

# N'y a-t-il vraiment pas d'hydrométrie dans les secteurs sous influence maritime ?

Laurent DIEVAL<sup>1</sup>, Sylvain CHESNEAU<sup>1</sup>, Romain GALLEN<sup>1</sup>, Yan LACAZE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de Nouvelle-Aquitaine – Cité administrative, 5 rue Jules Ferry – prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr

*L'influence maritime dissuade ou limite la capacité à produire une information en débit sur les secteurs de rivières où marée et débit contrôlent la hauteur mesurée. C'est le cas sur plusieurs tronçons du territoire de compétence du Service de Prévision des Crues Gironde Adour Dordogne, selon divers degrés d'importance. Pourtant le débit est la variable hydrologique préférentielle pour la prévision des crues. Dans la perspective de mise au point d'outils de prévision de crue, l'analyse des enregistrements des stations sous influence maritime nous a permis de mettre en évidence une signature plus ou moins marquée des crues et donc du débit. Afin d'explicitier le comportement de la hauteur aux points d'étude doublement influencés par la marée et le débit, notre démarche consiste à extraire les composantes indépendamment les unes des autres considérant un principe de superposition entre la marée astronomique, la surcote et le débit, à partir des enregistrements non influencés en amont (débit seul) et aval (marée et surcote). La signature du débit est isolée dans le signal sous influence maritime. Il en résulte une influence variable du débit selon le niveau de marée, que l'on peut paramétrer. Les relations multi-paramètres construites permettent alors de déduire la hauteur en fonction du débit et de la marée. Si l'étude a été menée avec le débit, propagé depuis l'amont et bien connu, les pratiques classiques de l'hydrométrie doivent pouvoir être envisagées et le recours à des jaugeages dans des conditions bien précises (à l'étape par exemple) doivent permettre d'ajuster ces relations aux sites étudiés.*

*Mots-clefs : Influence maritime, hydrométrie, prévision de crues*

## *Does it worth it to gauge under tidal influence ?*

*The maritime influence discourages or limits the ability to precisely estimate the flow in river areas where tide and flow both control the measured height. This is the case on several sections of the Flood Forecast Service - Gironde Adour Dordogne, to varying degrees of importance. Yet the flow is the preferred variable of interest for hydrological flood forecasting methods. In order to develop flood forecasting tools, the analysis of height recordings under tidal influence allowed us to show the presence of risings and floods. To demonstrate the evolution of the height at locations both influenced by the tide and the river discharge, our approach is to extract the components independently of each other considering a principle of superposition between the astronomical tide, storm surge and flow. This is achieved through the exploitation of upstream records of discharge not influenced by the tide on one side, and downstream records of tide on the other side. The component depending on the flow rate is isolated in the signal under tidal influence. This results in a variable influence of the flow rate depending on the level of the tide, which can be parametrized. The multi-parameter relationships built are then used to deduce the height depending on the flow and tide. Given that the study was focused on the flow rates, spread from upstream and well-known, traditional hydrometric practices of water quantification can be envisioned and the use of gauging in specific conditions (at slack for instance) should allow to adjust these relations to the studied sites.*

*Key words : Tidal influence, hydrometry, flood forecast*

## I INTRODUCTION

Le Service de Prévision des Crues Gironde-Adour-Dordogne (SPC GAD) de la DREAL Nouvelle-Aquitaine assure la mission de surveillance du risque d'inondation pour plusieurs tronçons de rivières des bassins de l'Adour, de la Nivelle, de la Dordogne, de la Garonne et de l'estuaire de la Gironde. Sur tous ces cours d'eau, le risque de débordement de certains secteurs est généré ou aggravé par l'influence maritime. Ainsi l'estuaire de la Gironde, la Dordogne à l'aval de Libourne, la Garonne à l'aval de la Réole, l'Adour à l'aval de Dax, les Gaves Réunis et la Nive depuis Villefranque, tous ces secteurs sont à divers degrés sous influence maritime.

La procédure de vigilance crues consiste à qualifier le risque d'inondation dans les 24 heures à venir sur un tronçon de rivière, selon une échelle de gravité de 4 niveaux : vert, jaune, orange et rouge. Elle est publiée

deux fois par jour sur le site Vigicrues et complétée par des prévisions chiffrées pour les stations de mesure, actualisées en tant que de besoin. Afin d'anticiper le risque avec un horizon de l'ordre de 24 heures, il est nécessaire d'utiliser le débit comme variable hydrologique de référence. Elle permet de modéliser la transformation pluie-débit et de prévoir la propagation des crues. C'est également le cas dans les secteurs sous influence maritime cités ci-dessus, compte tenu de la célérité des variations de débit des rivières concernées. Or à ce jour il n'y a pas de données hydrométriques en débit sur ces secteurs doublement influencés. Les capteurs limnimétriques installés dans les zones à enjeu enregistrent et transmettent les mesures des hauteurs acquises en continu au pas de temps 5 minutes.

