

# Structure verticale des courants associés à la propagation de la marée dans la Garonne – Impact du mascaret

N. BONNETON, P. BONNETON, J.P. PARISOT, G. DETANDT, A. SOTTOLICHIO et A. CRAPOULET

Université Bordeaux I, CNRS, UMR 5805-EPOC, Talence, F-33405 France

## Résumé :

*Les ressauts en translation tidaux (parfois dénommés mascarets) représentent un phénomène naturel non linéaire et non hydrostatique, pouvant avoir une forte intensité et ayant un fort impact sur les écosystèmes fluvio-estuariens. Nous présenterons des résultats issus de la première étude in situ de grande ampleur au niveau international, réalisée sur la Garonne. Nous montrons que la renverse des courants peut être extrêmement intense, passant en 3 s de -1.1 m/s à 0.95 m/s en étant associée à un champ de vitesse horizontale fortement cisailé suivant la verticale. Nous avons quantifié l'impact de ces ressauts de fortes amplitudes sur la mise en suspension des sédiments.*

## Abstract:

*Tidal bores (sometimes named mascaret in French) are nonlinear and nonhydrostatic phenomena, which can be very intense and play a significant role in the estuary and river ecosystems. We present results from the first intensive field study conducted in the Garonne river. We show that the flow reverse can be very intense, with currents varying from -1.1 m/s to 0.95 m/s in 3 s, being associated with a strongly vertically sheared horizontal velocity field. We have quantified the impact of high amplitude tidal bores on suspended sediments.*

**Mots clefs :** mascaret, marée, estuaire, ressaut, tsunami, cisaillement, ADCP

## 1 Introduction

La propagation d'une onde de marée de forte amplitude, dans un estuaire de forme convergente, peut conduire à la formation d'un ressaut en translation. Ce ressaut, caractérisé par une variation brutale de la hauteur d'eau, se propage avec l'onde de marée et est situé à l'extrémité amont de la marée montante. Il est dénommé en Anglais *tidal bore* (TB). Les TB de fortes amplitudes sont facilement observables visuellement et sont dénommés *mascarets* en français. Ce phénomène spectaculaire a été observé dans de nombreux estuaires de par le monde. Si les *mascarets* ne se produisent généralement que pour des forts coefficients de marée et en période d'étiage, Bonneton et coll. [2] ont montré que dans la Garonne les TB étaient extrêmement fréquents, se produisant pour 90% des marées par faible débit fluvial et 65% par fort débit. La très grande sous-estimation de l'occurrence des TB dans la littérature (cf. Chanson [4]) est liée au fait qu'une grande majorité des observations de ce phénomène était seulement visuelle et donc très qualitative. Le rôle de ce phénomène sur la dynamique sédimentaire des estuaires et plus généralement sur le comportement des éco-systèmes estuariens est donc encore à ce jour très mal connu. Ce constat nous a conduit à mettre en oeuvre deux campagnes de mesures afin de mieux comprendre la dynamique des TB se formant dans le système Gironde/Garonne/Dordogne et leur impact sur le transport sédimentaire. Ces campagnes de mesures ont aussi pour objectifs de valider et contribuer à l'amélioration des modèles d'ondes longues non-hydrostatiques de type Serre-Green Naghdi (cf. Bonneton et coll. [1] et Tissier et coll. [6]), qui ont pour projet de modéliser la propagation des tsunamis en milieu littoral et estuarien. En effet, même si les mécanismes de génération des tsunamis et des TB sont très différents, leur propagation en milieu littoral présente de nombreuses similarités, avec la présence d'un ressaut en translation pouvant être de type

oscillant non-déferlant, oscillant déferlant ou non-oscillant pleinement turbulent. Dans le cadre de cet article nous nous concentrons sur la structure verticale du champ de vitesse associé à la propagation de la marée dans la Garonne dans trois situations caractéristiques : sans TB, présence d'un TB de faible amplitude et présence d'un TB de forte amplitude (i.e. *mascaret*).

