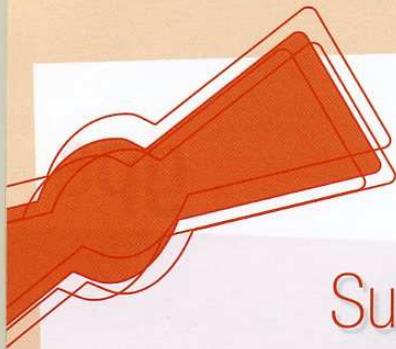


60 | Suivi aérien du mascaret de la Garonne

Le mascaret, terme gascon, désigne cette vague qui remonte le cours de certains fleuves lors de grandes marées. Mal connu, peu étudié, sa fréquence et ses caractéristiques restent mystérieuses. Une équipe de l'université de Bordeaux s'est penchée sur ce phénomène intrigant.





Suivi aérien du mascaret de la Garonne le 10 septembre 2010

PARISOT J.P., CHENG C., ZARAGOSI S., HANQUIEZ V., BONNETON P., BONNETON N.
UNIVERSITÉ BORDEAUX 1, EPOC UMR 5805, AVENUE DES FACULTÉS 33405 TALENCE, FRANCE
PARISOT@EPOC.U-BORDEAUX1.FR

Depuis 2009, le laboratoire EPOC de l'Université de Bordeaux 1 a mis en place plusieurs campagnes de mesures des mascarets d'Aquitaine. Lors de la campagne de mesures du mascaret, mise en place par l'équipe *Methys*, le 10 septembre 2010, un suivi en bateau et en avion ont permis de collecter plus de quatre cents photographies et des données de positionnement GPS sur son parcours de près de trente kilomètres. À partir des photographies aériennes géoréférencées avec *ArcGIS* et de la concordance des données GPS du bateau, il a été possible de calculer la vitesse de propagation du mascaret. Les vitesses des fronts du mascaret varient de 15 km/h à 25 km/h. De plus, d'autres mesures comme les longueurs d'ondes, et les formes des six premières vagues ont pu être déterminées. Le nombre de Froude montre que la Garonne se comporte comme un canal rectangulaire.

à plusieurs reprises, a suivi le mascaret en se plaçant juste devant les vagues sur tout son parcours ;

► En avion afin de réaliser une couverture photographique de l'évolution du mascaret de la Garonne.

La bonne qualité des photographies et la compilation des mesures complémentaires nous permettent de caractériser le déplacement du mascaret (vitesse, forme des vagues...) à partir du redressement et du géoréférencement des photographies réalisées le 10 septembre 2010. Vingt-quatre photos sur quatre cents ont été sélectionnées pour l'étude préliminaire qui est présentée ici. La vitesse de propagation est déterminée de trois manières différentes (GPS du bateau, chronologie des photos référencées et formules théoriques). La formule dépendant de la hauteur du ressaut de marées, elle est compatible avec les mesures pour des ressauts compris entre 1 m et 1,5 m. On a également constaté que, contrairement aux connaissances antérieures, des ondulations sont présentes sur toute la largeur du fleuve, sur plus de 80 % du parcours de 35 km (entre Bordeaux et Barsac).

Introduction

Trois campagnes de mesures ont été mises en place afin de mieux comprendre la dynamique des mascarets se formant dans le système Gironde/Garonne/Dordogne (GGD) et leur impact sur le transport sédimentaire. Les mesures ont été réalisées dans la Garonne sur le site de Podensac, situé à cent quarante kilomètres en amont de l'embouchure de l'estuaire. Ce site a été choisi car un mascaret ondulant bien développé s'y forme pendant les marées de vives-eaux. La hauteur du premier front d'onde peut dépasser 1,3 m. La première

campagne a eu lieu du 24 février au 15 avril 2009 avec un débit élevé (débit moyen de 700 m³/s), la seconde a eu lieu du 1er septembre au 22 octobre 2010 avec un débit faible (débit moyen de 125 m³/s). Une troisième campagne s'est déroulée du 30 août au 9 septembre 2011 avec un débit de 125 m³/s.

Conjointement aux mesures hydrodynamiques des suivis ont été effectués :

- À partir de caméras vidéo placées sur les berges ;
- Depuis un bateau piloté par un pêcheur, Laurent Bajolle, qui,

Définition du mot mascaret d'après le Petit Robert.

MASCARET. (XVI^e; mot gascon « boeuf tacheté », de *mascarar* « mâchurer, tacher », par métaphore, d'un animal bondissant).

Longue vague déferlante produite dans certains estuaires par la rencontre du flux et du reflux.

Le mascaret de la Gironde, de la Seine.

Les mascarets dans le monde et dans l'histoire

Actuellement, il y a plus de quatre-vingts sites à mascarets dans le monde (Bartsch-Winkler & Lynch, 1988), avec de nombreuses occurrences sur les côtes européennes et dans l'estuaire de l'Amazone. L'Europe est effectivement riche en mascarets avec plus de quinze mascarets en Angleterre (Severn, Trent, etc.), Aquitaine (GGD) et en Normandie (Sée, Sélune, Couesnon, etc.).

Bien que ce phénomène possède un nom d'origine gasconne, il n'y a pratiquement pas eu d'études sur les mascarets d'Aquitaine. Le terme mascaret est utilisé localement ; le tableau 1 suivant liste les appellations des différents mascarets du monde.



Figure 1 : la Seine à Caudebec en 1962.

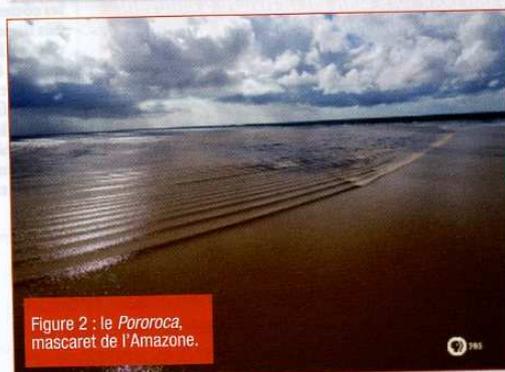


Figure 2 : le *Pororoca*, mascaret de l'Amazone.

Fleuve	Pays	Hauteur maximale (m)	Vitesse (km/h)	Nom local
Amazone, Araguari et Guama	Brésil	6	30	<i>Pororoca</i>
Gironde, Garonne et Dordogne	France	1,5	12	Mascaret et Montant
Hougli	Inde	2	20	
Lupar	Malaisie	3,0	20	<i>Benak</i>
Petitcodiac	Canada	2	8	<i>Refoul</i>
Qiantang	Chine	6	40	Dragon noir
Shubenacadie	Canada	2	14	
Seine	France	4	22	Barre
Severn	Angleterre	2,8	16	<i>Tidal bore</i>
Trent	Angleterre	1	15	<i>Aegir</i>
Daly	Australie	1	30	
Turnagain Arm	Canada	1 (3)	20	

Tableau 1 : Les caractéristiques de quelques fleuves à mascaret dans le monde (Chanson, 2005)



Figure 3 : le mascaret du *Qiantang* (Chine).



Figure 4 : mascaret sur la Dordogne.