Notre étude répond au besoin d'extension ou d'amélioration de la prévision en ces points. Notre objectif est de caractériser la signature du débit dans le signal sous influence maritime, dans le contexte exigeant de la prévision des crues. Certaines études [Cai, 2015 ; 2016] menées par approches purement hydrauliques ont montré une influence mutuelle des débits et de l'onde de marée sans se focaliser sur les hauteurs en différents points d'estuaires. Des approches fréquentielles telle que celle de [Moftakhari, 2013] ont cherché à évaluer les débits sans disposer de stations limnimétriques ni de jaugeages à l'amont à travers un indicateur du débit dévalant déduit à partir des écarts entre hauteur observée et hauteur théorique à l'embouchure. Cette méthode n'est cependant pas compatible avec les attentes d'un service de prévision des crues.

Pour ce faire, notre démarche consiste à considérer que trois composantes indépendantes se superposent pour former le signal enregistré : la marée théorique, la surcote et le débit [Reis, 2009]. Ces composantes sont isolées les unes des autres à partir des enregistrements non influencés en amont (débit seul) et aval (marée et surcote) qui sont ensuite propagés jusqu'au point d'étude. Nous présentons ici les résultats pour un secteur en particulier, dont nous décrivons dans un premier temps les caractéristiques hydrologiques, avant d'étendre la méthode à d'autres stations. Nous mettons en évidence une relation simple à plusieurs paramètres donnant la hauteur à la station sous double influence, en fonction du débit ; un premier pas vers l'hydrométrie. Il n'existe en effet pas de doctrine claire pour une hydrométrie en zone estuarienne et il est recommandé, en conditions standards, de se tenir hors zone d'influence de marées [WMO, 2006]. Pour aller plus loin d'un point de vue hydrométrique, on peut néanmoins envisager une application réciproque des relations (*i.e* une relation hauteurs-débit) sous réserve de jaugeages menés dans des conditions appropriées pour en définir la valeur des coefficients.

## II SITE ET HYDROLOGIE DU CAS D'ÉTUDE

### II.1 Le bassin versant de la Nive

La Nive prend sa source en Espagne, mais c'est essentiellement le Pays basque français qu'elle traverse, pour se jeter dans l'Adour à Bayonne, à six kilomètres environ de son embouchure. Avec un bassin versant qui culmine à près de 1500 mètres, l'influence nivale est faible. Les précipitations y sont abondantes et le régime hydrologique soutenu. A Cambo-les-Bains par exemple, pour un bassin versant de 870 km<sup>2</sup>, le module est de 30,2 m<sup>3</sup>/s, soit une lame d'eau annuelle écoulée de 1100 mm environ. Les crues s'y forment très rapidement (temps de réponse du bassin versant à Cambo-les-Bains de l'ordre de 10 heures) et peuvent générer d'importants débits instantanés (crue décennale estimée à 750 m<sup>3</sup>/s). En quelques heures, la crue se propage jusqu'à Bayonne où la Nive rejoint l'Adour, et 6 kilomètres plus loin à Anglet, les eaux de l'océan Atlantique.

L'onde de marée, mesurée au marégraphe d'Anglet, se propage quant à elle dans l'estuaire de l'Adour, et remonte la Nive jusqu'à un seuil artificiel qu'elle ne peut dépasser à Ustaritz. À Bayonne, sur l'Adour et sur la Nive, l'onde s'est très peu transformée et des événements maritimes importants (forts coefficients de marée associés à une surcote météorologique) suffisent à générer des débordements dommageables. Si

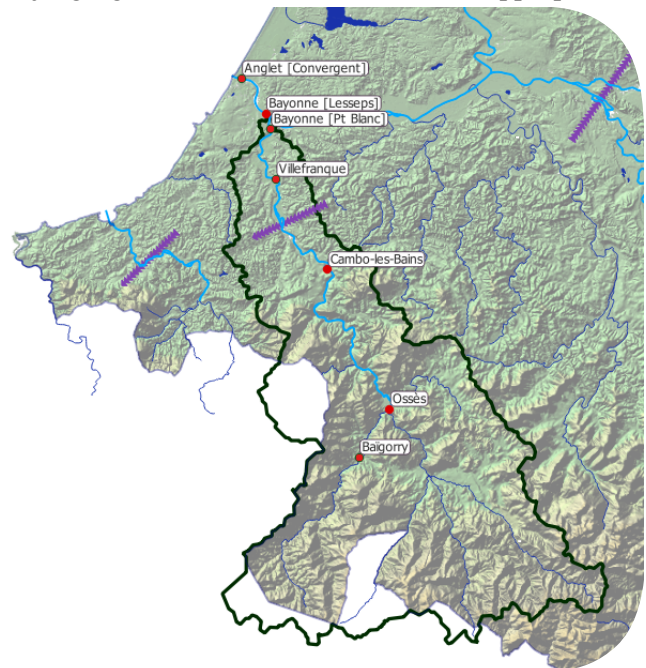


Fig 1 : bassin versant de la Nive et stations de mesure associées. Les traits violets représentent les limites de l'influence maritime.

l'Adour à Bayonne est très peu sensible au débit qui y transite, et ainsi l'onde de marée très peu déformée, la Nive voit son signal maritime fortement modifié au passage d'une crue (figure 2). C'est ainsi la concomitance d'une crue de la Nive et d'un pic de pleine mer qui génère, à Bayonne, les inondations les plus importantes.