## 2 Campagne de mesure

### 2.1 Zone d'étude

Deux campagnes de mesures ont été réalisées sur la Garonne à Podensac, ville située à 140 km en amont de l'embouchure de l'estuaire (cf. fig. 1a). Ce site a été choisi car un TB ondulant bien développé (i.e. *mascaret*) s'y forme pendant les marées de vives-eaux et parce que la rivière à cet endroit est rectiligne, ce qui limite la complexité du front d'onde. Les TB observés à Podensac sont de type ondulant partiellement déferlant (cf. fig. 1b) et sont représentatifs de la majorité des TB observés dans la Garonne (cf. Bonneton et coll. [3]). Le champ d'onde secondaire, dont la hauteur du premier front peut dépasser 1.3m de hauteur, est caractérisé par une dynamique très différente de celle observée dans les expériences en canal rectangulaire, du fait de la forte interaction entre ces ondes et les berges en pente douce (cf. Bonneton et coll. [3]). Ces campagnes de mesure ont été réalisées pendant les équinoxes de printemps et d'automne afin d'avoir l'opportunité d'observer la présence de TB pour une large gamme de marnage et de débit. La première campagne, TBG1, a eu lieu du 24 février au 15 avril 2010 avec un débit élevé (débit moyen de 700 m<sup>3</sup>/s) et la seconde, TBG2, a eu lieu du 1<sup>er</sup> septembre au 22 octobre 2010 avec un débit faible (débit moyen de 125 m<sup>3</sup>/s). Le site et les campagnes de mesures ont été présentés en détail par Parisot et coll. [5] et Bonneton et coll. [2,3].

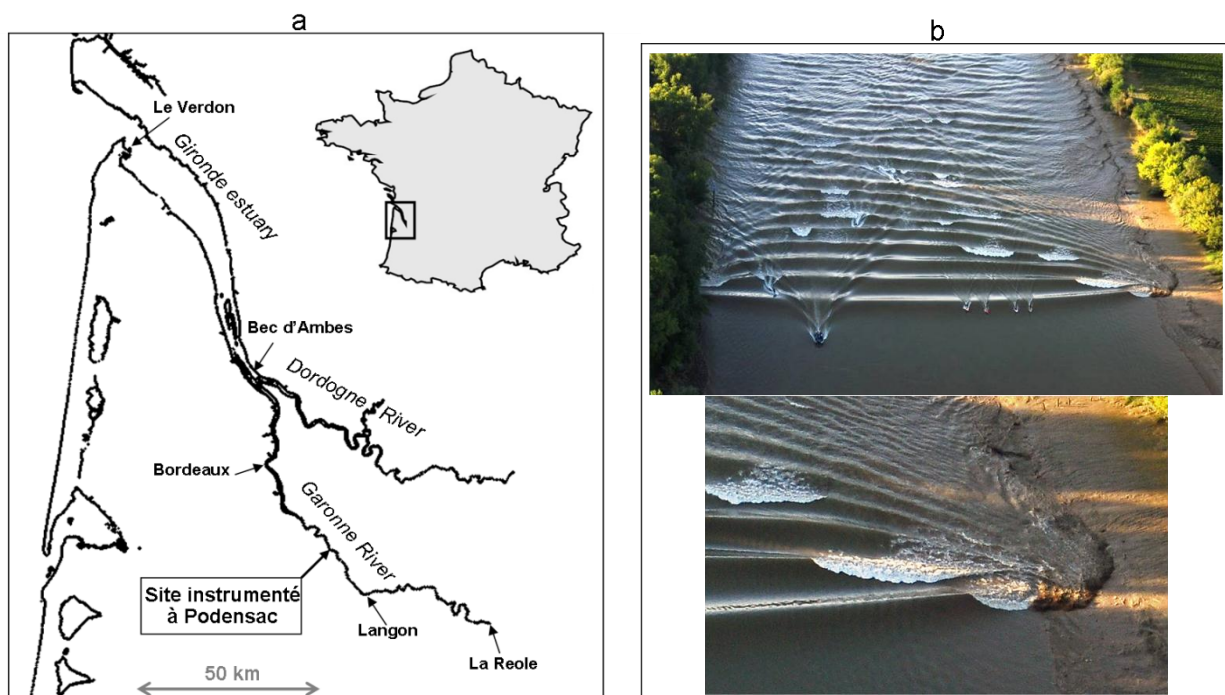


FIG. 1 – a, carte du système Gironde/Garonne/Dordogne et localisation du site instrumenté de Podensac ; b, photographies aériennes du *mascaret* à Podensac le 10 septembre 2010, 17h31 TU.

