

Rapport de Stage

Sujet: Etude de la marée dans l'estuaire de la Loire en réalisant des comparaisons, des observations et des prédictions

Stagiaire: Garnier Thibault

Encadrant: Mme Brenon Isabelle

Maitre de Stage: M. Weber Nicolas

Période: Du Lundi 15 Avril 2013 au Vendredi 24 Mai 2013

Laboratoire d'accueil : Service hydrographique et océanographique de la marine

Table des matières

I°/ Introduction :.....	3
II°/ Contexte.....	3
III°/ Données et méthodes.....	4
3.1) Choisir les données.....	4
3.2) Les méthodes et outils:.....	5
IV°/ Résultats :.....	6
4.1) Comparaison « avec et sans » le débit Fluvial :.....	6
4.2) Comparaison des méthodes.....	7
4.3) Résidus finals:.....	8
4.4) Concordance.....	9
V°/ Discussion.....	9
VI °/ Conclusion.....	9
Bibliographie.....	10

Remerciements :

Je tiens à remercier dans un premier temps l'ingénieur en chef des études et techniques de l'armement Henri Dolou, Directeur des ressources humaines, m'autorisant à réaliser ce stage au sein du SHOM.

Je remercie également mon maître de stage, M. Weber Nicolas responsable des produits marée et courant au sein du département Hydrodynamique côtière, pour m'avoir accueillis et aidé tout au long de cette expérience enrichissante.

Enfin je remercierai toute l'équipe pour leur accueil, leur gentillesse et leur entraide pour le bon déroulement de mon stage.

I°/ Introduction :

Le SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine) est un établissement public sous la tutelle du Ministère de la Défense. Le SHOM a pour but de garantir la qualité et la disponibilité des informations nautiques conformément aux obligations internationales de la France. Cet établissement comportant de nombreux services, j'ai eu le privilège d'intervenir dans la direction des opérations de la production et des services, dans la division « Maitrise de l'information et produits mixtes » sous la responsabilité de M. Weber Nicolas.

Le SHOM possède des archives dans plusieurs domaines, la marée, la sédimentologie, la bathymétrie et autres thèmes caractérisant l'environnement marin. L'établissement possède donc un multitude de données marégraphiques et en tant que réfèrent national du niveau de la mer (REFMAR) recueille des enregistrements collectés par d'autres organismes comme les grands ports maritimes. L'objectif de cette étude a été d'étudier la marée dans l'estuaire de la Loire à partir des observations de hauteurs d'eaux fournies par le GPM Nantes Saint-Nazaire. En utilisant plusieurs méthodes et lots de données. Le but était de définir les constantes harmoniques les plus précises possible permettant de calculer des prédictions de marées fiables sur cette zone.

II°/ Contexte

Mon étude concernait l'estuaire de la Loire. Les problèmes majeurs des prédictions de marée dans un estuaire sont en autres :

- La distorsion de la courbe de marée en eau peu profonde ;
- L'effet de la variation du débit fluvial.

En effet, dans un estuaire, la courbe de marée qui est quasiment sinusoïdale à l'embouchure se déforme de plus en plus en se déplaçant vers l'amont de l'estuaire. Du fait des deux phénomènes précédents cités, il est donc difficile de prédire la marée lorsque l'on se déplace en amont de l'estuaire.

Notre étude s'est faite grâce aux données issues de cinq marégraphes disposés le long de l'estuaire de la Loire (figure 1) :

- Saint-Nazaire (port de référence)
- Donges
- Cordemais
- Le Pellerin
- Nantes



figure 1: carte du site étudié

III°/ Données et méthodes

3.1) Choisir les données

Les données disponibles sont des hauteurs d'eau à pas de temps horaires brutes. Celles-ci comportaient des coupures ainsi que quelques artéfacts et n'étaient pas enregistrées sur les mêmes périodes. La figure 2, montre les données utilisables pour l'ensemble des sites depuis 1964.

Saint Nazaire	1 Janvier 1964	31 Decembre 1988	2008 ...
Donges		1 Janvier 1983	22 Juin 2011
Cordemais		1 Janvier 1986	17 Septembre 2011
Le Pellerin		1 Janvier 1986	17 Septembre 2011
Nantes		1 Janvier 1987	17 Septembre 2011

figure 2: tableau des données utilisables

La caractérisation de la marée a été effectuée pour 3 principales plages de données :

- De 1986 à 1996 ;
- De 2000 à 2010 ;
- De 2003 à 2006 .