« L'on appelle mascaret une grande montaigne d'eau qui se fait en la rivière de Dourdongne, vers les contrées de Libourne, et ladite montaigne ne se fait sinon au temps d'esté: mesmes ès saisons les plus paisibles, et lorsque les eaux sont les plus tranquilles, et tout en un moment, en une saison inconneue, la montaigne d'eau se forme en un instant et fait une course, quelquefois bien longue, le long de l'eau, et quelquefois plus courte: et lorsque la montaigne fait son cours, elle renverse tous les bateaux qu'elle trouve en son chemin: parquoy les habitans limitrophes de la rivière, quand ils voyent le mascaret en sa formation, ils se prennent soudain à crier de toutes parts: garde le mascaret, garde le mascaret, et les bateliers qui pour lors sont en la rivière s'enfuyent ès rivages, pour sauver leurs vies, qui autrement seroyent près de leur fin. »

Figure 5 : extrait de la première page de l'ouvrage de Palissy (1586) où il présente sa théorie du mascaret sous forme d'un dialogue.

En effet, la plus ancienne référence connue est tirée de l'ouvrage de Palissy (1586), né à Agen en 1510, qui propose une théorie qui nous paraît fantaisiste, dans laquelle le mascaret est produit par des masses d'air emprisonnées dans le sol et qui ressortent en faisant gonfler le niveau de l'eau.

La plus ancienne description du phénomène est due à Sidoine Apollinaire (*Caius Sollius Apollinaris Sidonius*, 430-486), évêque de Clermont-Ferrand.

74

DV MASCARET QVI S'ENGENDRE
 dre au fleuve de Dourdongne en la Guîenne.

Theorique.



V m'as fait cy deuant vn bien long discours des effects des eaux, des feux & des tremblement de terre: mais tu ne m'as rien dit de la cause de l'essence du Mascaret.

Pratique

Et qu'est ce que tu appelles mascaret? car ie n'ouïs iamais parler de mascaret, n'y ne sçay que ce peut estre, si tu ne me le diz.

Theorique.

L'on appelle mascaret vne grande montaigne d'eau qui se fait en la riuiere de Dourdongne, vers les côtrées de Libourne, & ladite môtaigne ne se fait sinon au temps d'esté: mesmes ès faisons les plus paisibles, & lors q̄ les eaux sont les plus tranquilles, & tout en vn moment, en vne saison inconneue la montaigne d'eau se forme en vn instant & fait vne course, quelquefois bien longue, le long de l'eau, & quelque fois plus courte: & lors que la môtaigne fait son cours, elle renuerse tous les bateaux qu'elle trouue en son chemin: parquoy les habitans l'imithrophes de la riuiere, quand ils voyent

L'autre explication provient du fait que ce phénomène s'appelait autrement sur la Garonne puisque les textes anciens l'appellent le montant (Coulon, 1864) : « Les Normans appellent ce reflux d'eau la Barre de la Seine, comme les Bourdelois ont leur Montant de la Garonne & leur mascaret de la Dordogne ». La première explication moderne est réalisée par Bremon tier (1809), ingénieur des Ponts et Chaussées, qui entre 1770 et 1780, réalise en Aquitaine de nombreuses études concernant les ports et l'aménagement des dunes. Dans son ouvrage, il explique que le mascaret est produit par le déferlement de l'onde marée.

Il y aura par la suite une littérature abondante, en particulier sur le mascaret de la Seine qui a donné lieu à de nombreuses publications jusqu'à sa disparition en 1963 (Malandain, 1988). Avant les travaux d'endiguement, le mascaret atteignait une hauteur de 2,5 m à Caudebec, là où il a maintenant disparu. Mais il existe encore sous une forme cachée (que nous appelons ressaut de marées) comme le montrent les mesures réalisées par Bonneton *et al.* (2012b, 2012c). La thèse de Comoy (1881) décrit, avec beaucoup de détails, le mascaret

*Est locus, irrigua qua rupe. Garumna rotata,
 Et tu qui simili festinus in æquora lapsu
 Exis, curvata, Durani muscose, saburra,
 Jam pigrescentes sensim confunditis amnes.
 Currit in adversum hic pontus multoque recursu
 Flumina quas volvunt, et spernit et expedit undas.
 At quum summotus lunaribus incrementis
 Ipse Garumna suos in dorsa recolligit aestus,
 Præcipiti cursu raptim redit, atque videtur
 In fontem jam non refluxus, sed defluus ire.
 Protendit iter, qua pulsus ab aestu
 Oceanus refluxum spargit per culta Garumnam,
 In flumen corrente mari; transcendit amarus
 Blanda fluentia latex, fluviique impacta per alveum
 Salsa peregrinum sibi navigat unda profundum*

Il est un lieu où insensiblement vous confondez vos cours déjà ralentis, Garonne, dont la source coule d'un rocher riche en eau, et toi, Dordogne moussue qui te hâtes vers la plaine par une pente aussi rapide pour y couler ensuite sur le sable de ton lit. La mer, à cet endroit, court contre le courant et par le mouvement constant de flux et de reflux repousse ou invite les ondes qui roulent les rivières. Mais lorsque la Garonne, refoulée par les phases croissantes de la lune, rassemble de son côté ses flots en forme de barre, elle rétrograde précipitamment en un cours impétueux et semble alors retourner vers sa source non par un mouvement de reflux mais par une pente naturelle.

Il dirige ses pas aux lieux où l'Océan, poussé par la marée, fait refluer la Garonne et la répand à travers champs : la mer envahit le fleuve ; le flot amer escalade les eaux douces et, jetée avec force dans le lit de la rivière, l'onde salée vogue sur des profondeurs qui lui sont étrangères.

(Traduction Stephanie Dupays)

Tableau 2 : Extrait et traduction de la mention historique du mascaret de la Dordogne au IV^e siècle de notre ère.

Extrait de l'ouvrage de N. Brémontier

« Il est de fait, dit-il, que la marée dans la Gironde, depuis Royan, met trois heures pour se rendre dans les environs de Libourne et de Bordeaux, qu'elle a dû s'élever successivement pendant ce temps, par petites lames ou couches de 15 millimètres réduits d'épaisseur par minute, et par conséquent de 3 mètres ou 9 pieds sur les bords de la mer. Il est de fait encore que les courants du descendant, suivant qu'ils sont plus ou moins rapides, retardent plus ou moins la marche ou le développement de cette première petite lame; que la deuxième qui la suit ayant moins de difficultés à vaincre, doit acquérir plus de vitesse et parcourir en moins de temps l'espace déjà parcouru par la première, avec laquelle elle se trouvera nécessairement bientôt réunie; que, par la même raison, chacune des lames qui suivent acquérant un degré de vitesse de plus que celles qui les précèdent, elles finissent toutes par se réunir au même point que toutes ces petites lames une fois réunies, abstraction faite de diverses qui peuvent en déranger, en atténuer la marche ou l'accélérer, doivent nécessairement former une grosse lame et c'est cette grosse à laquelle on a donné les divers noms de flot, de première vague, de barre et de mascaret. »

de la Seine ainsi que celui des autres fleuves de France où des mascarets se produisaient autrefois (Charente, Adour...). On y trouve par exemple un profil de la Garonne et une description de son mascaret qui, à l'époque, ne remontait pas au-delà de Portets (130 km du Verdon) alors qu'aujourd'hui il remonte plus de 15 km en amont. De plus, il présentait son maximum en aval de Bordeaux, dans des zones où il est inexistant actuellement, puisqu'il se développe principalement en amont de Bordeaux.