### 2.2 Instrumentation et méthodes

Pendant ces campagnes, de nombreux instruments ont été déployés (jusqu'à 17 instruments pour la seconde campagne). Nous présentons ici uniquement les courantomètres et le turbidimètre avec lesquels nous avons étudié le champ de vitesse et mesuré la turbidité. Pendant la campagne TBG1, nous avons déployé un profileur de courant acoustique Doppler (ADCP- RDI 1200kHz) au milieu de la rivière. Les mesures ont été enregistrées en continu à 2 Hz avec une taille de cellule égale à 0.2 m. Durant la campagne TBG2, nous avons déployé trois profileurs de courants (2 ADCP- RDI 1200kHz et 1 AWAC-NORTEK) au

milieu du chenal sur 2 sections de la rivière espacées de 200 m. Toutes les mesures ont été enregistrées à 2 Hz. Les tailles des cellules des ADCP étaient respectivement égales à 0.05 m et 0.2 m. Les mesures de turbidité ont été effectuées par un OBS3A placé à 30 cm du fond.

### 3 Résultats

#### 3.1 Distorsion de la marée et ressauts ondulants en translation

La figure 2 présente l'évolution de l'écoulement à Podensac sur un cycle de marée pour trois situations différentes : sans TB (fig. 2a, b), avec TB de faible amplitude (fig. 2c, d) et avec TB de forte amplitude, *i.e. mascaret*, (fig. 2e, f). Alors que l'évolution de la hauteur d'eau mesurée à l'entrée de l'estuaire est presque sinusoïdale, on observe que l'onde de marée à Podensac est fortement asymétrique (cf. fig. 2a, c, e) et ceci d'autant plus que le marnage local est élevé. Pour le marnage le plus intense (fig. 2e) la marée descendante dure 9 h alors que la marée montante ne dure que 3 h 20 min. Cette asymétrie est due aux effets combinés des non-linéarités et de la friction lors de la propagation de la marée sur les 140 km qui séparent notre site d'étude de l'entrée de l'estuaire. Le débit fluvial joue un rôle important sur l'amortissement de l'onde de marée dans l'estuaire. Par fort débit le marnage de 5.1 m est le même au Verdon qu'à Podensac (fig. 2c), alors que par faible débit fluvial il passe de 4.9 m au Verdon à 6.3 m (fig. 2e) sur notre site d'étude. Pour les trois cas étudiés, la vitesse horizontale moyennée sur 5 minutes et intégrée suivant la verticale (comptée positive vers l'amont) est de l'ordre de -1 m/s pendant le jusant et augmente brutalement au début de la marée montante. Pour les deux cas associés à de forts débits fluviaux (fig. 2b, d) le courant reste négatif pendant une grande partie du flot. En revanche par faible débit (fig. 2f) on observe une véritable renverse du courant, celui-ci atteignant des valeurs de 1.5 m/s au début du flot.