## II.2 Les données

Les données marégraphiques d'Anglet et de Bayonne (Pont-Blanc) sur la Nive, ainsi que les données hydrométriques de la station de Cambo-les-Bains ont été exploitées dans le cadre de cette étude, sur une période de 3 ans et à un pas de temps de 5 minutes. Le signal observé à Bayonne constitue la variable à expliquer, ceux d'Anglet et de Cambo-les-Bains les variables explicatives. Afin d'en faciliter l'exploitation, certaines lacunes ont pu être reconstituées et les données ont été lissées, en particulier pour éviter le batillage souvent enregistré au moment des pics de pleine mer.

## III ANALYSE, EXPLOITATION DES DONNÉES ET RÉSULTATS

### III.1 Évaluations des temps de propagation

Nous cherchons dans un premier temps à évaluer le temps de propagation de l'onde de débit entre la station limnimétrique jaugée de Cambo-les-Bains et la station limnimétrique de Bayonne-Pont-Blanc. À cette station, l'identification précise des temps de propagation de crue pour différents événements est rendue difficile du fait du marnage.

Comme l'illustre la figure 2, on peut percevoir sur le signal brut de Bayonne-Pont Blanc (courbe tirets rouge) le passage d'une crue, en particulier sur l'évolution des hauteurs aux basses mers. Afin de supprimer les composantes journalières et infra-journalières de marée, nous travaillons sur le signal de hauteur moyenné sur une fenêtre glissante de 25h (courbe rouge pointillée). Le signal filtré comporte toujours des composantes de basse fréquence, a priori essentiellement d'origine astrale, dont la fréquence et l'amplitude sont négligeables en regard des variations instantanées observées lors d'événements de crues. On notera également que le signal de marée à l'embouchure moyenné sur 25h (courbe bleue tirets-points) ne présente pas la marque du passage de la crue, la légère augmentation moyenne de ce signal est essentiellement fondée sur l'évolution des coefficients en période de vives-eaux.

La figure 3 présente les temps de propagation observés sur l'échantillon d'événements sélectionnés en fonction du débit, entre Cambo-les-Bains et Bayonne-Pont Blanc. Comme attendu, les temps de propagation moyens augmentent avec le débit du fait de l'augmentation du frottement lorsque la rivière remplit son lit majeur, la variation restant cependant contenue pour des débits inférieurs à 450 m<sup>3</sup>/s.

### III.2 Propagation de la marée entre Anglet et Bayonne-Pont blanc

Nous cherchons à évaluer la déformation du signal de marée entre l'embouchure de l'Adour au marégraphe d'Anglet-Convergent et la station de Bayonne-Pont blanc. Pour ce faire, nous menons l'analyse pour des débits de la Nive faibles. Hors période de crue de la Nive ou de l'Adour, les signaux de marée ne subissent qu'une faible atténuation et une légère déformation (cf. fig. 4) ainsi qu'un retard de l'ordre de 20 à 40

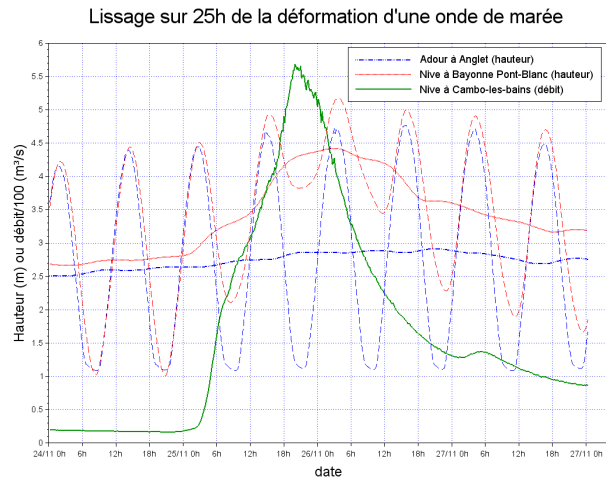


Fig. 2 : déformation du signal maritime à Bayonne Pont-Blanc (tirets rouges) au passage d'une crue de la Nive. Mise en évidence sur le signal de hauteur moyenné sur 25h à Bayonne-Pont-Blanc.

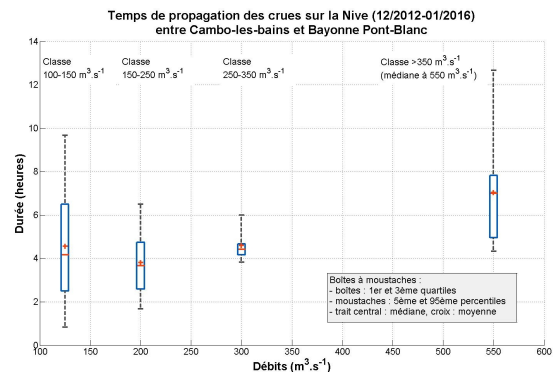


Fig. 3 : Distribution des temps de propagation

minutes (~99% des temps de propagation de l'onde de marée de l'embouchure à la station de Bayonne-Pont blanc), en outre, aucun phénomène de résonance particulier n'affecte la hauteur mesurée à la station.