Le mascaret de la Garonne

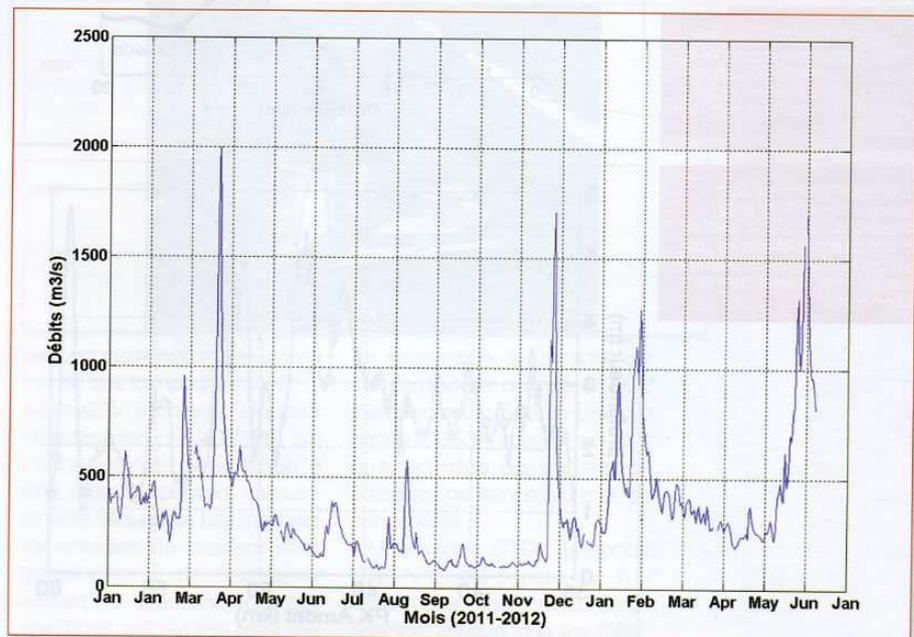
Le mascaret est un phénomène de brusque surélévation de l'eau d'un fleuve ou d'un estuaire associé à la marée montante, c'est un ressaut hydraulique. Physiquement, le mascaret correspond à la propagation d'un ressaut où apparaissent plusieurs ondes. Il se traduit par une vague ou une série de vagues, plus ou moins hautes, qui remontent le cours du fleuve

et dont l'importance varie en fonction de l'importance de la marée, du débit du fleuve et de la topographie. Généralement le mascaret est observable dans des estuaires à fortes marées et à morphologie convergente. Les mouvements turbulents intenses associés au mascaret

provoquent l'affouillement des sédiments, la mise en suspension des sédiments fins et leur transport vers l'amont. L'estuaire de la Gironde possède une forme caractéristique d'entonnoir, les rives convergent vers l'amont, on le qualifie d'hypersynchrone. Ceci provoque une augmentation duamage et des courants de marée de l'aval vers l'amont. La convergence des rives, et la faible profondeur, freinent l'onde de marée par dissipation d'énergie sur le fond, l'amplitude et la vitesse de l'onde ont tendance à diminuer. Cependant, lorsque la convergence est très importante, l'onde de marée gonfle et les effets de frottements deviennent moindres. Enfin, l'onde de marée devient dissymétrique, la durée du flot devient plus courte que la durée du jusant. Le phénomène peut être amplifié jusqu'à la formation d'un mascaret, engendré par une brusque élévation du niveau d'eau en début de flot. Plus le coefficient est important est plus le mascaret est important.



Figure 6 : débit de la Garonne à Tonneins (47) en 2010 et 2011.



La Garonne, longue de 580 km draine les $\frac{3}{4}$ du bassin versant, soit 55 000 km². Sur le site d'étude, dans sa partie aval, le régime hydraulique est pluvio-nival. Les forts débits automnaux et hivernaux correspondent aux pics de précipitations, et la fonte des neiges printanière amplifie ces débits. En été, les débits les plus faibles sont enregistrés et caractéristiques de la période d'étiage (Figure 6). La période d'étiage correspond aux plus forts

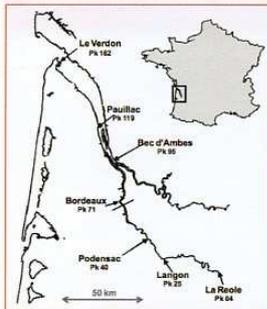
coefficients, ce qui est favorable à la formation de mascarets importants.

Site d'étude et marées

L'estuaire de la Gironde, situé sur la côte sud-ouest de la France, est formé par la confluence de la Garonne et de la Dordogne (Figures 7, 8 et 9). Notre étude se focalise sur le mascaret dans la Garonne, qui se propage vers l'amont du Pk 67 au Pk 37, (le

Pk 0 se situe sur la commune de Bourdelle, point de rentrée de la Garonne dans le département de la Gironde ; figure 8).

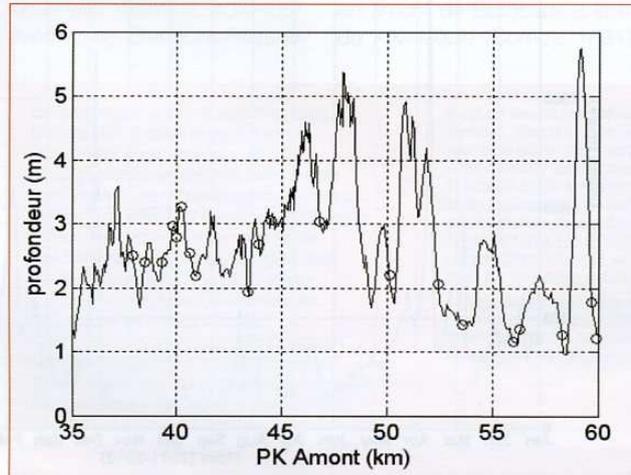
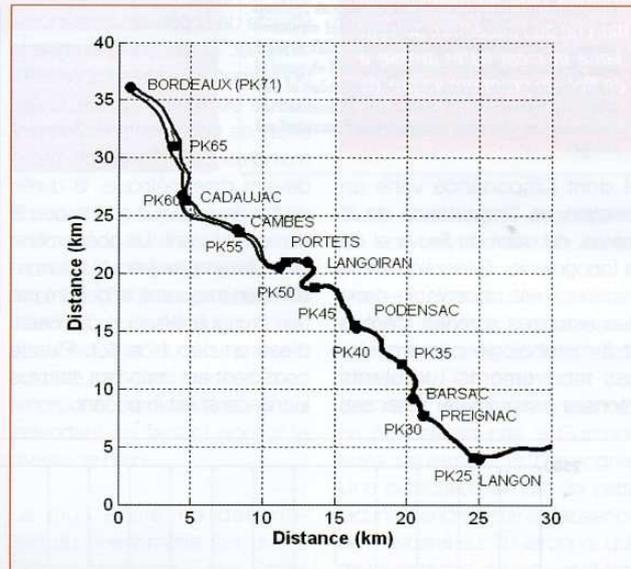
Le 10 Septembre 2010, la marée avait une amplitude de 5,1 m à l'embouchure de la Gironde (le Verdon), 6,1 m à Bordeaux et a atteint 6,3 m à Podensac, avec un débit de 125 m³.s⁻¹. Le coefficient de marée était élevé (de 114). La marée y a aussi joué un rôle essentiel. En effet, la figure 10 montre que la marée évolue fortement lors de sa propagation. Dans l'estuaire, l'onde est symétrique (le Verdon) et, lorsque la marée se propage, elle se déforme et augmente car elle devient asymétrique au centre de l'estuaire. Entre les Pk 35 et 65, Podensac est l'endroit où la marée est la plus élevée, avec un marnage de plus de 5 m.