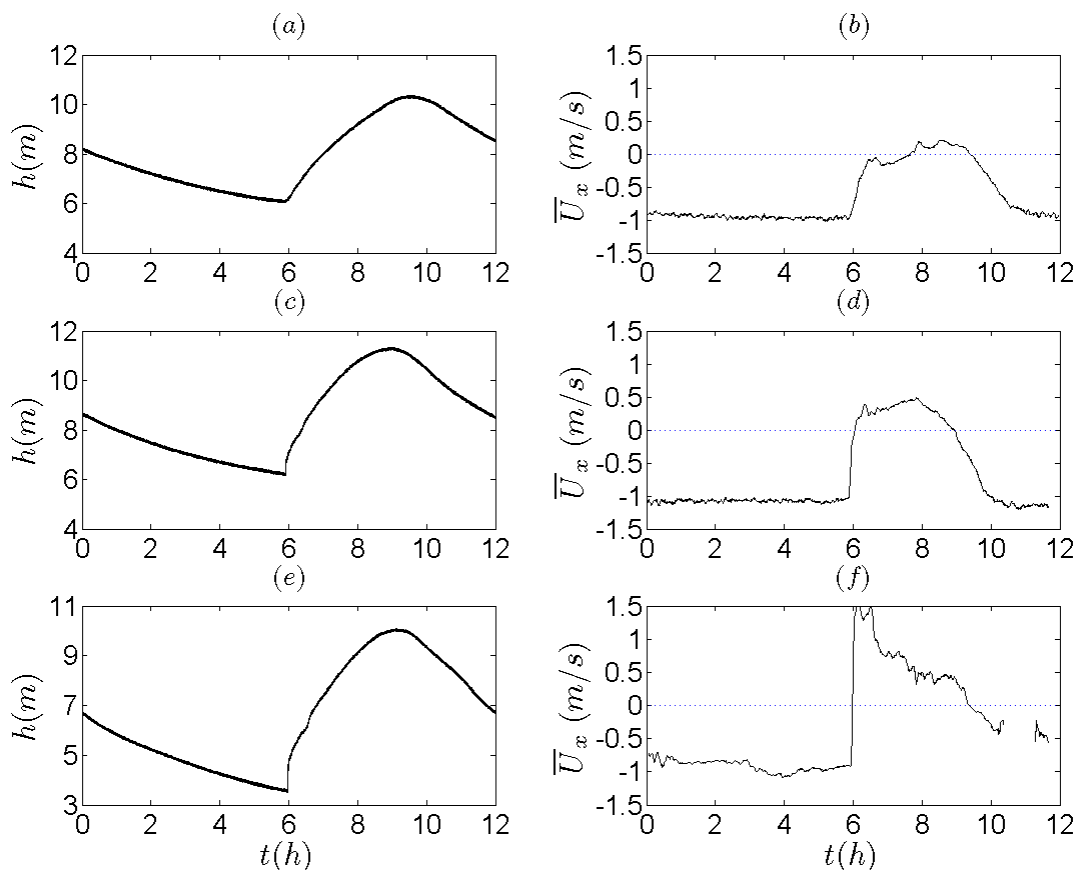


FIG. 2 – Evolution sur un cycle de marée à Podensac de la hauteur d'eau et de la vitesse horizontale intégrée suivant la verticale, moyennée sur 5 minutes. a, b : le 25 février (TGB1), marnage de 4.4 m (2.7 m au Verdon) ; c, d : le 3 mars (TGB1), marnage de 5.1 m (5.1m au Verdon) ; e, f : le 9 septembre (TGB2), marnage de 6.3 m (4.9 m au Verdon), f : les données de courant à marée haute sont à prendre avec précaution, elles sont parfois manquantes en raison de la forte turbidité du milieu.

La figure 3 présente un zoom de la figure 2 sur une période de 2 min centrée sur le début de la marée montante. La vitesse horizontale intégrée sur la verticale  $y$  est représentée à 2 Hz. Si pour le premier cas (fig. 3a, b) on a une variation continue de l'écoulement, on observe dans les deux autres cas une variation rapide de l'écoulement associée à un ressaut oscillant en translation. Dans le cas du TB de faible amplitude (fig. 3b, c) le niveau d'eau augmente de 0.64 m (niveau de la première crête des ondes secondaires) en 21 s et est associé à une variation de vitesse horizontale de 1 m/s. Pour un marnage local plus élevé, de 6.3 m, on observe un phénomène beaucoup plus intense (cf. fig. 3e, f), avec une variation du plan d'eau de 1.2 m en 3 s et une variation de vitesse de 2.05 m/s correspondant à une véritable renverse des courants (de -1.1 m/s à 0.95 m/s). Les ondes secondaires associées à ce TB ont une période de 3 s et des variations de vitesse de l'ordre de 1.2 m/s. La forte variation de vitesse à l'avant du ressaut, mais aussi au niveau des ondes secondaires va avoir un fort impact sur le transport sédimentaire.