Les deux premières plages de données ont été choisies afin d'avoir la même durée d'observation et ainsi pouvoir les comparer entre elles. En prenant des durées de dix ans, nous avons donc une observation longue comportant un maximum d'informations se rapprochant alors au mieux de la réalité. Or, sur ces deux plages d'observations les variations du débit du fleuve sont également enregistrées. Ainsi, nous avons constitué un troisième jeu afin de s'affranchir de l'effet du fleuve.

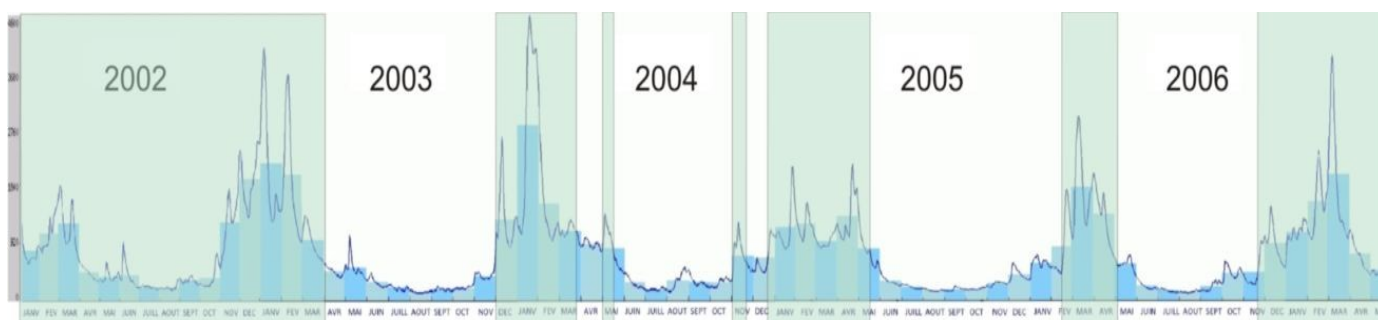


figure 3: graphe du débit fluvial à Nantes

Par l'intermédiaire du site de la banque hydro (www.hydro.eaufrance.fr), contenant des données de débits journaliers et mensuels implantés sur les cours d'eau français, nous avons observé les différents débits fluviaux à Nantes (seules données les plus en aval).

La période de 2003-2006 (figure 3) présentait certes d'importantes crues augmentant le débit fluvial, mais celles-ci étaient de courtes durées et principalement printanières. En supprimant ces périodes de crues dans les observations et en faisant bien attention que notre étude comportait au moins un des chaque mois de l'année, nous avons pu obtenir une durée d'observation moins perturbée par les variations du débit fluvial.

3.2) Les méthodes et outils:

MAS :

Le logiciel MAS sous Unix, est un programme d'analyse de la marée utilisé par le SHOM. Il permet notamment de définir au maximum les 143 constantes harmoniques principales de la marée (annuelles, mensuelles, diurnes., semi diurne jusqu'au 8ième diurne..) qui sont caractérisées par leurs amplitudes et leurs phases comme l'on peut voir dans la figure 4. Il existe trois méthodes dans MAS pour l'extraction de ces constantes.

- Méthode 1: L'analyse harmonique automatique
- Méthode 2: L'analyse harmonique comme pour la méthode 1, mais avec une liste d'ondes données.
- Méthode 3: L'analyse

	0398	+471232	-0014591	+010LE_PELLERIN		
NIV MOY	375.19360.00	55555	1000	0	0	
SA	18.30314.92	56555	1000	0	0	
SSA	3.36346.92	57555	1000	0	0	
MM	6.01 33.51	65455	1000	-66	-65	
MSF	11.96 33.37	73555	1000	72	-64	
MF	2.42 0.29	75555	1000	0	414	

figure 4: fichier de constantes harmoniques

harmonique par concordance par espèce est une analyse faisant intervenir les relations entre les éléments d'un port de référence (ici St Nazaire) et d'un port secondaire.

C'est à partir de ces constantes que le programme détermine une marée prédite que l'on compare alors aux observations.

