurs finales. Ainsi, le seul « défaut » restant dans la mesure est la dérive du marégraphe, c'est-à-dire la dérive de la pression de fond et de la densité.

B. Corrélation marégraphe / altimétrie

La première étape pour comparer le marégraphe et l'altimétrie est de faire une corrélation temporelle entre chaque point des traces et la série marégraphique. En toute logique la corrélation devrait être meilleure lorsque l'on est proche du marégraphe. C'est ce que l'on

peut voir lorsque l'on fait la carte de la corrélation entre le marégraphe de Kerguelen et l'altimétrie (cf. Figure 11). La corrélation du signal océanique est maximale sur le plateau de Kerguelen et en dehors du plateau, on a une décorrélation très rapide.

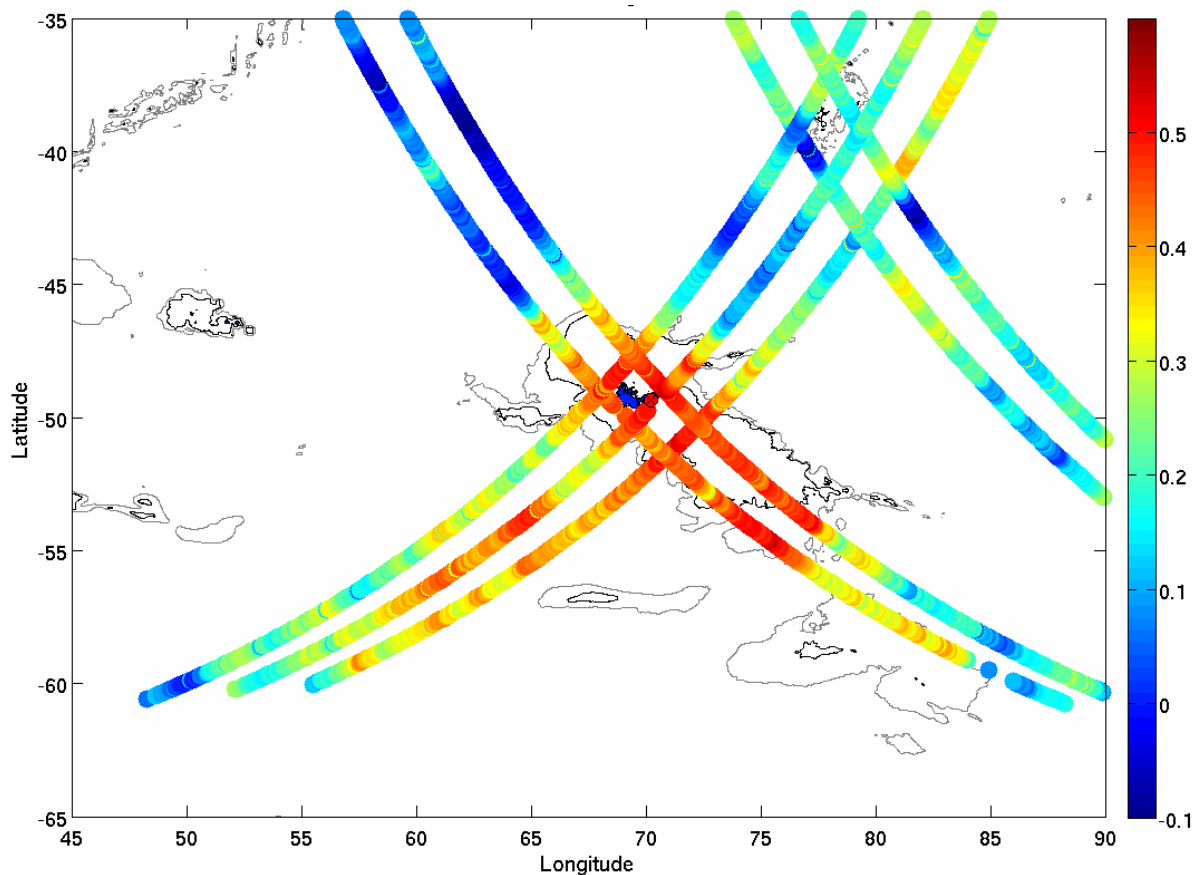


Figure 11 _ Corrélation entre le signal océanique mesuré par altimétrie et celui mesuré par le marégraphe de Kerguelen.