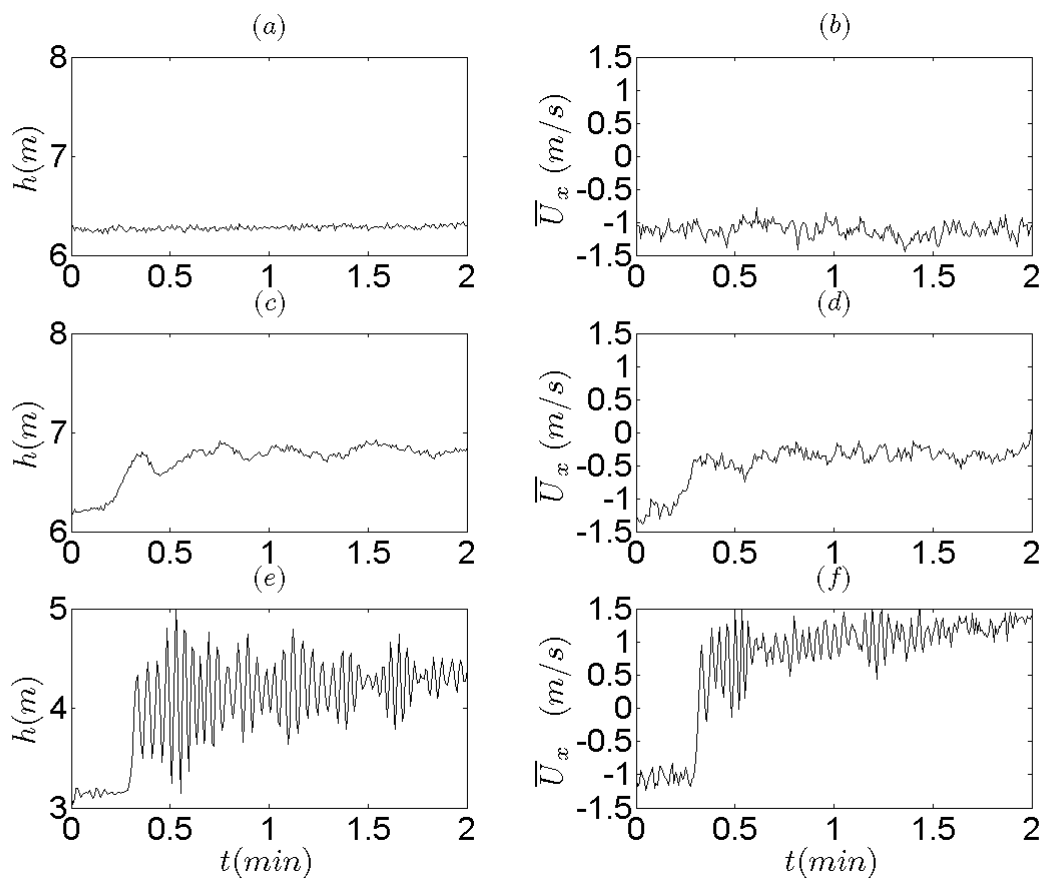


FIG. 3 – Evolution de la hauteur d'eau et de la vitesse horizontale intégrée suivant la verticale sur une période de 2 min centrée sur le début de la marée montante. a, b : le 25 février (TGB1), marnage au Verdon (2.7 m) et à Podensac (4.3 m) ; c, d : le 3 mars (TGB1), marnage au Verdon (5.1 m) et à Podensac (5.1 m) ; e, f : le 9 septembre (TGB2), marnage au Verdon (4.9 m) et Podensac (6.3 m)

### 3.2 Profils verticaux de courant et mise en suspension des sédiments

Nous avons analysé les profils verticaux des courants pour les deux campagnes de mesures. Nous avons constaté, pour l'ensemble des mesures de la campagne TGB1 (sauf lorsque le courant est de très faible intensité) et les périodes de jusant de TGB2, que les profils de couche limite sont logarithmiques avec une longueur de rugosité mesurée  $z_0$  de l'ordre de quelques millimètres ( $z_0 = 5$  mm pour TGB1 et  $z_0 = 2$  mm pour TGB2). Pour illustrer ce résultat nous présentons fig. 4 un profil caractéristique (adimensionné par la longueur de rugosité  $z_0$  et par la vitesse de friction  $u_\tau$ ) pour chacune des deux campagnes de mesure, 3 heures avant le passage du mascaret. Nous avons vérifié que les mesures sont en accord avec la relation théorique

$u\tau = K\bar{U}/\ln\left(\frac{h}{z_0} - 1\right)$ ,  $K$  étant la constante de Karman égale à 0.4. La remarquable quasi-constance de  $\bar{U}_x$  lors des périodes de jusant (cf. fig. 2b, d, f) implique donc une vitesse de frottement en jusant pratiquement constante de l'ordre de 0.07 m/s.