La relation hauteur-hauteur présentée sur la figure 4 est bien modélisée par une relation linéaire qui reste valable sur toute l'amplitude des hauteurs observées aux pleines mers en conditions de bas débit amont. Nous évaluons dans la suite l'influence de débits plus importants de la Nive sur la hauteur observée à la station de Bayonne-Pont blanc.

### III.3 Influence des débits fluviaux sur la hauteur observée sous influence maritime

Nous avons étendu la modélisation de hauteur à Bayonne-Pont blanc pour toutes les catégories de débit de la Nive. Nous observons sur la figure 5 des écarts entre hauteurs observées et modélisées dont l'amplitude est variable en fonction de la hauteur à l'embouchure d'Anglet-Convergent.

Cette relation suggère que la sur-hauteur observée lors des crues dépend toujours de la condition aval, à savoir la hauteur des pleines mers à l'embouchure. Nous pouvons, tel qu'illustré sur les différents graphiques de la figure 6, analyser l'influence du débit sur la hauteur observée à Bayonne-Pont blanc en segmentant en différentes classes de hauteur pour la condition aval à Anglet-Convergent.

Nous pouvons observer une transition nette entre les bas débits (débits de la Nive inférieurs à 200 m<sup>3</sup>/s) pour lesquels la condition aval reste prépondérante et les débits supérieurs à 200 m<sup>3</sup>/s pour lesquels la condition amont que constitue le débit de la Nive est prépondérante. On notera cependant que la relation au débit a d'autant plus d'influence que la hauteur de la pleine mer est faible.

La figure 7 représente la nappe décrivant l'interdépendance entre condition amont (débit de la Nive), condition aval (coefficient de marée / hauteur de pleine mer à Anglet-Convergent) et hauteur observée à Bayonne-Pont blanc sous cette double influence. On peut voir que nous avons couvert sur les données exploitées la quasi-totalité de la gamme des coefficients de marées ainsi qu'une gamme large de débits sur la Nive, l'ensemble des zones maillées illustrées contenant des données observées.

La nappe apparaît torsadée, nous pouvons l'approximer à un comportement linéaire par partie défini sur des classes de débits aussi bien que sur des classes de hauteur de pleine mer à la côte. Suivant ce qui a été présenté en figure 6, nous définissons une relation sur les coefficients de régression linéaire en fonction de la gamme des hauteurs des pleines mers à la côte. La figure 8 présente l'évolution du coefficient directeur de la relation linéaire que nous supposons entre la sur-hauteur observée à la station de Bayonne-Pont blanc et le débit amont, en fonction de la condition aval (hauteur de pleine mer). On constate un amortissement de la sur-hauteur avec des hauteurs aval croissantes, que l'on peut relier à l'inondation du lit majeur.

Un travail sur l'évaluation de la sur-hauteur en fonction du débit aux basses mers a permis de déterminer la concordance avec les observations faites aux plus basses hauteurs des pleines mers. Ce complément a permis d'étendre nettement la gamme des observations de hauteurs de mers à l'étale en incluant les basses mers, fixant ainsi la gamme d'évolution de certains paramètres tels que les coefficients de régressions déterminés précédemment, ce, pour une condition aval tendant vers sa valeur basse extrême.

Prévision à Bayonne Pont-Blanc : débit de la Nive (Cambo) < 50 m<sup>3</sup>/s

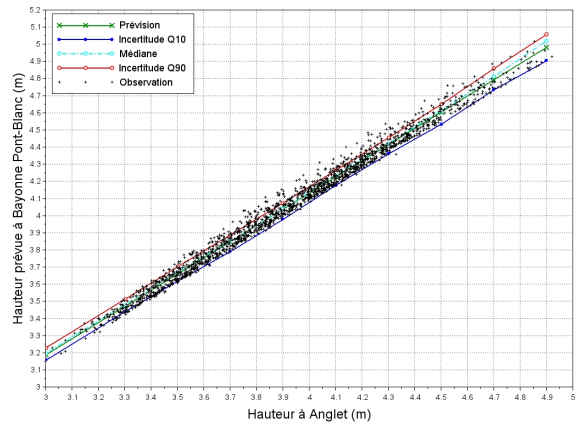


Fig. 4 : Relation H-H entre l'embouchure et Bayonne-Pont blanc hors influence du débit.

Ecart en fonction des hauteurs à Anglet pour Bayonne Pont-Blanc

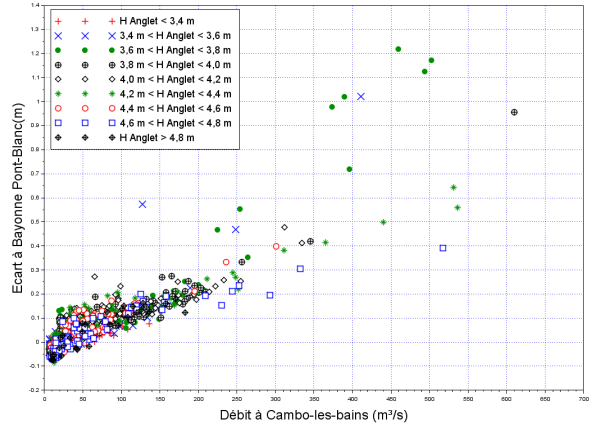


Fig. 5 : Distribution des différences entre la hauteur attendue à Bayonne [Pont-Blanc] et celle observée, pour différentes gammes de hauteurs à Anglet, et en fonction du débit de la Nive.