Trait noir : isobathe 1000m Trait gris : isobathe 2000m

C. Tendance du marégraphe et tendance altimétrique

Une carte de la tendance du signal océanique en chaque point des traces montre que la tendance est de l'ordre de $+2 \pm 2.10^{-3}$ mm/an en générale (cf. Figure 12 et 13) et peut atteindre -6 à $+10$ mm/an avec une erreur allant de $\pm 7.10^{-3}$ mm/an à plus de $\pm 10.10^{-3}$ mm/an. Les zones où les tendances sont plus importantes sont corrélées avec des zones de plus grande incertitude. Pour les tendances aux marégraphes, on a $+4,5$ mm/an pour Kerguelen et $+1,4$ mm/an pour Saint-Paul, ce qui à première vue n'est pas négligeable surtout si l'on considère la précision des deux tendances qui est de $\pm 2.10^{-4}$ mm/an. Cependant, il s'agit des tendances du signal océanique obtenu à partir des mesures au marégraphe non corrigées de la dérive des appareils de mesure. Pour passer de la tendance du niveau marin, à la tendance du signal océanique, il faut retirer la tendance du baromètre inverse et celle de la marée soit environ $4,0$ mm/an pour Kerguelen sur la période du 26/10/1994 au 24/12/2006. Hors s'il on utilise le marégraphe corrigé de la pression de fond, la tendance du niveau marin est de $4,0 \pm 15.10^{-4}$ mm/an, ce qui fait pour le signal océanique, une tendance d'environ $0,0 \pm 1.10^{-3}$ mm/an. Ceci restant bien entendu une estimation grossière. Les mesures au marégraphe sont

réalisées à partir d'appareil fixé au sol, donc la mesure obtenue est le niveau marin relatif au sol. Si le sol bouge de quelque mm/an il faudra corriger la tendance observée au marégraphe de ce mouvement afin d'obtenir la tendance « absolue » qui peut réellement être comparée aux mesures altimétriques. Un GPS est situé à 3 km environ de Kerguelen et mesure les variations du sol en altitude, on a donc un mouvement du sol de -0.2 ± 0.3 mm/an qui est sensiblement le même que le mouvement du sol au niveau du marégraphe étant donné le peu de distance entre les deux et surtout qu'aucun aléa géologique (une faille par exemple) ne les sépare. Si on prend en compte cette mesure, on obtient une tendance du signal océanique de -0.2 ± 0.3 mm/an, on peut donc la considérer comme quasiment nulle.

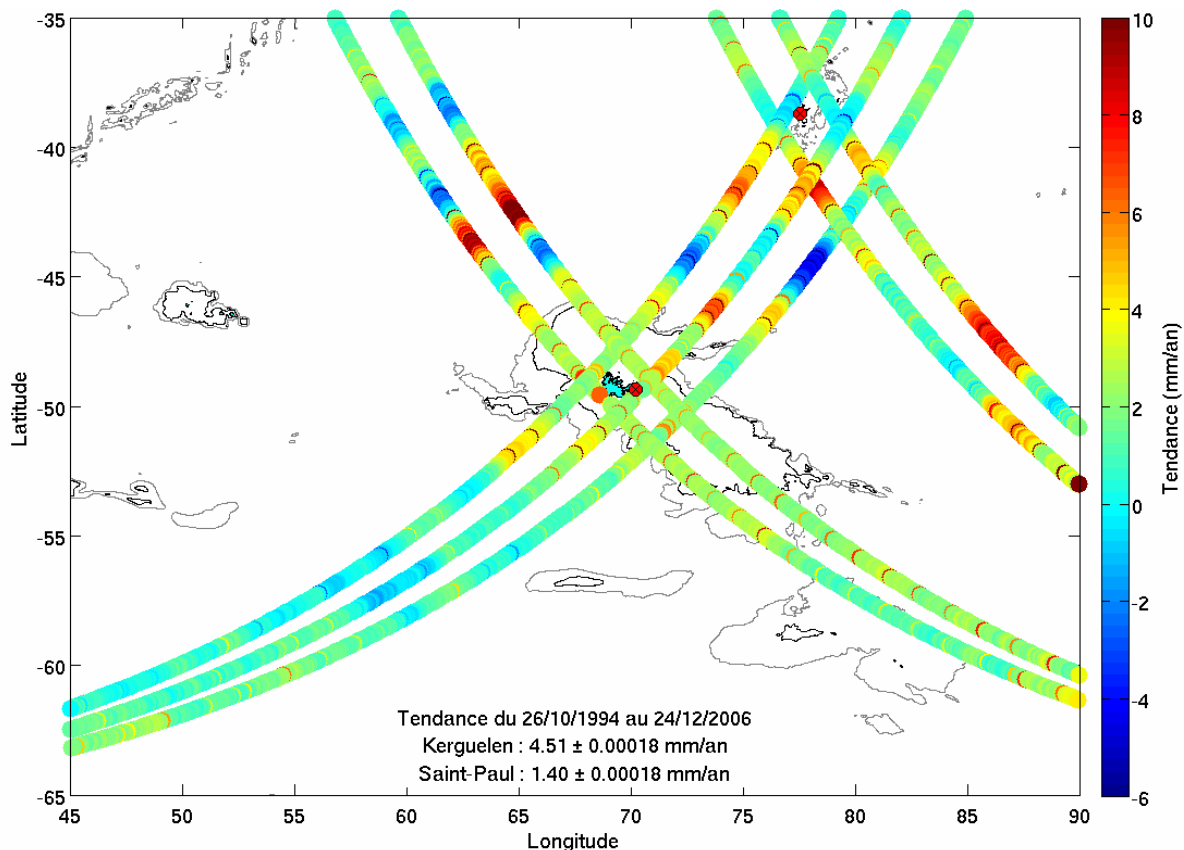


Figure 12 _ Tendance du signal océanique en chaque point des traces et aux points des marégraphes de Kerguelen et Saint-Paul
 Trait noir : isobathe 1000m Trait gris : isobathe 2000m