En revanche, en présence de TB de forte amplitude, la couche limite s'écarte du profil logarithmique et devient très fortement cisailée (cf. fig. 5). Cette caractéristique a de fortes implications en termes de transport sédimentaire. Nous présentons fig. 6 l'évolution temporelle de la concentration en matière en suspension (MES) à 30 cm du fond sur une période allant des trois dernières heures de marée descendante jusqu'au passage du front pour le cas de TB à forte amplitude. Nous observons une diminution des MES lorsque la marée descend et une brusque élévation de cette quantité au passage du TB. Au niveau du front, la quantité de MES augmente de 11 g/l en 6 min.

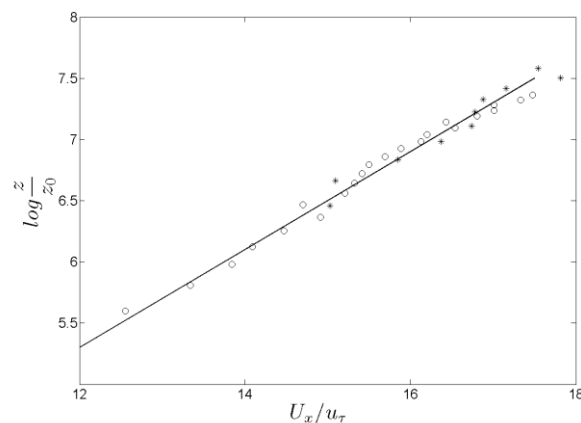


FIG. 4 – Représentation logarithmique des profils verticaux de vitesse horizontale  $U_x$ , moyennée sur 5 min et adimensionnée par la vitesse de friction  $u_\tau$ , 3 heures avant le passage du TB :  $\circ$  : le 3 mars (TGB1) ;  $*$  : le 9 septembre (TBG2) ;  $—$  : modèle théorique

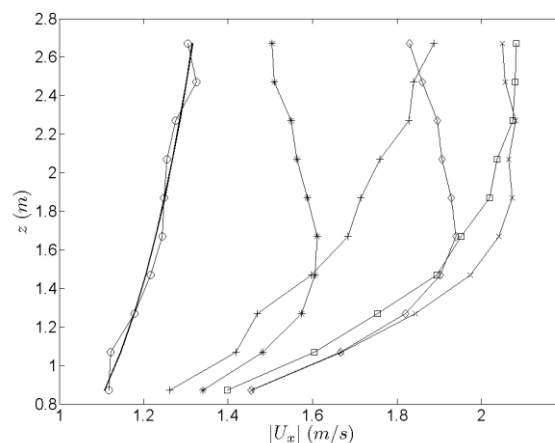


FIG. 5 – Profils verticaux de vitesse  $|U_x|$  moyennée à 5 min, à différents temps par rapport à  $t_0$  (temps juste avant le passage du mascaret),  $\circ$  :  $t_0 - 3h$  ;  $*$  :  $t_0 + 4$  min ;  $\diamond$  :  $t_0 + 6$  min ;  $\times$  :  $t_0 + 8$  min ;  $\square$  :  $t_0 + 10$  min ;  $+$  :  $t_0 + 20$  min ;  $—$  : profil théorique logarithmique pour  $t_0 - 3h$ .