SCILAB :

Scilab est un logiciel libre de calcul numérique avec lequel j'ai réalisé un programme afin de pouvoir importer nos fichiers de prédictions de marée et ainsi les comparer aux observations. Ce programme a permis de tracer les courbes sur une période donnée (figure 5) afin de voir si les constantes harmoniques utilisées permettaient de reproduire la marée le plus précisément possible, c'est à dire, voir si l'onde de marée se déformait de la même façon que la réalité. Ce programme nous a aussi permis de tracer le résidu de la différence entre les prédictions et les observations et ainsi, voir si le calage temporelle (PM/BM) et vertical (différence de hauteur d'eau) se rapprochaient au mieux des observations.

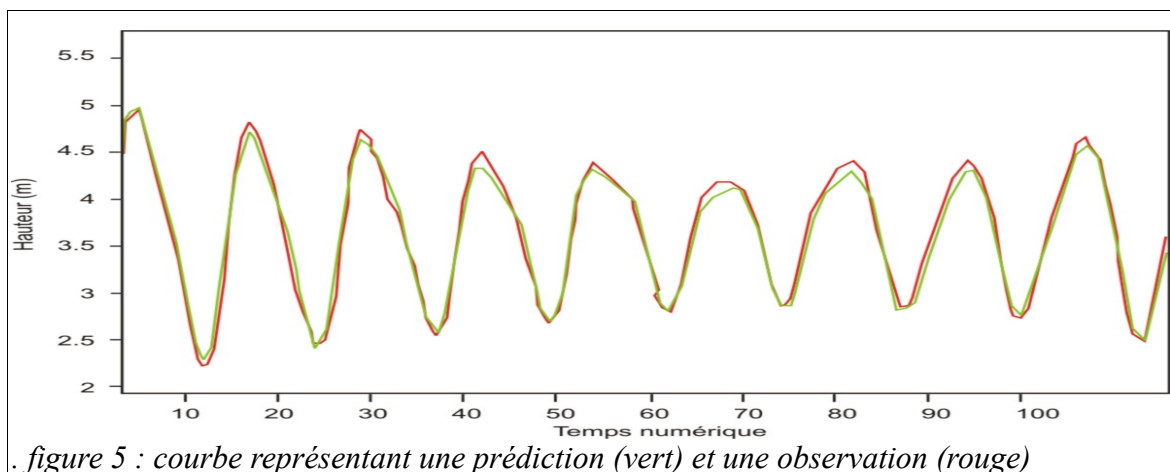


figure 5 : courbe représentant une prédiction (vert) et une observation (rouge)

CSTCOMPAR :

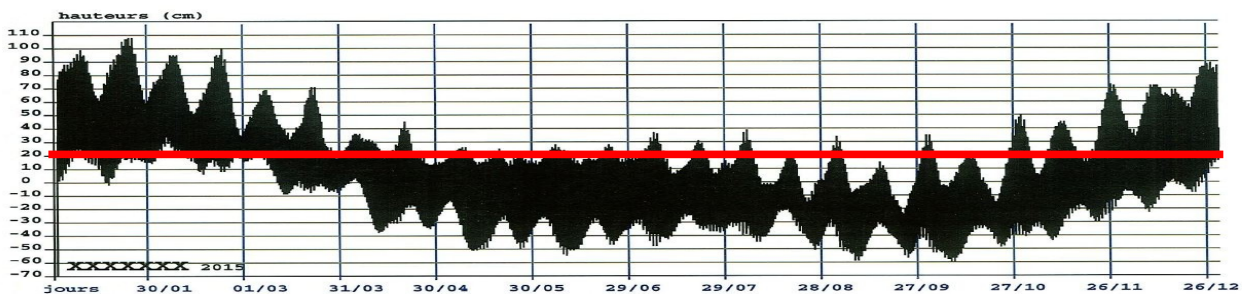
Ce programme du SHOM permet de comparer deux jeux de constantes harmoniques. Il nous donne à la fois une comparaison entre deux méthodes mais aussi entre deux jeux de données. Il permet aussi de mettre en évidence l'influence de certains types d'ondes, notamment de longues périodes (Sa, Ssa, ...) et les calages verticaux, comme le niveau moyen ou l'importance de l'écart des hauteurs d'eau. Il est alors possible de définir une méthode préférentielle à la fin de ces comparaisons.