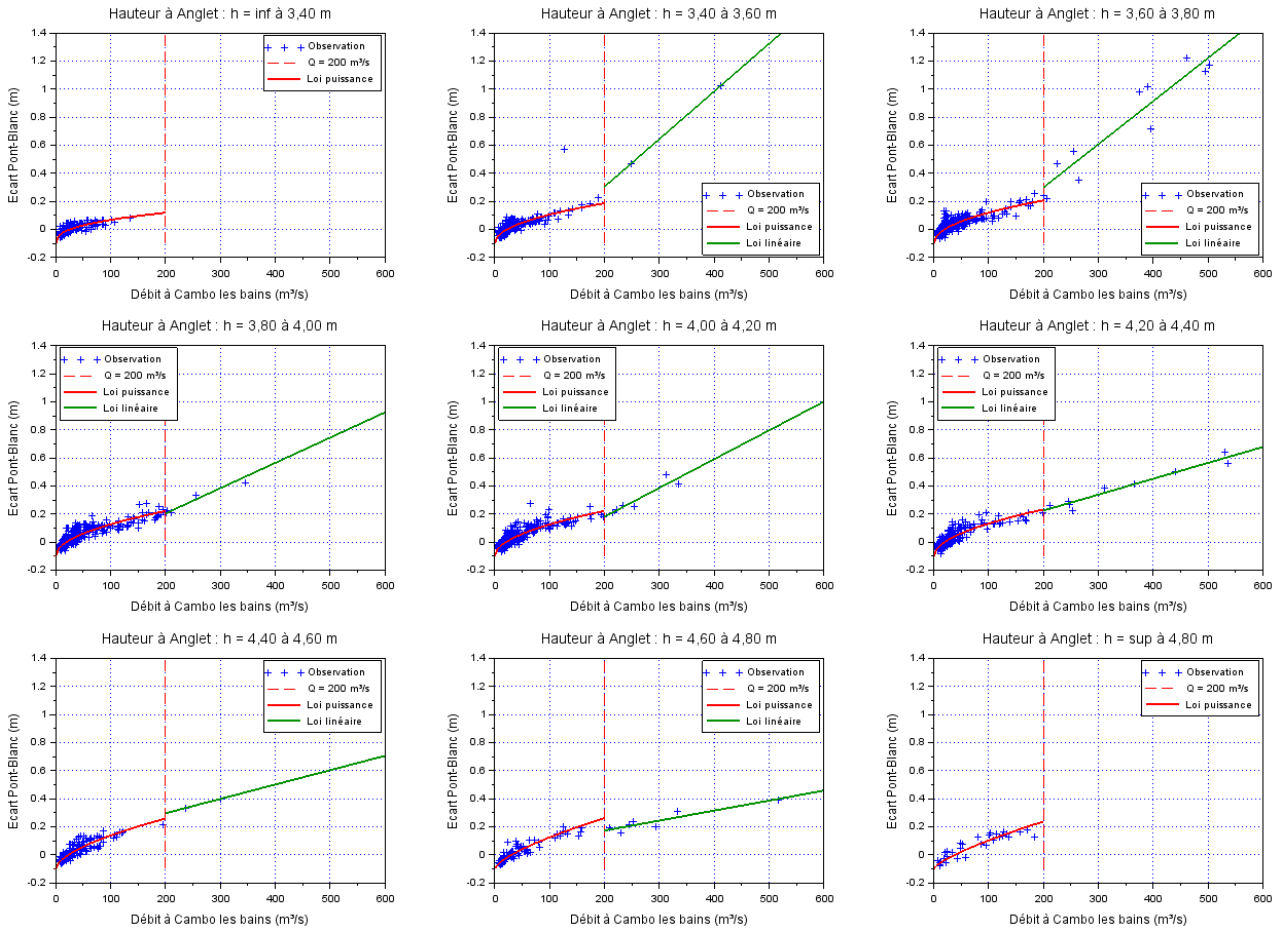


Fig. 6 : Influence du débit sur la sur-hauteur observée pour différentes classes de hauteur de pleine mer à l'embouchure.

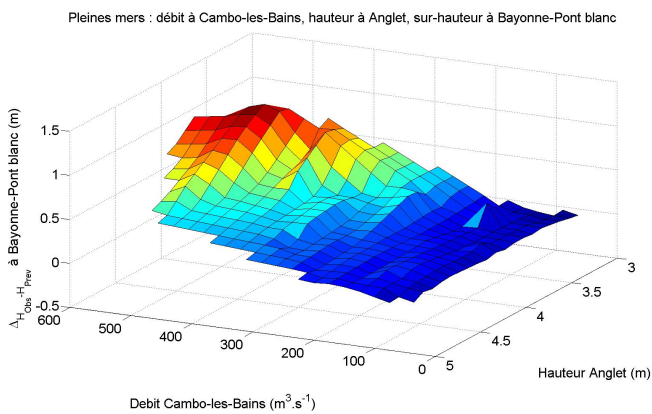


Fig. 7 : Représentation de la sur-hauteur en fonction des pleines mers à Anglet et des débits de la Nive à Cambo-les-Bains.