Sur la carte des tendances, on observe quelques zones, où la tendance observée le long des traces est plus importantes : de l'ordre de 10 mm/an voir plus. La figure 14 montre deux points l'un proche de l'île de Kerguelen et l'autre dans une zone où la tendance calculée est importante. On voit tout de suite que la dispersion des mesures est plus importante dans la zone où la tendance est plus importante, cela est dû au fait que cette région est affectée par de nombreux tourbillon, ce qui va par conséquent joué sur la tendance calculé et sur l'erreur sur la tendance qui va être plus importante pour ce type de région que pour des régions plus calme.

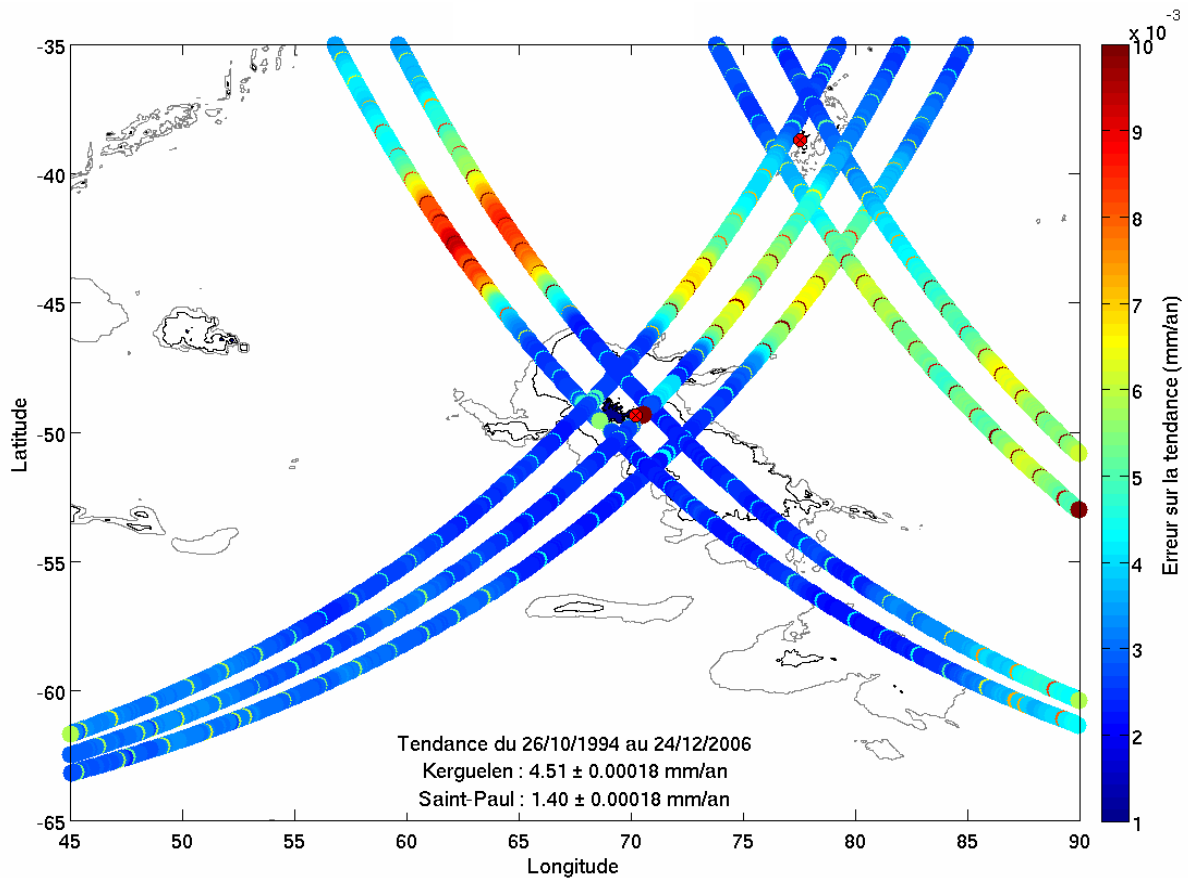


Figure 13 _ Erreur sur la tendance du signal océanique en chaque point des traces et aux points des marégraphes de Kerguelen et Saint-Paul
 Trait noir : isobathe 1000m Trait gris : isobathe 2000m

D. Résultats

L'altimétrie montre une tendance générale du signal océanique de 2 mm/an. Les quelques zones où cette tendance est plus importante ou plus faible correspondent aux zones où les tourbillons sont fréquents et pour lesquelles l'incertitude sur la tendance est plus importantes. Ceci reste cohérent avec les mesures aux marégraphes de Kerguelen et de Saint-Paul (cf. Tableau 1).