► Figure 7 : localisation du site d'étude intensive measurements à Podensac. Le Pk « aval » est mesuré depuis le pont de Pierre de Bordeaux.

► Figure 8 : carte de localisation du mascaret avec les repères Pk le long de la Garonne (le Pk « amont » est mesuré depuis l'entrée de la Garonne en Gironde sur la commune de Bourdelles).

► Figure 9 : profondeur de la Garonne entre les Pk 35 et 60 ; profondeur moyenne juste avant le passage du mascaret avec les positions correspondantes des photographies aériennes utilisées dans cette étude (cercles).



Instrumentation utilisée durant les campagnes de mesure (Figure 11)

► Campagne 2009 : la réalisation du projet mascaret de l'équipe *Methys* a commencé en 2009 par le suivi d'un mascaret de forte amplitude durant une période de vives-eaux (coefficient de 110), le 20 septembre 2009. Cette campagne de mesure, couplée aux différentes observations antérieures, a permis de déterminer le meilleur site de mesure pour les campagnes suivantes. Le site se situe à Podensac (à environ 140 km en amont du Verdon), où le mascaret est bien formé sur toute la largeur (Parisot *et al.*, 2010) ;

► Campagne 2010 : la campagne 2010 s'est décomposée en deux phases. La première a eu lieu en février/mars, afin de tester le bon déroulement des mesures et le mouillage des

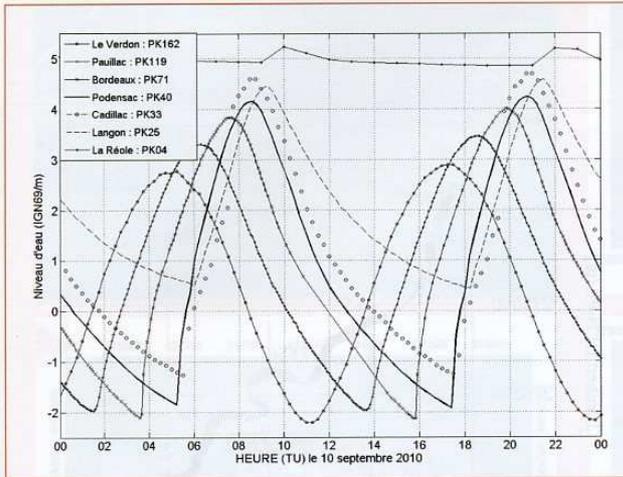


Figure 10 : séries temporelles de l'élévation de la marée du 10 septembre 2010 à différents endroits de l'estuaire (Pk « amont ») de la Gironde et de la Garonne.

structures appareillées, en vue de la campagne de septembre. La phase de test a été menée avec deux capteurs de pression, un ADCP, et un ADV. Le mouillage s'est bien déroulé et les structures

► En septembre 2011, quatre instruments de mesures ont été immergés à Podensac, pour enregistrer l'évolution du mascaret pendant le cycle de marée.

séparées de 120° chacune. En 2011, l'ADV a mesuré la vitesse à une fréquence de 32 Hz. Enfin, l'ADV comprend un capteur de pression pour estimer la profondeur d'immersion et un capteur de température ;

- Un OBS (*Optical Backscattering Sensor*) : l'OBS mesure la turbidité de l'eau grâce à un signal optique. Il envoie un signal infrarouge dans l'eau et capte le taux de lumière revenant sur l'appareil en raison de la diffusion sur les particules

Site	Pk	BM (TU)	Ecart en temps (h:min)	Distance (km)	Vitesse (km/h)
Le Verdon	162	11:05			
Pauillac	119	13:36	2:31	43	17,1
Bordeaux	71	15:48	2:12	48	21,8
Podensac	40	17:24	1:36	31	19,4
Langon	25	18:15	0:51	15	17,6
La Réole	4	21:00	2:45	21	7,6
		Moyenne	9:55	158	15,9

Tableau 3 : évaluation de la vitesse moyenne de propagation de la marée à partir des courbes de marée du 10 septembre 2010 (Coefficient de marée : 114). Les sources sont respectivement les marégraphes du SHOM (Le Verdon, Pauillac, Bordeaux) et les données Vigicrues (Langon et La Réole) et nos mesures (Podensac).

ont permis de protéger le matériel face au charriage pouvant être important en période de fort débit fluvial hivernal. En février 2010, les connaissances sur le mascaret ne laissaient pas envisager la présence du phénomène à cette période, cependant les capteurs de pression ont révélé des mascarets de faibles amplitudes (50 cm, en mortes eaux). C'est donc à partir de cette date que le nom de mascaret est utilisé pour les ressauts ondulants bien visibles, et de nommer le phénomène « *ressaut de marée* » en conformité au terme anglais de *tidal bore* (Bonneton *et al.*, 2012b). Ce résultat confirme la zone de Podensac pour la campagne de mesure de septembre. Au cours de celle-ci, la vitesse du courant a été quantifiée grâce à deux ADCP (2 Hz) ;



Figure 11 : structure en forme d'igloo sur laquelle les instruments décrits ci-dessus sont installés. Le tout est installé sur un bloc de béton d'un poids de 300 kg. L'ensemble est relié à un autre bloc de béton équipé d'un flotteur signalant la présence des instruments dans le fond de la Garonne.

Les principaux instruments utilisés lors de ces campagnes sont :

- Un ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) : l'ADV est un courantomètre acoustique à effet Doppler, pouvant mesurer à haute fréquence. Les mesures de vitesses de courant sont ponctuelles et décomposées suivant les directions verticale, nord et est, grâce à trois branches

en suspension. La turbidité est standardisée et donnée en NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*). La sonde OBS3A intègre, en plus du turbidimètre, des capteurs de pression, de température et de conductivité ;

- Une sonde CTD : la sonde CTD NKE est constituée d'un turbidimètre, basé sur le même principe optique que les OBS,

mais avec une gamme de turbidité moindre que l'OBS. La sonde comporte également des capteurs de pression, température et salinité.

La Garonne est considérée comme un milieu hostile pour les appareils, le fleuve charriant fréquemment de lourds objets comme des troncs d'arbres. Pour protéger les appareils de mesure du mieux possible, des structures ont été spécialement créées (Figure 11).

Le suivi du 10 Septembre 2010

Le bateau s'est placé à l'avant du mascaret, le plus près possible en surfant sur la première vague, sur une distance de près de 30 km. Pendant le parcours, trois GPS ont été mis en place sur le bateau : un pour mesurer les coordonnées de la trajectoire du bateau, avec une précision d'environ 3 m ; un deuxième pour délimiter les mascarets à grosses vagues (> 50 cm) et le dernier pour relever les zones à mascarets majeurs (Figure 12).