IV°/ Résultats :

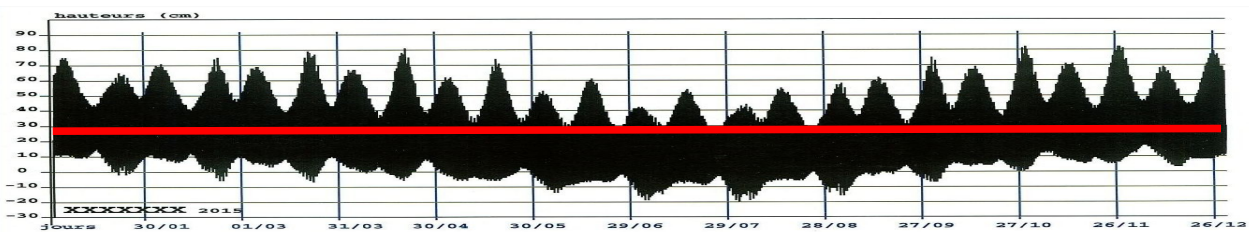
4.1) Comparaison « avec et sans » le débit Fluvial :

Nantes est la ville la plus en amont de notre étude. Par conséquent, il s'agit du marégraphe le plus exposé à la variation du débit fluvial. Plusieurs méthodes sont utilisées pour prendre en compte le débit du fleuve dans la prédiction de marée. On peut réaliser par exemple une prédiction de marée par rapport au niveau « moyen » du fleuve, mais la répartition du débit fluvial est trop asymétrique pour avoir une fiabilité. Il est aussi possible de prendre en compte la moyenne des variations annuelles du débit fluvial, cependant cette méthode n'est bonne que si le fleuve connaît de légère variation. Or, ici le débit évolue de $250\text{m}^3/\text{s}$ jusqu'à $4300\text{m}^3/\text{s}$, ce qui est donc trop important.

L'autre solution, que nous avons choisie pour prédire au mieux nos hauteurs d'eau, consistait à calculer des constantes harmoniques en supprimant les crues (jeu de donnée 2003-2006).



. figure 8: Comparaison des constantes harmoniques calculées avec la méthode 2 (2003-2006) avec et sans crues .



. figure 9: Comparaison des constantes harmoniques calculées avec la méthode 3 (2003-2006) avec et sans crues .

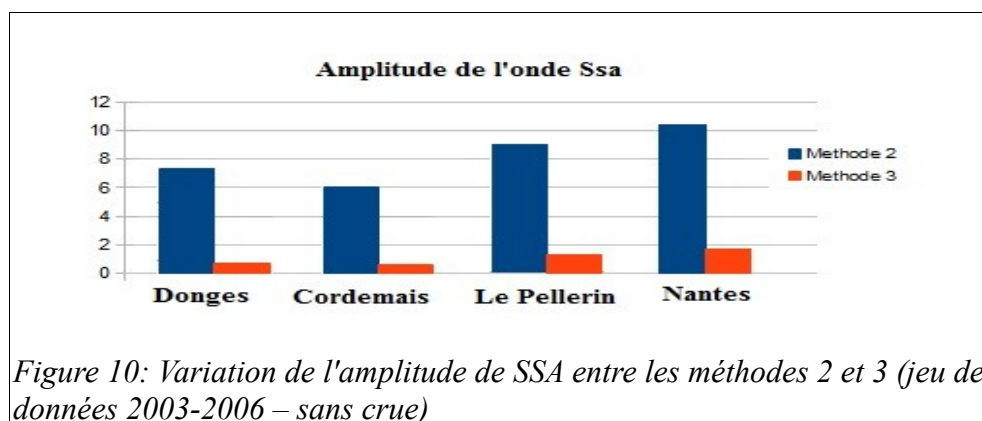
Afin de voir l'impact des crues sur les constantes harmoniques, nous avons appliqué la même méthode d'extraction de constantes sur un jeu de données comportant les crues et l'autre ne les comportant pas.