Tendance (mm/an)	Kerguelen	Saint-Paul
niveau marin (slev)	$8,5 \pm 1.10^{-3}$	$8,9 \pm 9.10^{-4}$
signal océanique (osig)	$4,5 \pm 2.10^{-4}$	$1,4 \pm 2.10^{-4}$
signal océanique corrigé	$0,0 \pm 1.10^{-3}$	-
signal océanique corrigé de la dérive instrumentale et du "GPS"	$0,2 \pm 0,3$	-
altimétrie (osig)	$\sim 2 \pm 7.10^{-2}$	$0 \text{ à } 2 \pm 2.10^{-3}$

Tableau 1 _ Tableau récapitulatif des tendances

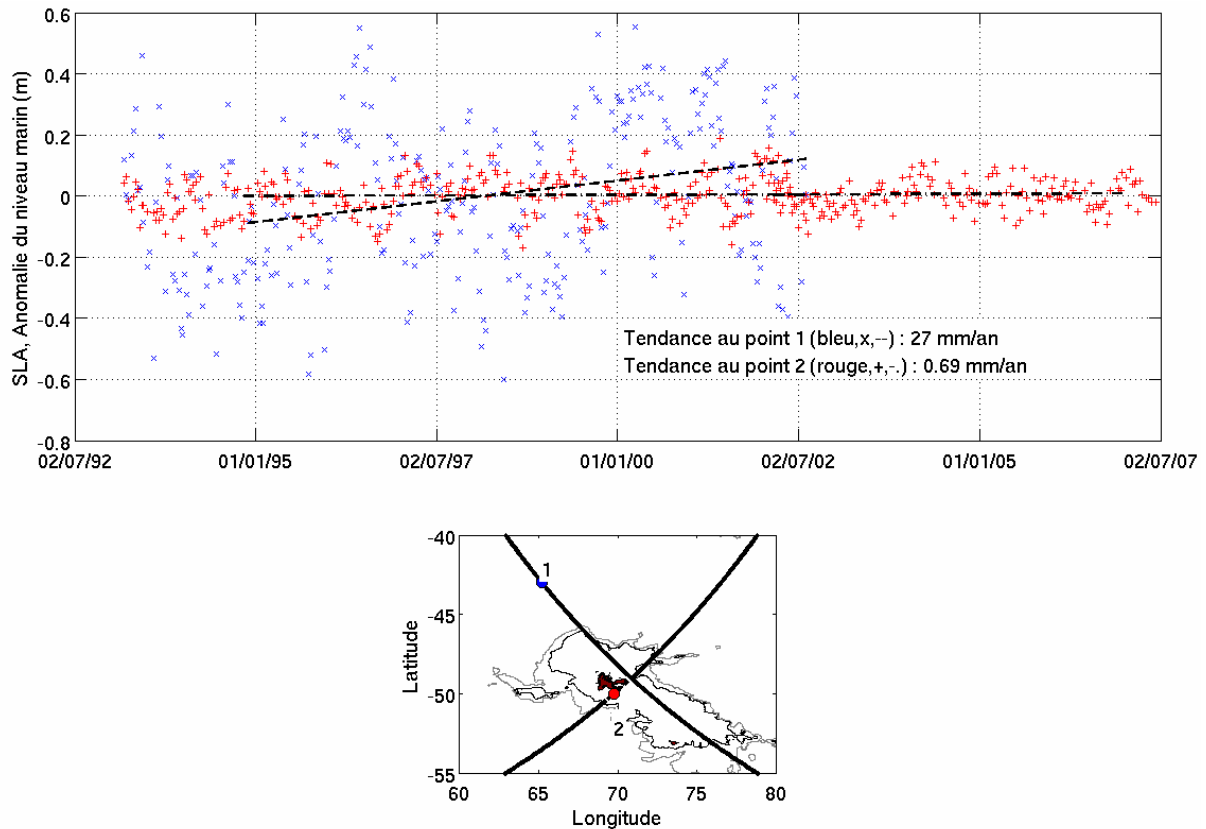


Figure 14 _ Anomalie du niveau marin et tendance de deux points située dans des régions différentes
 Carte : position des points sur les traces et par rapport à Kerguelen
 Trait noir : isobathe 1000m Trait gris : isobathe 2000m

VI. Discussion

Cette étude a permis de montrer deux choses importante : d'une part que les mesures à l'échelle de marée ont une précision qui dépend de l'état de la mer (importance de la houle, par exemple), mais également de la forme du puits. On a montré, d'autre part, que les appareils de mesures dérivaient. Il existe cependant des moyens de visualiser cette dérive rapidement, notamment grâce aux mesures à l'échelle de marée, ou aux radars en ayant auparavant qualifié et validé les mesures. Une fois les corrections de dérive réalisées, il est possible de calculer les tendances et de les comparer aux tendances des mesures altimétriques. L'exemple de Saint-Paul, dans le calcul de la tendance montre bien l'importance d'avoir un nombre d'années de données relativement important pour pouvoir calculer la tendance la plus précise possible. La tendance (corrigée) du signal océanique de Kerguelen est quasiment nulle avec une forte incertitude. La tendance altimétrique de ce signal est de l'ordre de 2 ± 7.10^{-2} mm/an cela reste cohérent au vu des erreurs sur ces tendances. Cette étude montre également l'importance de la connaissance de l'erreur sur la tendance, car si l'incertitude est plus grande que la tendance elle-même alors la tendance peut-être considérée comme nulle.