## 4 Conclusions

Cet article présente les résultats préliminaires de la première étude in situ de grande ampleur, au niveau international, décrivant la structure verticale du champ de vitesse associé à des TB. Nous avons montré que la renverse des courants peut être extrêmement intense, passant en 3 s de -1.1 m/s à 0.95 m/s en étant associée à des courants fortement cisailés suivant la verticale. Nous avons mis en évidence l'impact de ces

TB de fortes amplitudes sur la mise en suspension des sédiments. Nous avons montré dans un autre article (cf. Bonneton et coll. [2]) l'omniprésence des TB dans la Garonne. Il reste maintenant à quantifier, à partir de la base de données très complète obtenue lors de nos deux campagnes de mesures en 2010, l'impact des TB de différentes amplitudes sur le transport sédimentaire dans la Garonne.

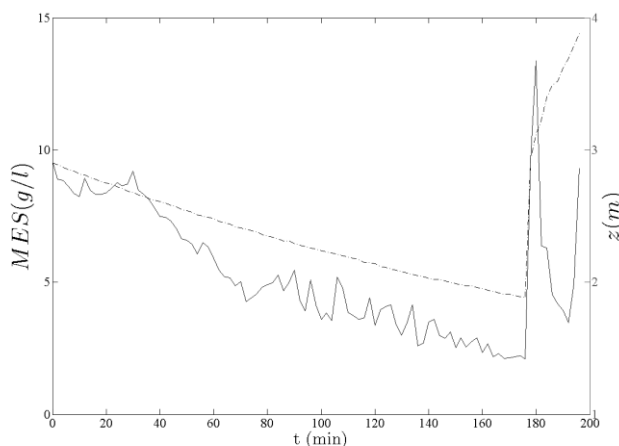


FIG. 6 – Evolution de la hauteur d'eau (en pointillé) et de la concentration en matières en suspension (en continu) le 9 septembre (TGB2), les mesures de concentration en MES sont enregistrées à 30 cm du fond toutes les 2 minutes.

## Remerciements

Ce travail a été entrepris dans le cadre du projet MASCARET (Région Aquitaine), avec des financements complémentaires de l'Université de Bordeaux 1. Nous remercions l'ensemble des personnes qui ont été impliquées dans ces campagnes de mesures et tout particulièrement G. Oggian, S. Bujan, H. Derriennic, M. Tissier (EPOC) et F. Pradalier (CKBN). Les VNF (Cadillac) nous ont été d'un très grand soutien pour le mouillage des instruments, ainsi que Y. Lavigne pour les photos aériennes.

## Références

- [1] Bonneton, P., Barthélemy, E., Chazel, F., Cienfuegos, R., Lannes, D., Marche, F., and Tissier, M., 2011 Recent advances in Serre-Green Naghdi modelling for wave transformation, breaking and runup processes, in press to *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, doi:10.1016/j.euromechflu.2011.02.005
- [2] Bonneton, P., Van de Loock, J., Parisot, J-P., Bonneton, N., Sottolichio, A., Detandt, G., Castelle, B., Mariou, V. and Pochon, N., 2011b On the occurrence of tidal bores -The Garonne River case. *Journal of Coastal Research*, SI 64, in press.
- [3] Bonneton, P., Parisot, J-P., Bonneton, N., Sottolichio, A., Castelle, B., Mariou, V., Pochon, N. and Van de Loock, J. 2011 Large amplitude undular tidal bore propagation in the Garonne River, France, *Proc. 21<sup>st</sup> ISOPE conf.*, 2011, Hawaii.
- [4] Chanson, H., 2005 Mascaret, Aegir, Pororoca, Tidal Bore. Quid ? Où? Quand? Comment? Pourquoi ? *La Houille Blanche*, No. 3, pp. 103-114 (ISSN 0018-6368).
- [5] Parisot, J-P., Bonneton, P., Bonneton, N., Van de Loock, J., Castelle, B., Mariou, V., Sottolichio, A., Detandt, G., Oggian, G., Derriennic, H., Bujan, S., Tissier, M., Castaing, P., Lubin, P., Chanson, H., Pradalier, F., and Marcel, R. 2010. Etude préliminaire des mascarets d'Aquitaine. *Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, Les Sables d'Olonne, 945-954. DOI:10.5150/jngcgc.2010.104-P
- [6] Tissier, M., Bonneton, P., Marche, F., Chazel, F., and Lannes, D. 2011 Nearshore dynamics of tsunami-like undular bores using a fully nonlinear Boussinesq model. *Journal of Coastal Research*, SI 64, in press.