Nous avons ensuite comparé ces constantes de marées. La figure 8, correspondant à la méthode 2, montre une variation très importante. La différence entre les deux fichiers de constantes semble très inégales puisque l'on atteint des différences des hauteurs allant de -80 jusqu'à 110 cm. De plus, une onde annuelle ou semi-annuelle semble apparaître. Concernant la méthode 3 (figure 9), celle-ci semble plus régulière et les variations de hauteurs sont moindres que pour la méthode 2 par contre, il existe un écart important de niveau moyen illustré par le décalage général des différences vers le haut du graphe. On s'aperçoit que le débit fluvial a tendance à modifier les fichiers de constantes et notamment en influençant plus ou moins les amplitudes et phases du niveau moyen et des ondes de longues périodes. Ceci induit donc que ces crues doivent être écartées au maximum pour ne pas perturber la détermination des constantes harmoniques.

4.2) Comparaison des méthodes

Le choix de la méthode est essentiel pour une prédiction de marée dans un estuaire. Nous avons donc comparé les méthodes en s'étant affranchi auparavant de l'influence des crues. Le jeu de données de 2003 à 2006 sans crues a donc été utilisé pour réaliser les constantes harmoniques.

Nous avons analysé l'amplitude des constantes et notamment les ondes SSA (semi-annuelles) par leur évolution très différente d'une méthode à l'autre.



L'onde semi-annuelle est l'une des ondes qui varie le plus entre la méthode 2 et la méthode 3 (figure 10). La méthode 2 augmente l'amplitude de cette onde d'une façon considérable (x5 à Nantes) par rapport à la méthode 3. Nous avons pris ici le choix de l'onde SSA car cette augmentation est flagrante mais pour les autres ondes tel que la SA (annuelle) ou les Msf (bimensuelle) on observe exactement le même phénomène.

Nous avons réalisé les prédictions de marée avec ces deux méthodes puis nous avons comparé les hauteurs d'eau prédites à celles observées via les graphes des résidus. Comme le montre la figure 11, les écarts entre les deux méthodes sont identiques pour les deux premiers marégraphes, cependant en se déplaçant en amont de l'estuaire, la différence augmente alors considérablement pour la méthode 2 contrairement à la méthode 3 qui elle, n'évolue que légèrement.

	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes
Méthode 2	+/- 25cm	+/- 30cm	+/- 50cm	+/- 50cm
Méthode 3	+/- 25cm	+/- 30cm	+/- 35cm	+/- 35cm

. figure 11: Différence entre les hauteurs d'eau prédites et observées

La méthode 2 ne permet donc pas la prédiction de la marée en amont de l'estuaire. Les constantes sont considérablement modifiées induisant alors des écarts avec les observations. C'est pour cela que nous n'avons utilisé que la méthode 3 pour les sites les plus en amont: Le Pellerin et Nantes. Pour Donges et Cordemais, l'écart entre les deux méthodes étant du même ordre, il n'y a pas de méthode qui prime sur une autre, les deux sont aussi fiable. Cependant pour le reste de notre étude, nous avons gardé la méthode 3 pour avoir une méthode identique entre chaque prédictions.

4.3) Résidus finals:

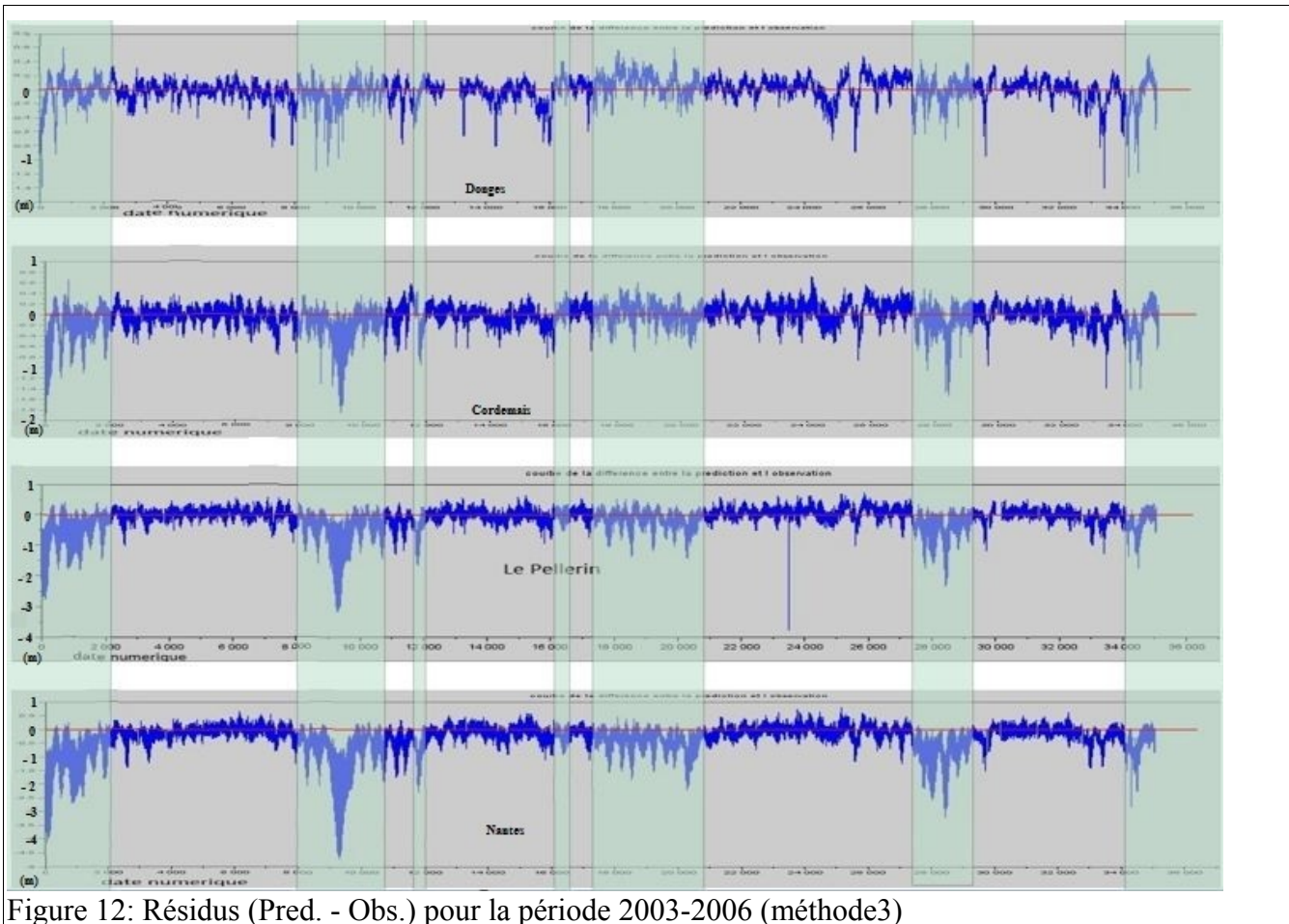


Figure 12: Résidus (Pred. - Obs.) pour la période 2003-2006 (méthode3)

En utilisant un jeu de données ne comportant plus de crues et en appliquant la méthode la plus pertinente, nous avons réalisé les graphes des différences entre les prédictions et les observations comme le montre la figure 11. Ainsi en dehors des périodes de crues, les différences observées s'avèrent assez faibles (de l'ordre de +/-20 cm).

4.4) Concordance

«La concordance consistent à rattacher les heures et hauteurs de marée observée en un point appelé port rattaché, aux éléments correspondants observés en un autre point appelé port de référence. On peut alors prédire la marée au port rattaché lorsque la marée au port de référence est connue.

On dit qu'il y a concordance entre la marée de deux ports si chacun des éléments de la marée d'un port dépend uniquement de l'élément correspondant de la marée de l'autre port. Cette méthode permet de choisir le zéro hydrographique d'un port rattaché.» Voineson G.,(2011). Mesure des hauteurs d'eau.

Nous avons réalisé une concordance entre le port de Saint Nazaire qui est le port de référence pour cet estuaire. Cela nous a permis de se recalibrer par rapport au zéro hydrographique (zéro des cartes marines) pour chaque site étudié.

V°/ Discussion

Nous avons donc pu voir que le débit fluvial était un paramètre qui influençait énormément les résultats de prédiction de marée. En effet, celui-ci a tendance à faire augmenter le niveau moyen et modifie de façon importante les valeurs de certaines constantes harmoniques notamment les ondes de longues périodes. Ainsi, ce paramètre doit être pris en considération pour le choix des données à utiliser pour la détermination des caractéristiques de la marée en zone d'estuaire : en recherchant des périodes comportant moins de crues ou de plus faible amplitude. L'observation des comparaisons de constantes ainsi que l'étude des graphes de résidus à montrer que l'influence du débit fluvial est très important au niveau de Nantes, s'atténue à partir de Cordemais pour quasiment s'estomper au niveau de Donges.