VII. Conclusion

La validation et la qualification des données sont des étapes importantes avant de réaliser quelque traitement que ce soit sur celles-ci. De plus, une étude théorique préliminaire sur l'influence de la forme d'un puits sur le clapot à l'intérieur de celui-ci permettra d'optimiser la forme de celui-ci, afin d'avoir la meilleure qualité de mesure possible par la suite. De la même façon, l'estimation de la dérive aux marégraphes a permis de calculer des tendances de l'évolution du niveau marin plus juste dans le sens où on applique une correction. Réaliser ce genre de traitement sur l'ensemble des marégraphes situés en mer australe et antarctique permettrait de mieux caractériser l'évolution du niveau marin dans ces régions où les mesures in situ sont plutôt rares et mal réparties spatialement. Cela permettrait de bien valider les mesures altimétriques dans ces régions. De plus seules des données couvrant une grande période permettront de valider l'évolution du niveau marin puisqu'un grand nombre de mesure permet de réduire l'erreur sur la tendance. Une étude historique plus poussée permettrait également de retrouver le niveau marin à des périodes plus anciennes, jusqu'au XIX^e siècle par exemple.

VIII. Bibliographie

- [1] Church J.A. and White N.J. (2006), A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826
- [2] Emery W. et Thomson R., Data analysis methods in physical oceanography, Second and revised edition, *Elsevier*, isbn:0444 50757 4
- [3] Pouvreau N., Martin Miguez B., Simon B., Wöppelmann G. (2006), Evolution de l'onde semi-diurne de la marée à Brest de 1846 à 2005, *C. R. Géoscience*, 338
- [4] Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P., Numerical recipes in FORTRAN : the art of scientific computing – 2nd ed.
- [5] Martin Miguez, B., Perez Gomez B. and Alvarez Fanjul E. (2005), The ESEAS-RI sea level test station: reliability and accuracy of different tide gauges. *Int. Hydrogr. Rev.*, 6(1), 2-11.
- [6] Martin Miguez B., Testut L., Wöppelmann G., The Van de Castele test revisited: an efficient approach to tide gauge error characterization
- [7] Mitchum G.T., Nerem R.S., Merrifield M.A., 20th century sea level rise and variability estimates from tide gauges and altimeters
- [8] Woodworth P.L., Pugh D.T., Meredith M.P., Blackman D.L. (2005), Sea level changes at Port Stanley, Falkland Islands, *J. Geophys. Res.*, 110, C06013, doi:10.1029/2004JC002648.
- [9] Wöppelmann G., Pouvreau N., Simon B. (2006), Brest sea level record: a time series construction back to the early eighteenth, *Ocean Dynamics*, 56, doi:10.1007/s10236-005-0044-z

IX. Annexes

Annexe 1. Protocole de lecture à l'échelle de marée

PROTOCOLE DE LECTURE A L'ECHELLE DE MAREE

(NB : Cette note est inspirée d'une note de l'EPSHOM)

Introduction

- Une mesure de marée est constituée d'un couple (heure, hauteur).
- Le contrôle du marégraphe est une **opération primordiale**. Il a pour but de vérifier que les heures et les hauteurs mesurées par le capteur sont correctes. Il permet aussi le contrôle de la dérive du marégraphe.
- Le principe du contrôle consiste tout simplement à comparer les mesures de hauteur de mer du marégraphe avec des mesures simultanées à l'aide d'un autre instrument de mesure, considéré comme la référence. Cet instrument peut être soit une échelle de marée, soit une sonde lumineuse.

Moyens nécessaires

Matériel

Pour effectuer ces opérations de contrôle, il faut utiliser :

- impérativement, une montre à l'heure (contrôlée par horloge parlante).
- un instrument de mesure de hauteurs :
 - Soit une sonde lumineuse
Une sonde lumineuse est un décimètre ruban au bout duquel est fixée une sonde. Ce ruban est enroulé sur un touret. Il sert à mesurer un tirant d'air, c'est-à-dire la distance séparant un repère installé sur le quai et le niveau de l'eau. La hauteur d'eau se déduit par la connaissance de la cote du repère par rapport au zéro de référence.
 - Soit une échelle de marée installée à proximité du marégraphe
Une échelle de marée est une règle graduée en bois ou en plastique fixée le long d'un quai, et graduée de façon à fournir directement la hauteur de marée.

Personnel

Deux personnes doivent être présentes : 1 personne est chargée d'effectuer les lectures, 1 autre personne indique les tops horaires et remplit le rôle de secrétaire en notant soigneusement les valeurs.

Méthode de lecture

Principe de la lecture à l'échelle de marée

C'est l'instrument de mesure à privilégier pour les contrôles, plutôt que la sonde lumineuse.

L'opérateur interpole à vue les lectures à l'échelle pendant une dizaine de secondes, et note la valeur. Lorsque les conditions météo ne sont pas trop mauvaises, la précision de la lecture est de l'ordre du centimètre.