L'avion a suivi l'évolution du mascaret et a permis de réaliser une couverture photographique. La présence simultanée du mascaret et du bateau sur les photographies a permis de reconstituer un ordre chronologique des photographies, avec l'heure de prise de vue. Une fois les images triées, il a été possible de faire une estimation de la vitesse du mascaret, connaissant la distance parcourue et l'intervalle de temps entre deux clichés

Le protocole de mesure

1. Les images sélectionnées pour couvrir de manière régulière le

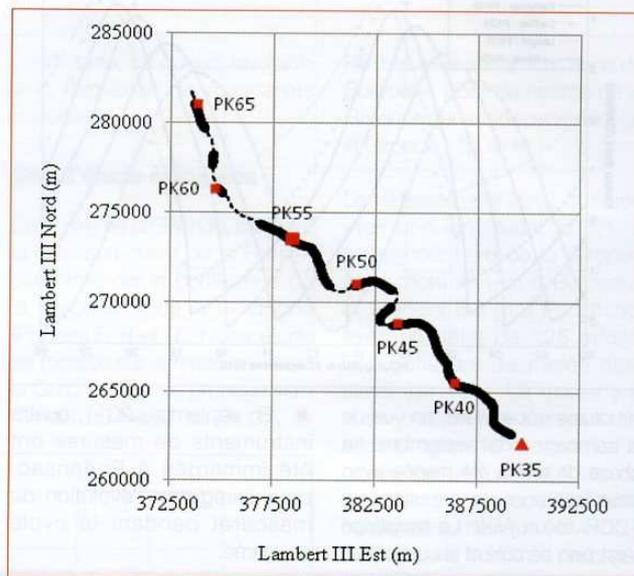


Figure 12 : détermination des zones à gros mascarets sur la Garonne entre Barsac (Pk 35) et Bordeaux (Pk 71). Les pointillées correspondent à des zones de très faibles mascarets et les zones épaisses, à l'inverse, à des mascarets importants (> 50 cm).

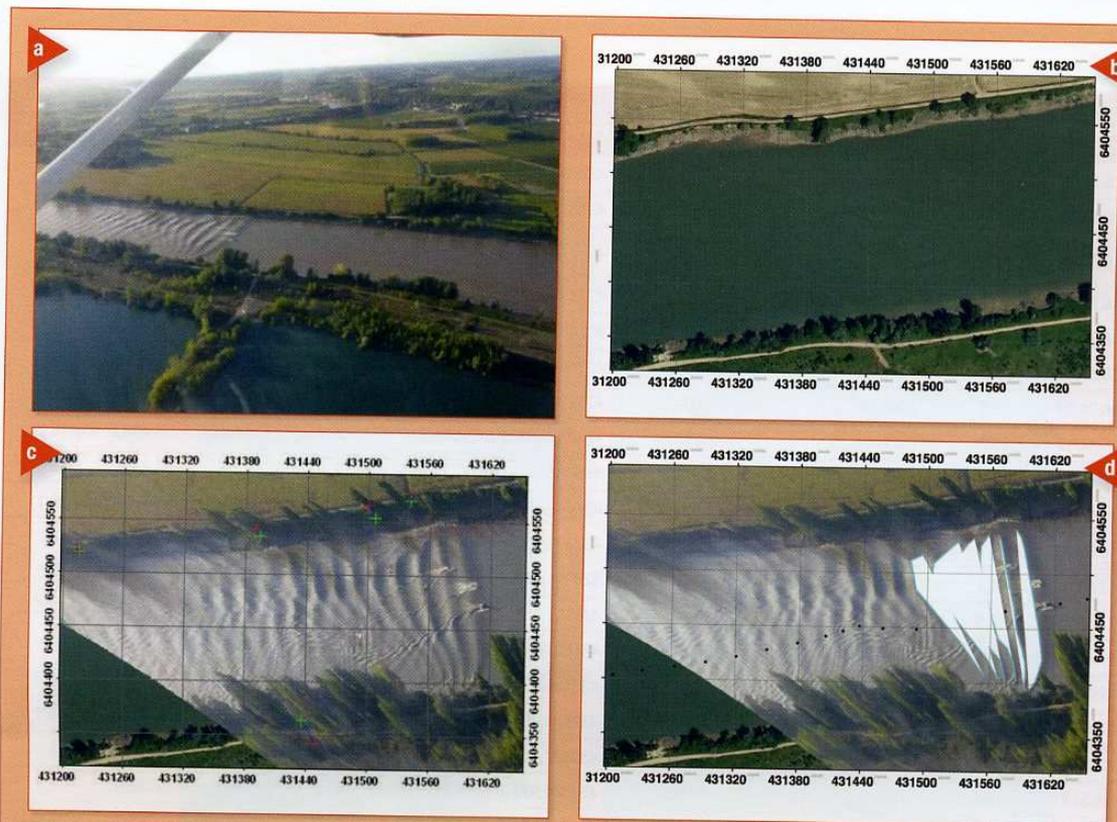
parcours sont redressées à l'aide du logiciel ArcGIS10 en utilisant les orthoradiales de l'IGN. Une vingtaine de points communs sont utilisés afin de projeter soigneusement la zone couvrant le mascaret. Tout l'ensemble est projeté dans le système Lambert 93 ;

2. On ajoute plusieurs couches dont la bathymétrie réalisée en 2003 par le Port autonome de Bordeaux, le trajet du bateau ainsi que le repérage des Pk de la Garonne ;

3. La co-exploitation de la trajectoire du bateau et de l'image du bateau sur la photographie constitue un test de cohérence entre la chronologie des photographies et celle du bateau, d'une part, et une estimation de la qualité du géo-référencement. On trouve un biais inférieur à 3 m, ce qui est compatible avec la chronologie des photographies horodatées à la seconde (pour mémoire, le mascaret se déplace en moyenne à 5 m/s) ;

4. Sur chaque photographie, on détermine la position du centre de la première vague, les longueurs d'ondes et les formes des six premières vagues et leur allure.

Pour cette étude, seules les photographies de P. Bonneton sont utilisées, car celles réalisées par le photographe n'avaient pas un champ suffisant. Il y a plus de 230 photographies dont vingt-quatre ont été sélectionnées et redressées à l'aide du logiciel ArcGIS. Les photographies sélectionnées représentent des vagues bien formées (Figure 13A). Il est important de prendre en compte les détails sur les photos en dehors du mascaret car ils facilitent le géoréférencement, autrement dit le positionnement des photographies sur une carte de référence de l'IGN, par rapport au système de coordonnées Lambert 93. Le travail est rendu aisé par la présence des grandes infrastructures,



par exemple les routes, les terrains à formes spécifiques ou encore des bâtiments. Plus il y a de points de géoréférencement et plus l'ordre de transformations sera grand et donc précis. Une fois la photo géoréférencée et redressée (fig.13C), les mesures peuvent commencer.

Pour repérer les différentes vagues on utilise l'outil « dessiner des polygones » sur ArcGIS ; en ouvrant un tableau attributaire, on peut, ensuite, mesurer les longueurs d'onde et la largeur du chenal. Avec l'outil « construire des points », on détermine la position du

Sur chaque photo, les formes des six premières vagues du mascaret sont déterminées. La position du centre du front, la largeur et la longueur d'onde des vagues sont mesurées (fig.13D). En superposant la couche des Pk sur la carte il est possible de se repérer et de situer le centre du front. Une fois que les photographies sont géoréférencées, nous pouvons les rassembler sur une seule carte, pour une vue d'ensemble (figure 14).