Pour ce qu'y est de la méthode, nous savons maintenant que celle par concordance par espèce est la meilleure pour réaliser une prédiction de marée au niveau de Nantes. En aval de cette ville, les perturbations du débit fluvial s'atténuant, la méthode d'analyse harmonique (méthode 2) convient également. A Saint Nazaire où l'influence océanique est dominante et la méthode d'analyse harmonique est alors à privilégier.

Cependant, sur toutes les comparaisons de prédictions et d'observations il subsiste une légère variation (20 cm max) de période d'environ 15 jours. Cela peut s'expliquer par la périodicité des vives et mortes eaux. La différence de hauteur entre la prédiction et l'observation serait donc proportionnel au marnage. La seconde explication pourrait s'expliquer par les débordement du fleuve lors des grands coefficients de marée. En effet, dès lors que le coefficient de marée atteint une certaine amplitude, le fleuve aurait tendance à sortir de son lit pour inonder certaine zone ce qui expliquerait le déficit d'eau en pleine mer. Ceci dit, cela reste une piste à approfondir que je n'ai pas eu le temps d'étudier.

VI °/ Conclusion

Nous pouvons conclure que nos fichiers de constantes harmoniques sont maintenant fiables pour les 5 lieux étudiés. Ils permettent en effet de reproduire très précisément la marée en étant calé au zéro

hydrographique. Ainsi ces fichiers vont être introduits dans les produits du SHOM pour la prédiction de marée dans l'estuaire de la Loire. Toutefois, les hauteurs d'eau prédites pourront diverger avec les observations si le débit fluvial augmente. Il risque d'y avoir une hauteur d'eau observé supérieur à la prédiction. Mais pour la navigation cela n'est pas perturbant car le niveau sera surélevé par rapport aux prédictions et non sous évalué. Ce qui va dans le sens de la sécurité pour la navigation .

Ce stage aura été très positif. Il m'aura permis d'approfondir mes connaissances mais aussi mon savoir faire. En effet, ces six semaines au SHOM m'auront permis de compléter mes connaissances sur marée. Mon savoir faire dans le domaine informatique aura tout aussi été enrichi. L'utilisation de Scilab m'a permis de pouvoir appliquer les cours de programmation suivis le long de mon cursus universitaire, et m'a aussi permis d'apprendre de nouvelles fonctionnalités.

L'opportunité d'entrer et de découvrir l'établissement du SHOM m'aura aussi permis d'en savoir un peu plus sur les métiers liés à l'hydrographie et plus particulièrement la recherche marégraphique. En effet, j'ai découvert que la modélisation et la programmation étaient avant tout des outils informatiques indispensables afin de traiter les données acquises précédemment. De plus, j'ai pu découvrir l'entraide et le travail en équipe au sein de cet établissement. Leurs missions et leurs sujets de travail n'étant pas forcément le même, chacun possède une spécialité permettant alors de pouvoir aider et enrichir les connaissances d'un autre.

Pour conclure, je peux dire que ce stage m'aura énormément apporté sur mon projet de carrière. En ayant participé à un très bon sujet de stage, j'ai pu découvrir le fonctionnement d'un établissement tourné à la fois vers la recherche mais également un service opérationnel fournissant des produits destinés à de multiples utilisateurs des données littorales, ce qui continue de me donner l'envie de poursuivre mon cursus scolaire dans ce domaine.

Bibliographie :

- Dr K.J.GEORGE. Juillet 1981. *La marée dans l'estuaire de la Loire*. SHOM, 1981 : 93 p
- Simon.B , 2007. *La marée : la marée océanique côtière*. Institut océanographique, Avril 2007 : 433 p
- Voineson G. 2011. *Mesure des hauteurs d'eau*, référentiel documentaire du SHOM.
- *CAHIER 2002 INDICATEURS , 2002. Les amplitudes de l'onde de marée (L1 A1) ; Les apports d'eau douce dans l'estuaire (L1 C1)*. Loire Estuaire Cellule de Mesures et de Bilans
- Banque hydrométéorologique de france : <http://www.hydro.eaufrance.fr>