La valeur lue à l'échelle correspond directement à la hauteur de marée, à un delta près qui correspond à l'écart entre le zéro de l'échelle et le zéro de référence.

Attention : dans certains cas, il faut tenir compte du fruit (inclinaison par rapport à la verticale) du quai. Il faut alors multiplier la valeur lue à l'échelle par le cosinus du fruit pour obtenir la hauteur de marée. Le fruit du quai est une information dont on ne dispose pas forcément, il appartient donc aux opérateurs de chaque port de mentionner ce renseignement sur la feuille de contrôle.

Principe de la lecture à la sonde lumineuse

L'un des opérateurs se place sur un repère nivelé, appelé repère de tirant d'air, implanté au bord du quai à l'extérieur du puits. Le ruban est déroulé le long du quai jusqu'à ce que l'extrémité du ruban soit en contact avec la surface de l'eau. Lorsque la sonde est en contact avec l'eau, une ampoule s'allume sur le touret et une sonnerie retentit. On lit alors, au centimètre près, la graduation sur le ruban au niveau du repère (utiliser un niveau à bulle si le repère dépasse du quai). L'autre opérateur note la valeur dans un cahier d'observations. Cette valeur est une valeur de tirant d'air.

Pour obtenir la hauteur de marée, il faut soustraire le tirant d'air à la cote du repère par rapport au zéro des cartes. Comme dans le cas de l'échelle, il faut tenir compte du fruit éventuel du quai.

Cadence des mesures de contrôles

Cadences des mesures

La figure suivante indique la cadence des mesures du marégraphe. La centrale d'acquisition MARARGOS effectue toutes les **heures rondes** (période d'archivage) une série de mesures qui dure 4 minutes (durée d'intégration = 4 minutes). Pendant ces 4 minutes, le capteur effectue un certain nombre de mesures chaque seconde environ (période d'échantillonnage = 1 seconde environ). La centrale effectue la moyenne de cette série de mesures pendant les 4 minutes. La valeur obtenue (la moyenne), est archivée dans la centrale (elle est datée au milieu de la durée d'intégration, ici l'heure ronde). Une heure plus tard, une nouvelle série de mesures recommence. (cf. figure 2).

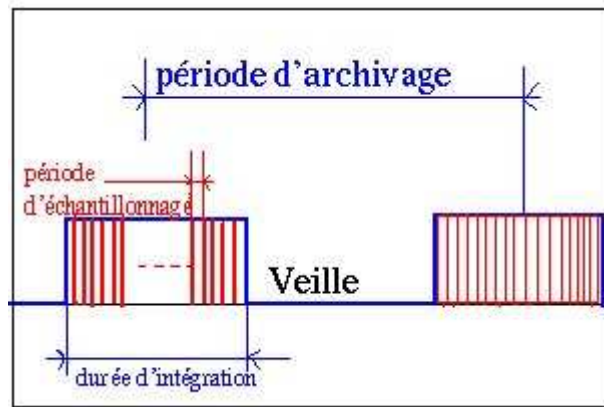


Figure 2

Plages de mesures	7h58 – 8h02	8h58 – 9h02	9h58– 10h02	10h58– 11h02	11h58– 12h02	Etc...
Heure d'archivage	8h00	9h00	10h00	11h00	12h00	Etc...

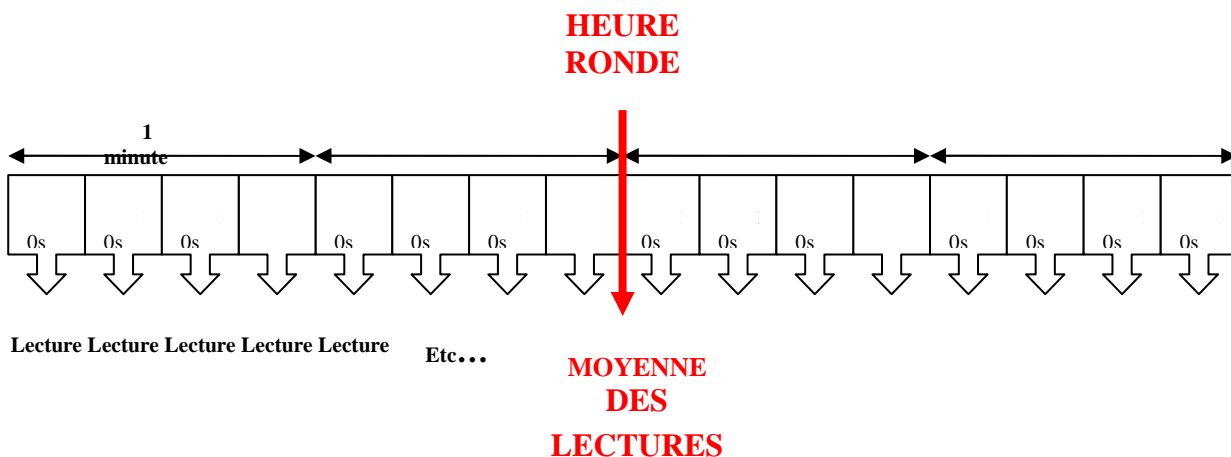
Cadence des mesures de contrôle à effectuer

Par conséquent, les plages des mesures de contrôle doivent être identiques à celles du marégraphe.