Valeur des coefficients de régression linéaire pour un débit de la Nive > 200 m³/s

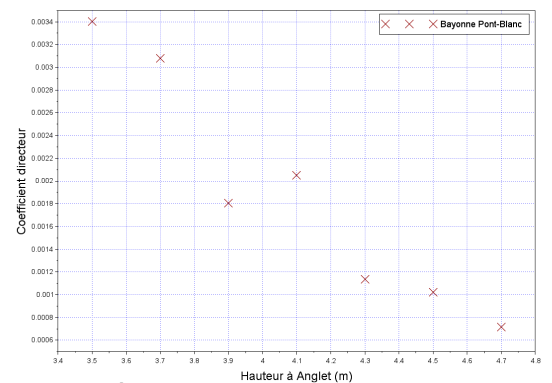


Fig. 8 : Évolution des coefficients directeurs (a) de la régression linéaire ( $\Delta_{(HOBS - HPREV)} = a.Q_{NIVE} + b$ ) en fonction des hauteurs de pleine mer à la côte.

## IV COMPARAISON À UN MODÈLE ET TRANSPOSITION À UN AUTRE SECTEUR

### IV.1 Confrontation à un modèle hydraulique – Télémac 2D

La complexité du site d'étude, avec notamment le fonctionnement hydraulique de la vaste plaine inondable d'Ansot (ou barthe) en amont immédiat de Bayonne sur la Nive, a conduit le service de prévision des crues à mettre en place un modèle hydraulique d'étude à deux dimensions, Telemac2D. Son emprise est très locale, le modèle couvre environ 5 km sur la Nive en amont de la confluence avec l'Adour (figure 9). Calé sur l'événement de février 2009, il a permis la mise au point d'abaques multi-critères pour réaliser des prévisions à la station de Bayonne Pont-Blanc, mais sans isoler la contribution propre du débit de la Nive, ce que nous avons cherché à faire dans cette étude.

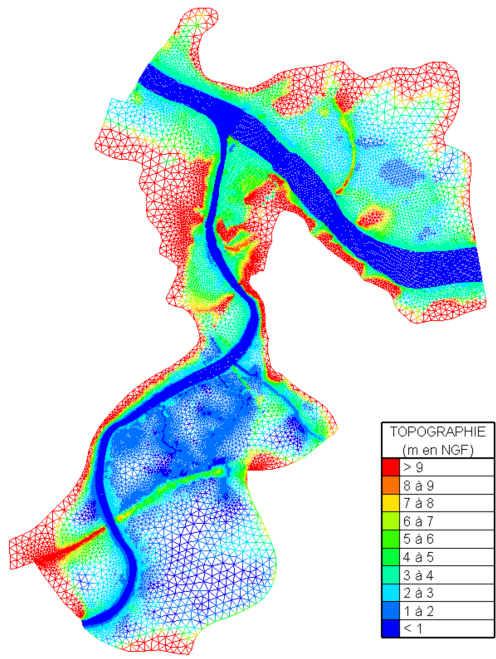


Fig 9 : maillage et bathymétrie mis en œuvre pour la modélisation 2D

Quantitativement, cette exploitation du modèle montre en revanche des manques liés au calage de celui-ci au droit de la station de Bayonne Pont-Blanc. Le modèle est en effet trop peu sensible au débit de la Nive, empêchant en l'état une exploitation plus riche des résultats. Un nouveau calage du modèle est possible et pourra à l'avenir permettre de décrire plus finement, et d'extrapoler l'outil de prévision mis au point dans le cadre de cette étude.

À la lumière des résultats obtenus dans la précédente partie, et pour envisager une généralisation des conclusions précédentes, dans des gammes de hauteur et de débit non observées sur l'échantillon de données exploitées, des simulations sur un cycle de marée complet, et pour diverses valeurs de débit de la Nive (régime permanent) ont été réalisées.

La méthode établie précédemment a été appliquée, et les régressions établies, hors influence du débit, entre Anglet et Bayonne Pont-Blanc ont été appliquées pour soustraire au signal simulé par le modèle à Bayonne Pont-Blanc la part uniquement due à l'influence maritime. La part résultante du signal est ensuite confrontée au débit qui transite dans la Nive (débit à Cambo-les-Bains), ainsi qu'à la condition maritime aval (pleine mer à Anglet) (voir figure 10).

Qualitativement, ces simulations permettent de valider les conclusions avancées dans la partie précédente : l'influence du débit de la Nive est d'autant plus forte sur la hauteur à Bayonne Pont-Blanc que la condition maritime aval est faible. Ainsi, la géométrie du modèle exploité ici devrait permettre de modéliser la part résultante du signal de Bayonne Pont-Blanc, avec sa double dépendance au débit et à la condition de marée.