Formes et longueurs d'onde des vagues

À partir des photographies géoréférencées et les mesures sur le logiciel ArcGIS, chaque image peut être replacée sur la Garonne. Cela permet d'observer l'évolution du mascaret avec les formes variées de vagues et une variation de longueur d'onde suivant le lieu (Tableau 4). Dans le tableau, ne sont référencées que les premières vagues de chaque photographie. Les formes

▲ Figure 13 : les différentes étapes pour géoréférencer les photographies aériennes :

a : photo aérienne P1050680, Pk 44.6, 17h19 TU avec le mascaret qui se propage de la gauche vers la droite ;

b : carte IGN 04731-6405 en Lambert 93 ;

c : photos superposées sur la carte IGN avec points de géoréférencement ;

d : photo redressée et géoréférencée avec la trajectoire du bateau (points) et les traits de mesures des six premières vagues du mascaret qui se propagent de gauche vers la droite.

Figure 14 : l'image (a) est l'assemblage de toutes les photographies géoréférencées sur une carte IGN à partir de l'île Lalande (en haut à gauche) jusqu'au pont au Pk 37.9 avec les points GPS du bateau (vert) et les formes des six premières vagues pour chaque photographie (bleu turquoise). L'image (b) est la partie manquante de la vue d'ensemble, avec un zoom positif de l'île La Lande (en bas au milieu), les points GPS du bateau (vert), les points Pk (violet) et du point de départ du bateau (en haut, au bout des points de GPS).

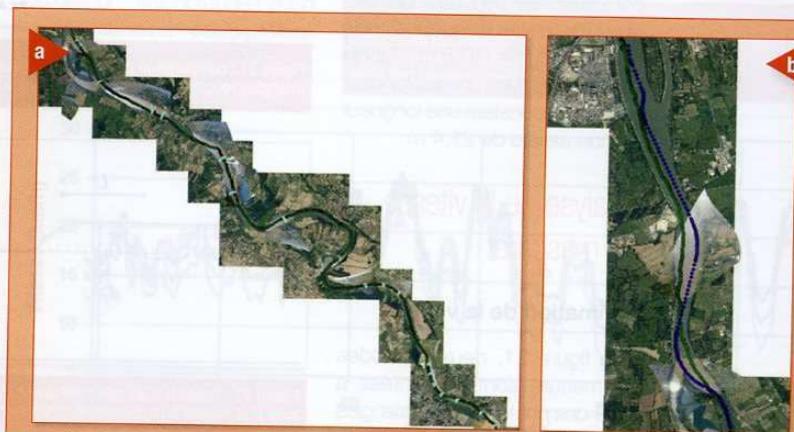


Photo	Heure (TU)	Longueur d'onde (m)	Forme des vagues	Longueur du Chenal (m)	Lambert93 Est (m)	Lambert93 Nord (m)	PK Amont (km)	Différence de distance (m)	Temps (s)	Vitesse (km/h)
P1050535	16:15:00	4,1	linéaire	116,7	421604,197	6417859,472	67,2			
P1050541	16:15:52	4,5	assez linéaire	80,2	421692,653	6417730,775	66,0	156,2	52,0	10,8
P1050553	16:20:14	22,2	linéaire (seulement moitié de vague)	538,2	421716,808	6416137,003	64,3	1594,0	262,0	21,9
P1050569	16:27:43	21,2	cloche plat	418,4	422217,403	6413798,14	61,8	2391,8	449,0	19,2
P1050586	16:32:30	10,9	Concave	287,2	422437,401	6412104,578	60,0	1707,8	287,0	21,4
P1050591	16:33:16	12,9	linéaire	280,5	422604,642	6411972,39	59,8	213,2	46,0	16,7
P1050611	16:36:29	10,5	linéaire	609,1	423202,791	6410816,153	58,4	1301,8	193,0	24,3
P1050620	16:44:17	15,3	linéaire	243,8	424936,483	6409881,314	56,4	1969,7	468,0	15,2
P1050629	16:45:36	21,4	linéaire	321,6	425217,207	6409771,025	56,0	301,6	79,0	13,7
P1050644	16:53:14	17,1	Convexe	294,9	427060,669	6408389,404	53,6	2303,7	458,0	18,1
P1050648	16:57:25	15,1	assez linéaire	269,4	427393,350	6407308,246	52,5	1131,2	251,0	16,2
P1050655	17:03:41	14,3	linéaire	250,9	429048,078	6406542,526	50,1	1823,3	376,0	17,5
P1050669	17:12:50	24,5	linéaire	180,6	430717,888	6405309,55	46,9	2075,7	549,0	13,6
P1050680	17:19:00	20,4	Convexe	157,6	431601,966	6404467,704	44,6	1220,8	370,0	11,9
P1050686	17:20:40	14,9	Convexe	161,9	432156,804	6404477,367	44,0	554,9	100,0	20,0
P1050693	17:22:18	14,1	assez linéaire	173,6	432629,095	6404210,846	43,4	542,3	98,0	19,9
P1050715	17:30:08	12,0	un peu ondulée en S	149,5	433567,412	6401965,36	41,0	2433,6	470,0	18,6
P1050722	17:31:10	14,0	linéaire	150,1	433631,972	6401655,728	40,7	316,3	62,0	18,4
P1050728	17:32:15	19,8	forme C inverse	154,1	433767,224	6401345,529	40,3	338,4	65,0	18,7
P1050731	17:32:26	23,8	assez linéaire, Convexe	145,8	433791,647	6401287,456	40,2	63,0	11,0	20,6
P1050740	17:33:25	15,6	linéaire	176,2	434007,416	6401015,526	39,9	347,1	59,0	21,2
P1050743	17:35:14	20,6	linéaire	158,3	434497,906	6400827,537	39,4	525,3	109,0	17,3
P1050761	17:37:51	22,8	assez linéaire	131,7	435233,984	6400424,054	38,5	839,4	157,0	19,2
P1050768	17:39:46	20,7	ondulé, Convexe	138,5	435640,919	6400009,463	37,9	580,9	115,0	18,2

Tableau 4 : résultat des mesures à partir des photographies aériennes pendant l'évolution du mascaret du 10 Septembre 2010 avec les heures (TU) et les repérages Pk.

peuvent différer dans le même front du mascaret : la première vague est souvent ondulée. La comparaison de la longueur d'onde avec la profondeur de la Garonne montre que moins il y a d'eau, plus la longueur d'onde est élevée. En effet, au Pk 58, la côte maximale peut atteindre 8 m et au Pk 58,4 la longueur d'onde est la plus faible (10,5 m). Tandis qu'au Pk 56 avec une profondeur de 3 m on constate une longueur d'onde élevée de 21,4 m.