Que ce soit à l'échelle de marée ou à la sonde lumineuse, l'opérateur doit donc effectuer des séries de mesures de **4 minutes**. Pendant ces 4 minutes, l'opérateur fait une mesure toutes les 10 s. Il y a donc 24 mesures à effectuer par série. Lorsque les 24 mesures ont été faites, on calcule la moyenne de la série.

Une heure plus tard, on recommence une nouvelle série de mesures. La durée totale doit être de 4 heures au minimum, soit 4 séries de mesures espacées de une heure. L'idéal étant d'effectuer des lectures durant un cycle complet de marée.

SCHEMA DESCRIPTIF D'UNE SERIE DE MESURE



Choix des époques

-On choisira de préférence les conditions de mer les plus calme pour faire les lectures ;

-Ces contrôles doivent avoir lieu au minimum deux fois par mois. A défaut de pouvoir effectuer les lectures durant un cycle entier de marée, les séries de mesures doivent être faites impérativement:

- dans un premier temps aux alentours d'une pleine mer ;
- dans un deuxième temps aux alentours d'une basse mer *pas forcément consécutive*.

Fiche d'observation

A chaque observation de plusieurs heures on complétera la fiche suivante que l'on enverra par mail au format ascii à Laurent.Testut@legos.obs-mip.fr et Philippe.Techine@legos.obs-mip.fr

```
LIEU          : KERGUELEN
OPERATEUR     :
FRUIT DU QUAÏ :
OBSERVATIONS  :
DATE          : 15/02/2003

10:58:00 hauteur en mm (ex : 192)
10:58:10 hauteur en mm
10:58:20 hauteur en mm
10:58:30 hauteur en mm
10:58:40 hauteur en mm
10:58:50 hauteur en mm
10:59:00 hauteur en mm
10:59:10 hauteur en mm
10:59:20 hauteur en mm
10:59:30 hauteur en mm
10:59:40 hauteur en mm
10:59:50 hauteur en mm
11:00:00 hauteur en mm
11:00:10 hauteur en mm
11:00:20 hauteur en mm
11:00:30 hauteur en mm
11:00:40 hauteur en mm
11:00:50 hauteur en mm
11:01:00 hauteur en mm
11:01:10 hauteur en mm
11:01:20 hauteur en mm
11:01:30 hauteur en mm
11:01:40 hauteur en mm
11:01:50 hauteur en mm
11:02:00 hauteur en mm

HEURE DE LA MOYENNE : 11:00:00
MOYENNE DE LA SERIE : moyenne en mm

11:58:00 hauteur en mm
11:58:10 hauteur en mm
11:58:20 hauteur en mm
etc...
```

Annexe 2. Exemples de fichier de lecture à l'échelle de marée

LIEU	: KERGUELEN
OPERATEUR	: AUDE SEMAY, NICOLAS BURLET, OLIVIER HARANT
FRUIT DU QUAI	:
OBSERVATIONS	: HAUTEUR EN CM, HEURES TU
DATE	: 01/06/06
02:58:00	48
02:58:10	50
02:58:20	49
02:58:30	49
02:58:40	49
02:58:50	48
02:59:00	49
02:59:10	48
02:59:20	50
02:59:30	48
02:59:40	48
02:59:50	49
03:00:00	48
03:00:10	48
03:00:20	49
03:00:30	49
03:00:40	49
03:00:50	49
03:01:00	50
03:01:10	49
03:01:20	48
03:01:30	49
03:01:40	49
03:01:50	49
03:02:00	49
HEURE DE LA MOYENNE	03:00:00
MOYENNE DE LA SERIE	48.80

Extrait du fichier Ker-01Juin06.txt _ Exemple des premiers fichiers de lectures à l'échelle

INFORMATION GENERALE SUR LA LECTURE			
LIEU		: KERGUELEN	
OPERATEUR		: Eric ALIX, Adrien MARTIN	
METEO		: Beau Temps, mer tres calme, aucune houle	
OBSERVATIONS		: HEURES TU, HAUTEUR EN CM	
DATE		: 25/09/2007	
Nb HEURES LUES		: 9	
Numero de lecture		43	

Extrait du fichier data_ker_argos_043_250907.xls_ Information générale sur la lecture

BILAN DE LA LECTURE					
	Moyenne	Ecart-Type	Nbr de lect	Obs	
1:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
2:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
3:00	75,53	1,02	49		
4:00	106,27	1,02	49		
5:00	121,98	0,75	49		
6:00	119,55	0,97	47		
7:00	103,61	1,02	49		
8:00	75,94	0,92	49		
9:00	41,92	0,40	49		
10:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
11:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
12:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
13:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
14:00	31,18	0,67	49		
15:00	65,35	1,20	49		
16:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
17:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
18:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
19:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
20:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
21:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
22:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
23:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		
0:00	#DIV/0!	#DIV/0!	0		