Pleines mers : débit à Cambo-les-Bains, hauteur à Anglet, sur-hauteur à Bayonne-Pont blanc

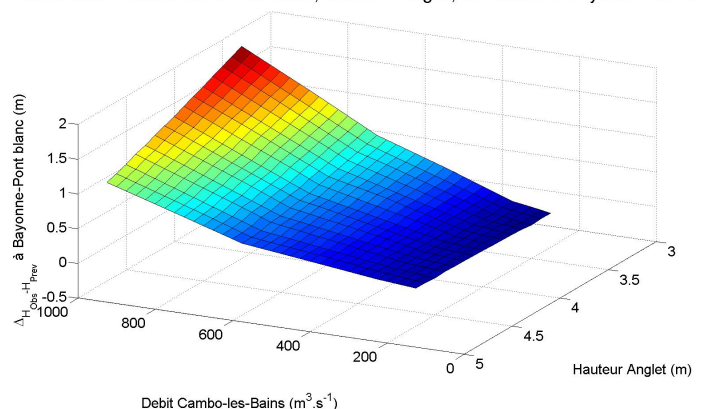


Fig. 10 : Représentation de la sur-hauteur obtenue par modélisation en fonction des pleines mers à Anglet et des débits de la Nive à Cambo-les-Bains.

## IV.2 Confrontation aux observations faites sur la Garonne sous influence maritime

La Garonne et son estuaire, la Gironde, nous offrent la possibilité d'appliquer notre démarche sur une autre station sous influence fluvio-maritime à Langon. Le bassin versant de la Garonne à Langon est approximativement de 55 000 km<sup>2</sup>, à quelques 600 km de sa source dans les Pyrénées espagnoles. Son régime est caractérisé par des débits moyens mensuels oscillant entre 200 et 1000 m<sup>3</sup>/s en fonction de la saison. La crue décennale est estimée à environ 5000 m<sup>3</sup>/s. L'influence de la marée s'estompe progressivement en remontant la Garonne. Elle tend à s'effacer dans le secteur de La Réole (cf. trait violet sur la figure 11). Le marnage, qui peut atteindre 6m en période de grandes marées à Bordeaux, reste inférieur à 4m au niveau de Langon. En période de crue, la conjonction de débits importants et de la survenue des pleines mers engendre des débordements importants dans le département de la Gironde, c'est cette aggravation des hauteurs en fonction de la marée qui focalise notre intérêt.

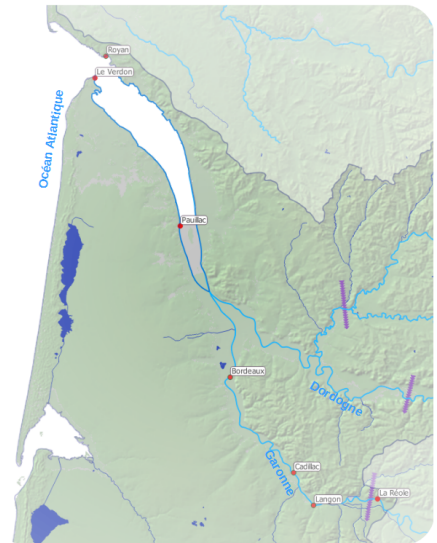


Figure 11 : la Garonne en Gironde et ses stations limnimétriques.

Nous avons appliqué à la Garonne dans sa partie aval sous influence maritime une analyse des hauteurs et des débits semblable à celle présentée en partie III. Nous avons analysé les temps de propagation des débits de la station amont du tronçon, hors influence maritime, située à La Réole, vers la station sous influence fluvio-maritime de Langon. Nous avons modélisé le comportement du signal de marée à Langon en fonction de Bordeaux en étudiant la relation des hauteurs à Langon en fonction de celles à Bordeaux pour des faibles débits de la Garonne (débits inférieurs à 150 m<sup>3</sup>/s), puis nous avons caractérisé quelle était l'influence du débit sur la hauteur observée à Langon. Nous présentons ci-après brièvement les conclusions de l'étude des données parmi lesquelles les principales sont :

- la hauteur à Langon aux basses mers ne dépend que du débit amont de la Garonne (on peut donc caractériser le débit à Langon par de l'hydrométrie classique aux basses mers) – voir Figure 12.
- comme précédemment pour la station de Bayonne Pont-Blanc, plus les pleines mers sont importantes à Bordeaux, moins l'accroissement de hauteur propre au débit sera important (Figure 13).

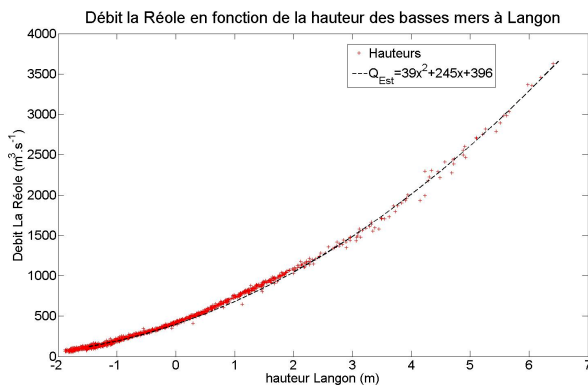


Fig.12 : relation hauteur-débit aux basses mers

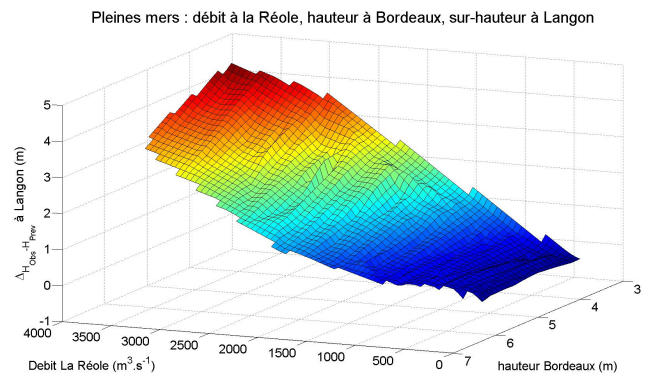


Fig.13 : Sur-hauteur à Langon due au débit à La Réole et à la hauteur de pleine mer à Bordeaux