Analyse de la vitesse de mascaret

Estimation de la vitesse

À la figure 21, deux méthodes de mesure sont présentées à partir des photographies (triangles rouges) et à partir du GPS du

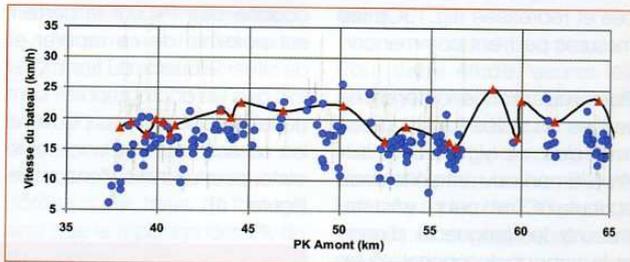


Figure 21 : comparaison de la vitesse du mascaret déterminée à partir des photographies (triangles rouges) et de la vitesse du bateau filtrée (points bleus).

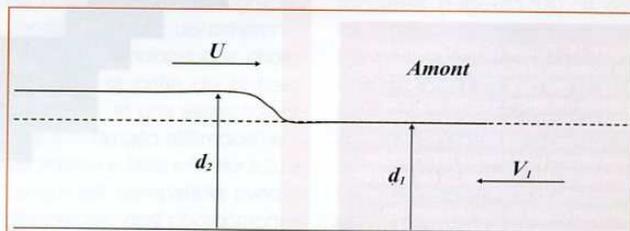


Figure 22 : Schéma d'un mascaret qui se propage vers l'amont, (Chanson 2011), avec U la vitesse du mascaret, V_1 la vitesse du courant, d_1 la hauteur d'étiage et d_2 la marée.

Quelques exemples de photographies de mascaret non géoréférencées



Figure 15 : photographie aérienne P1050769 prise à 17h43'47" (TU) montrant le mascaret qui passe sous le pont au Pk 37,9, avec apparition de vagues de formes concaves.



Figure 16 : Photographie aérienne P1050629 réalisée à 16h45'42" (TU) au Pk 56 illustrant un mascaret ondulé.



Figure 17 : Image aérienne P1050693 prise à 17h22'18" (TU) au Pk 43,4, montrant le passage du mascaret.



Figure 18 : Photographie aérienne P1050743 réalisée à 17h35'14" (TU) au Pk 39, montrant le passage du mascaret qui déferle sur le site de Podensac.



Figure 19 : Image aérienne P1050541 prise à 16h15'52" au Pk 66 montrant un petit mascaret linéaire.



Figure 20 : Photographie prise à partir du bateau à 17h39' avec la présence de surfers.

bateau (ronds bleus). La comparaison des deux courbes montre que l'écart est faible ; la courbe en pointillés donne la vitesse du déplacement du bateau. Les points bleus représentent la vitesse filtrée pour obtenir celle des vagues. Seules les accélérations inférieures à $0,03 \text{ m.s}^{-2}$ sont retenues ; elles correspondent à un déplacement poussé par le mascaret, la vitesse du bateau étant alors très proche de celle du mascaret.

La vitesse du mascaret est aussi calculée en utilisant la formule de la célérité d'une vague en eau peu profonde, $c = \sqrt{gh}$ où g représente l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$) et h la hauteur d'eau, avec $h = d1 + d2$ (Figure 22). La forme des mascarets peut s'analyser avec le nombre de Froude, une quantité sans dimension qui correspond au

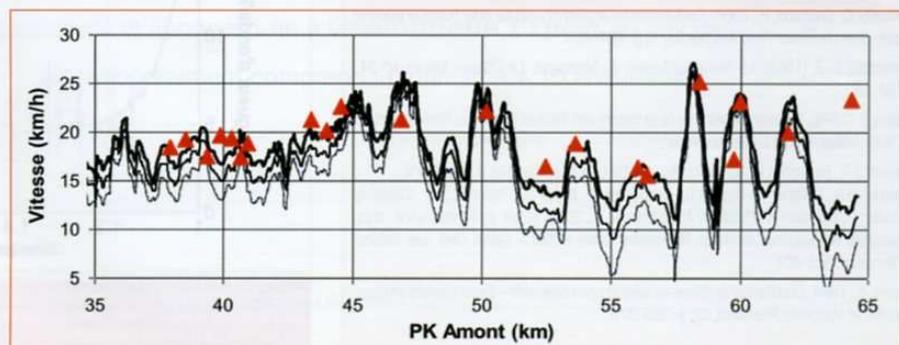
rapport entre la vitesse relative du mascaret/fleuve et la célérité de l'onde :

$$Fr = \frac{V_r + U}{\sqrt{gh}}$$

Dans la figure 23, les différentes courbes ont été obtenues avec $h = d1 + d2$ où $d1$ est la profondeur à l'étiage et $d2$ est une estimation de la marée.

La figure 23 met en évidence une sous-estimation de la vitesse par rapport à celles calculées à partir des photographies aériennes. Ceci montre que les vagues des mascarets avaient une hauteur approximative de 1,5 m. Pour étayer cette conclusion,

Figure 23 : comparaison des vitesses du mascaret calculée avec les différents paramètres $d2$, avec $d2 = 50 \text{ cm}$ pour la ligne inférieure ; $d2 = 1 \text{ m}$ pour la ligne centrale ; $d2 = 1,5 \text{ m}$ pour la ligne supérieure et les vitesses obtenues à partir des photographies aériennes (triangles rouges).



la photographie prise avec les surfeurs (figure 20) montre que les vagues mesuraient pratiquement autant qu'eux. De plus, les vitesses varient entre 15 et 25 km/h, fourchette qui concorde avec les données relevées lors de l'étude menée avec les instruments à capteurs de pression, placés dans l'eau, à Podensac. Les études de Bonneton et al., (2011a et 2011b) donnaient 18,72 et 19,08 km/h.

Bibliographie

Bartsch-Winkler S., Lynch B. (1988) : *Catalogue of Worldwide Tidal Bore Occurrences and Characteristics. US Geological Survey Circular 1022*

Bonneton N., Bonneton P., Parisot J.-P. et Sottolichio A. (2012b) : Ressaut de marée et mascaret – exemples de la Garonne et de la Seine. XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil. Cherbourg, 12-14 juin 2012

ibid. (2012c) : Accepté dans C.R. Acad. Sci.

Bonneton P., Parisot J.-P., Bonneton N., Sottolichio A., Castelle B., Marieu V., Pochon N. et Van de Loock J., 2011a. *Large amplitude undular tidal bore propagation in the Garonne River, France, Proc. 21st ISOPE conf.*, 2011, Hawaï.

Bonneton P., Van de Loock J., Parisot J.-P., Bonneton N., Sottolichio A., Detandt G., Castelle B., Marieu V., Pochon N., 2011b. *On the occurrence of tidal bores – The Garonne River case. Journal of Coastal Research, Special Issue*, 64, p. 1462-1466.

Bonneton P., Van de Loock J., Parisot J.-P., Bonneton N., Sottolichio A., Detandt G., Castelle B., Marieu V. et Pochon N., (2012a) *On the occurrence of tidal bores - The Garonne River case. Journal of Coastal Research*, SI 64, à publier.

Bremontier N. (1809). *Recherches sur le mouvement des ondes*. Firmin Didot, Paris.

Chanson H., (2005). Mascaret, Aegir, Pororoca, Tidal Bore. Quid ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ? *La Houille Blanche*, n° 3, p. 103-114.

Chanson H., 2011a. *Current knowledge in tidal bores and their environmental, ecological and cultural impacts. Environmental Fluid Mechanics*, 11, p. 77-98.