Extrait du fichier data_ker_argos_043_250907.xls_Bilan de la lecture : moyennes horaires et nombre de mesures

Qualité	5	5	5
LECTURE A L'ECHELLE DE MAREE / DONNEES BRUTES DE 1H A 6H TU			
0:58:00	1:58:00	2:58:00	3:58:00
0:58:05	1:58:05	2:58:05	3:58:05
0:58:10	1:58:10	2:58:10	3:58:10
0:58:15	1:58:15	2:58:15	3:58:15
0:58:20	1:58:20	2:58:20	3:58:20
0:58:25	1:58:25	2:58:25	3:58:25
0:58:30	1:58:30	2:58:30	3:58:30
0:58:35	1:58:35	2:58:35	3:58:35
0:58:40	1:58:40	2:58:40	3:58:40
0:58:45	1:58:45	2:58:45	3:58:45
0:58:50	1:58:50	2:58:50	3:58:50
0:58:55	1:58:55	2:58:55	3:58:55
0:59:00	1:59:00	2:59:00	3:59:00
0:59:05	1:59:05	2:59:05	3:59:05
0:59:10	1:59:10	2:59:10	3:59:10
0:59:15	1:59:15	2:59:15	3:59:15
0:59:20	1:59:20	2:59:20	3:59:20
0:59:25	1:59:25	2:59:25	3:59:25
0:59:30	1:59:30	2:59:30	3:59:30
0:59:35	1:59:35	2:59:35	3:59:35
0:59:40	1:59:40	2:59:40	3:59:40
0:59:45	1:59:45	2:59:45	3:59:45
0:59:50	1:59:50	2:59:50	3:59:50
0:59:55	1:59:55	2:59:55	3:59:55
1:00:00	2:00:00	3:00:00	4:00:00
1:00:05	2:00:05	3:00:05	4:00:05
1:00:10	2:00:10	3:00:10	4:00:10
1:00:15	2:00:15	3:00:15	4:00:15
1:00:20	2:00:20	3:00:20	4:00:20
1:00:25	2:00:25	3:00:25	4:00:25

Extrait du fichier data_ker_argos_043_250907.xls _ Partie du tableau de lectures (de 1h à 6h TU)

Q : Qualité des données de 0 à 5 selon les conditions générales au moment des mesures
F : Flag indiquant si l'heure de données contient ou non des valeurs inférieures à Hmin=30cm (1 et 0 respectivement), Hmin correspond au seuil au dessous duquel un biais est observé sur la mesure en raison de la forme du puit.

N°	Date	Heure	Nobs	Q	F	Lectures instantanées...					
1	21/10/2003	03:00:00	5	3	0	74.0	74.0	74.0	74.0	74.0	
1	21/10/2003	04:00:00	5	3	0	71.0	72.0	71.0	72.0	72.0	
1	21/10/2003	05:00:00	5	3	0	64.0	63.0	63.0	63.0	63.0	
1	21/10/2003	06:00:00	5	3	0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	
1	21/10/2003	07:00:00	5	3	0	39.0	38.0	38.0	38.0	38.0	
1	21/10/2003	08:00:00	5	3	1	23.0	22.0	22.0	22.0	21.0	
1	21/10/2003	09:00:00	5	3	1	14.0	15.0	14.0	14.0	14.0	
...											
2	07/11/2003	14:00:00	5	1	0	73.0	73.0	73.0	73.0	74.0	
3	24/12/2003	01:00:00	25	0	1	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0 ...
3	24/12/2003	02:00:00	25	0	1	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0 ...
3	24/12/2003	01:00:00	25	0	1	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0 ...
3	24/12/2003	02:00:00	25	0	1	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0 ...
3	24/12/2003	03:00:00	25	1	1	25.0	25.0	26.0	25.0	25.0	26.0 ...
3	24/12/2003	04:00:00	25	1	0	68.0	68.0	68.0	67.0	68.0	68.0 ...

Extrait du fichier des lectures instantanées avec qualité et flag : lect_brutes.txt

cf. le fichier lect_brutes.txt pour des explications sur Q et F

n°	Date	Heure	Nobs	Q	F	Moy	r obs	r moy
1	21/10/2003	03:00:00	5	3	0	74.00	0.00	0.00
1	21/10/2003	04:00:00	5	3	0	71.60	0.55	0.24
1	21/10/2003	05:00:00	5	3	0	63.20	0.45	0.20
1	21/10/2003	06:00:00	5	3	0	50.00	0.00	0.00
1	21/10/2003	07:00:00	5	3	0	38.20	0.45	0.20
1	21/10/2003	12:00:00	5	3	0	35.80	0.45	0.20
1	21/10/2003	13:00:00	5	3	0	56.40	0.55	0.24
1	21/10/2003	14:00:00	5	3	0	81.80	0.84	0.37
1	21/10/2003	15:00:00	5	3	0	89.00	1.00	0.45
2	07/11/2003	02:00:00	5	1	0	47.20	0.45	0.20
2	07/11/2003	03:00:00	5	1	0	85.40	1.14	0.51

Extrait du fichier des lectures : lect_traitees.txt