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'analyse des signaux de marée a permis de mettre en évidence une signature variable et paramétrisable du débit pour les stations soumises à une double influence de la marée et de la rivière. La sur-hauteur générée par le débit par rapport à l'influence de la marée seule (ou pour des débits très faibles) s'explique correctement en fonction du débit et de l'amplitude de la marée. Elle est croissante avec le débit, mais cette influence est inversement proportionnelle à l'amplitude de la marée. Un même débit aura une influence moindre lors de pleines plus marquées. Les relations ainsi obtenues constituent des outils de prévision robustes, permettant d'anticiper la hauteur en fonction d'un débit et d'une marée prévus. La plus forte incertitude proviendra, en utilisation opérationnelle, de la prévision du débit de pointe en amont et du temps de propagation de la crue jusqu'au secteur sous influence maritime.

Les relations ont été établies avec le débit connu propagé depuis l'amont. Et ces relations ont montré la possibilité d'associer un débit à des hauteurs particulières dans le cycle de marée (pleines mers ou basses mers). Ces instants sont aisément identifiables et prédictibles. Dès lors dans des conditions bien précises favorables aux pratiques classiques de l'hydrométrie, le recours à des jaugeages (type ADCP [Hoitink, 2009]) doit permettre d'ajuster les relations hauteurs-débit aux sites étudiés sans nécessairement mobiliser d'importants moyens en continu [Fram, 2007 ; Chen, 2010] et sans recours à la modélisation [Chen, 2002 ; Ruhl, 2005].

En transposant la méthode à d'autres secteurs on observe globalement le même type de relation d'interdépendance double entre influence maritime et débit. Sur la Garonne à Langon, nous avons pu construire une relation univoque entre hauteur à la basse mer et débit. Certaines approches cherchent à modéliser l'influence de la géomorphologie de la rivière sur la hauteur de marée [Savenije, 2001] et cherchent à évaluer l'atténuation de l'onde de marée en fonction de la configuration des estuaires et du débit descendant [Horrevoets, 2004] dans un contexte de modèle hydraulique [Moftakhari, 2015]. La morphologie et la situation du site de Langon (suffisamment éloigné de l'embouchure) suggère qu'en généralisant l'étude on puisse, sur la base des observations, mettre en évidence des critères géographiques permettant d'identifier les secteurs les plus favorables à l'hydrométrie d'une rivière sous influence maritime, quelle que soit la zone considérée.

## VI REFERENCES

- Cai H. *et al.* (2015). – A predictive model for salt intrusion in estuaries applied to the Yangtze estuary. *J. Hydrology*, **529**:1336-1349.
- Cai H. *et al.* (2016). – Analytical approach for determining the mean water level profile in an estuary with substantial fresh water discharge. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **20**:1177-1195.
- Chen Y.-C., Chiu C.-L. (2002). - An efficient method of discharge measurement in tidal streams. *J. Hydrology*, **265**:212-224.
- Chen Y.-C., Kao S.-P., Yu S.-R. (2010). - Flood discharge measurement using ADCP. *6Th Int. Symp. On Ultrasonic Doppler methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*.
- Hoitink A. J. F., Buschman F.A., Vermeulen B. (2009). - Continuous measurements of discharge from a horizontal acoustic Doppler current profiler in tidal river. *Water Resources Res.*, **45**:W11406 .
- Fram J. P., Martin A., Stacey, M. T. (2007). - Dispersive fluxes between the coastal ocean and a semienclosed estuarine basin. *J. Phys. Oceanography*, **37**:1645-1660.
- Horrevoets A.C. *et al.* (2004). - The influence of river discharge on tidal damping in alluvial estuaries. *J. Hydrology*, **294**:213-228.
- Moftakhari H. R. *et al.* (2013). – A novel approach to flow estimation in tidal rivers. *Water Resources Res.*, **49**:4817-4832.
- Moftakhari H. R., Jay D.A., Talke S.A. (2015). – Estimating river discharge using multiple-tide gauges distributed along a channel. *J. Geophys Res. : Oceans.*, **121-4**:2078-2097.
- Ruhl C. A., Simpson M. R. (2005). - Computation of discharge using the Index-Velocity Method in tidally affected areas. *USGS Tech. Report 2005-5004*.
- Reis J. L *et al.* (2009). - Assessing the influence of the river discharge on the Minho estuary tidal regime. *J. Coastal Research*, **56**:1405-1409.
- Savenije H.H.G. (2001). - A simple analytical expression to describe tidal damping or amplification. *J. Hydrology*, **243**:205-215.
- World Meteorological Organization (2006). - Technical Regulations, Vol. III - Hydrology.