Comoy M. (1881). *Étude pratique sur les marées fluviales et notamment sur le mascaret*. Gauthier-Villards, Paris, 399 p.

Coulon L. (1864). *Les rivières de France, ou description géographique et historique du cours et débordement des fleuves, rivières, fontaines, lacs et estangs qui arrosent les provinces du royaume*. G. Clousier, Paris.

Destriau G. (1951). *Le mascaret. Annales des Ponts et Chaussées*, n° 121, p. 609 – 635.

Donnelly, C., Chanson, H., 2005. *Environmental impact of undular tidal bores in tropical rivers. Environmental Fluid Mechanics*, 5, p. 481-494.

Malandain J.-J. (1988). *La Seine au Temps du Mascaret. Le Chasse-Marée*, n° 34, pp 30-45

Palissy B. (1586). *Discours Admirable de la Nature des Eaux et Fontaines tant Naturelles qu'Artificielles*. Martin Le Jeune, Paris.

Parisot J.-P., Bonneton P., Bonneton N., Van de Loock J., Castelle B., Marieu V., Sottolichio A., Detandt G., Oggian G., Derriennic H., Bujan S., Tissier M., Castaing P., Lubin P., Chanson H., Pradalier F., et Marcel, R., 2010. *Étude préliminaire des mascarets d'Aquitaine. Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Les Sables d'Olonne*, p. 945-954.

Treske, A., 1994. *Undular bores (fave-waves) in open channels – Experimental studies. Journal of Hydraulic Research*, 32, p. 355-370.

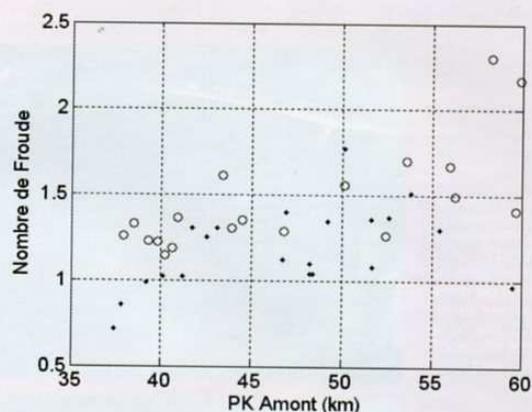


Figure 24 : le nombre de Froude déterminé de deux manières différentes : à partir de la vitesse du bateau (points) et à partir de la propagation calculée à partir des photographies aériennes (cercles).

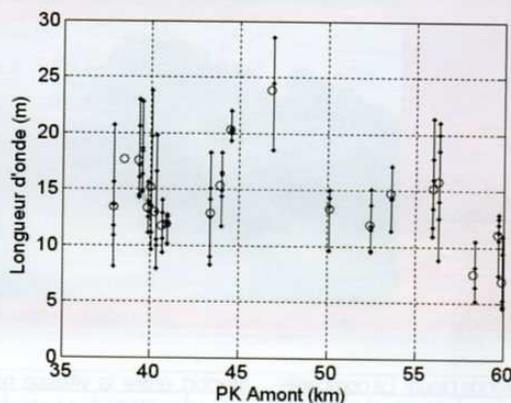


Figure 25 : les longueurs d'onde mesurées sur le milieu des six premières vagues, avec les valeurs moyennes représentées par des cercles.

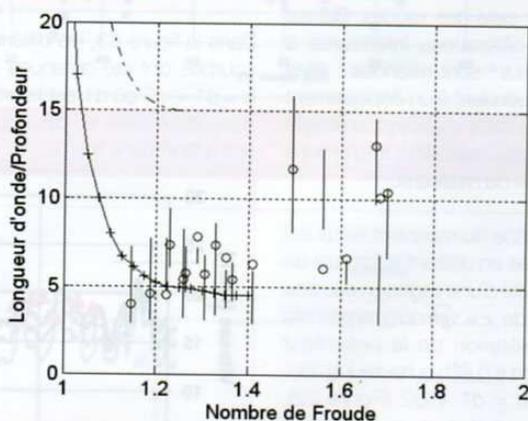


Figure 26 : rapport entre la longueur d'onde rapportée au nombre de Froude. Les courbes sont tirées de Treske (1994), avec le trait plein qui correspond à un canal rectangulaire et les pointillés à un canal trapézoïdal.

Comparaison avec les mesures de laboratoire

Le calcul du nombre de Froude permet de comprendre l'évolution du mascaret. La figure 24 montre les nombres de Froude calculés à partir des images aériennes et à partir de la vitesse du bateau.

Les longueurs d'onde constituent des paramètres importants. Grâce à cette nouvelle méthode, c'est la première fois qu'elles ont pu être mesurées le long de la Garonne (figure 25). Les mesures de longueur d'onde permettent également de reproduire les données de laboratoire de Treske, 1994 (figure 26). Les moyennes des longueurs d'onde et le rapport avec la profondeur en fonction

du nombre de Froude calculé, permettent de caractériser les deux types de canaux dans lequel le mascaret se propage : canal rectangulaire ou canal trapézoïdal. La Garonne, elle, se comporte comme un canal rectangulaire.

Conclusion

Cette méthodologie originale, développée grâce aux possibilités

d'ArcGIS, nous a permis, à partir de photographies aériennes, d'avoir accès à des paramètres inédits : c'est la première fois qu'un mascaret est suivi et mesuré sur tout son développement. On a pu déterminer non seulement la vitesse de propagation, en bon accord avec les prévisions théoriques, mais aussi les caractéristiques des vagues (forme des vagues, longueur d'onde...). I

Remerciements

Ce travail a été réalisé 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. Detandt, G. Oggian, N. Pochon (EPOC) et F. Pradalier (CKBN). Les VNF de Cadillac nous ont été d'un très grand soutien pour le mouillage des instruments dans la Garonne, ainsi que Y. Lavigne pour les photos aériennes. Nous remercions également L. Bajolle pour le pilotage du bateau.

ABONNEZ-VOUS !



TARIFS

	1 an	1 numéro
FRANCE	70 €	14 €
Education	55 €	
Prix TTC (TVA 2,1 % incluse)		
Union Européenne	85 €	16 €
Etranger	95 €	18 €

Géomatique

Expert

Le premier bimestriel français consacré entièrement aux technologies et aux applications des systèmes d'information géographique.

OUI, je souhaite m'abonner 1 an à **Géomatique Expert** au prix de €

Mon abonnement comprend : 6 numéros + 10 eNewsletters

Je règle mon abonnement par : chèque ci-joint à l'ordre de CIMAX à réception de facture virement ou mandat administratif

Prénom Nom

Société / Organisation Fonction

N° TVA intracommunautaire

Adresse

Code postal Ville

Tél. eMail (pour recevoir les newsletter)

L'abonnement ne sera pris en compte qu'accompagné de son règlement. Je souhaite recevoir une facture acquittée.
 À renvoyer sous enveloppe affranchie au tarif en vigueur à : **Géomatique Expert** Service Abonnements
 12, place G. Pompidou • 93167 Noisy-le-Grand cedex • Tél. : 01 45 92 98 98 - Fax : 01 49 32 10 74

IMPORTANT : Une enveloppe affranchie est à joindre à votre demande.