

# Mascaret, Aegir, Pororoca, Tidal Bore. Quid ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?

*Tidal Bore, Aegir, Pororoca, Mascaret. Quid? Where? When? How? Why?*

Hubert Chanson

Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australie  
Ph.: (61 7) 33 65 43 63 — Fax: (61 7) 33 65 45 99 — E-mail: h.chanson@uq.edu.au

*Tidal bores are a hydraulic phenomenon that is often not well explained and poorly documented. Herein, the writer explains what a tidal bore is, where it occurs, since when it has been observed, how it develops and why the occurrence of a bore has a significant impact on estuarine systems. In particular it is shown that a tidal bore results from a fragile balance between tidal and fluvial conditions, the estuary shape, and the meteorological conditions. Further information is available on the Internet {[http://www.uq.edu.au/~e2hchans/tid\\_bore.html](http://www.uq.edu.au/~e2hchans/tid_bore.html)} and {<http://www.uq.edu.au/~e2hchans/mascaret.html>}.*

*Keywords: Tidal Bore, Aegir, Pororoca, Estuary, Ecological impact.*

## I ■ INTRODUCTION

Le Petit Robert définit le mascaret comme une « longue vague déferlante produite dans certains estuaires par la rencontre du flux et du reflux ». L'origine du mot viendrait, au XVI<sup>e</sup> siècle, du gascon « masquaret », signifiant « bœuf tacheté » (Petit Robert 1996). Un mascaret est une onde positive de translation, appelée aussi onde de compression ou resaut en translation (Henderson 1966, Viollet *et al.* 2002, Chanson 2004a,b). Un mascaret peut se produire dans une rivière, quand l'embouchure a un fond plat, et une forme convergente, et le marnage est supérieure à 6 à 9 m (*fig. 1 et 2*). (On trouvera différentes traductions du mot « mascaret » dans l'Appendix A.) Visuellement, il s'agit d'une onde, ou d'une série d'ondes, se propageant vers l'amont, dans l'embouchure d'une rivière, quand la marée commence à remonter. C'est une discontinuité de la surface libre, avec un accroissement brutal de la hauteur d'eau. A un instant donné, le mascaret représente l'extrémité amont de la propagation de la marée montante dans la zone intertidale. Avant l'arrivée du mascaret, la rivière s'écoule vers l'océan, tandis que le flux est souvent renversé après le passage du mascaret (ex. Lynch 1982, Chanson 2001). De plus, le mascaret n'a lieu qu'à marée montante.

Dans cet article, on cherche à documenter, et à démystifier, l'existence du mascaret. On explique où on peut le rencontrer, et depuis quand il existe. Ensuite, on décrit le développement du mascaret, et sa progression vers l'intérieur des terres. Enfin, on discute de l'importance, pour notre environnement, de ce phénomène, et de sa fragilité.

## II ■ OÙ TROUVE-T-ON UN MASCARET ?

En France, les mascarets les plus connus sont ceux de la Baie de Seine, de la Baie du Mont-Saint-Michel, et de la Gironde/Garonne/Dordogne. Le mascaret de la Seine a été bien documenté par de nombreuses études aux XVIII<sup>e</sup>, XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles (ex. Bouniceau 1845, Bazin 1865, Malandain 1988). Connu localement sous le nom de « barre », le mascaret de la Seine avait une sinistre réputation à cause de sa puissance, sa force de destruction, et son caractère imprévisible. On parle, improprement, de la noyade de Léopoldine Hugo, le 4 septembre 1843, dans le mascaret : cette histoire est une fable, car on était en période de mortes eaux, et il n'y avait pas de mascaret. Par contre, plus de 220 navires furent perdus entre 1789 et 1840, dans la section Quillebœuf-Villequier (Malandain 1988). De nos jours, le mascaret de la Seine a pratiquement disparu, depuis les travaux d'endiguement et de dragage, entre Rouen et Le Havre, dans les années 1960. Toutefois, les documents de navigation continuent de le mentionner, et il est parfois observé, en périodes de grandes marées et d'étiage.

La Baie du Mont-Saint-Michel est le siège d'un nombre important de mascarets, grands et petits. Les mascarets les plus importants ont été ceux des rivières Couesnon, Sélune et Sée. Le premier a pratiquement disparu, après la construction d'un barrage en 1969. Par contre, le mascaret de la Sélune et de la Sée reste un phénomène impressionnant, se développant dans la Baie, sur plusieurs kilomètres de largeur, avant de s'engouffrer dans la Sélune et la Sée, à la Roche-Torin et la Pointe du Grouin du Sud, respectivement



(A) Mascaret de la Sélune (à Pontaubault), Baie du Mont Saint Michel, le 7 Avril 2004 autour de 9:05 (coefficient 107, marnage 13,7 m au Mont-Saint-Michel) — Remarquons le kayakiste, près de la rive droite, en haut à gauche, et le pont de chemin de fer en arrière-plan.



(B) Mascaret de la Dordogne (à Saint-Pardon), le 27 Septembre 2000 autour de 17:00 (coefficient: 103, marnage : 4,6 m à la Pointe de Grave).



(C) Mascaret de la Seine à Quilleboeuf (Collection Hauchard, Pont-Audemer, avec l'aide de J.J. Malandain) — Vue vers l'aval du mascaret déferlant.

Figure 1 : Le mascaret en France.



(A) Mascaret de Hangzhou, rivière Qiantang, en Chine, le 11 Novembre 2003  
(Courtesie du Professeur Yu Dajin) — Vue vers l'aval, depuis la rive gauche.



(B) Mascaret de la Rivière aux Saumons  
(Salmon River) à Truro (Baie de Fundy),  
Canada, le 22 Septembre 2001 (Courtesie  
du Dr M.R. Gourlay) — Vue des éteules  
depuis la rive gauche.

Figure 2 : Le mascaret hors de France.

(Appendix B). De plus, on observe une multitude de petits mascarets dans les différents chenaux de la Baie : par exemple, dans le chenal immédiatement à l'Est de la Digue menant au Mont-Saint-Michel.

Le mascaret de la Gironde/Dordogne/Garonne est relativement mieux documenté (e.g. Chanson 2001). Il se développe en Gironde, avant de se séparer à la confluence de la Garonne et Dordogne. Le mascaret peut remonter au delà de Bordeaux et de Libourne, en fonction des conditions tidales, fluviales et atmosphériques. L'un des meilleurs points de vue, sur la Dordogne, est le village de Saint-Pardon (fig. 1B).

En Grande Bretagne, on observe le mascaret sur plusieurs rivières. Le mascaret le plus connu est celui de la rivière Severn, près de Bristol, mais le mascaret existe aussi sur les rivières Dee, Trent et Mersey<sup>1</sup>. Au Canada, plusieurs mascarets sont observés dans la Baie de Fundy. Celui de la rivière Petitcodiac était très impressionnant, avant la construction d'un barrage en 1968. La rivière Maccan, et la Rivière aux Saumons (fig. 2B), sont aussi sujettes aux mascarets. En Alaska, on peut mentionner les estuaires Knick Arm et Turnagain, près d'Anchorage. En Amérique, l'estuaire de la rivière Colorado, au Mexique, mais surtout l'estuaire de l'Amazone. Le mascaret de l'Amazone est appelé le « pororoca » ; c'est le mascaret le plus puissant de notre planète, et il est unique, car il se développe en pleine mer, grâce à la forme très particulière des fonds marins, à l'embouchure. L'Equipe Cousteau a filmé le pororoca, en pleine mer, où il avait une largeur de plus de 20 km, une hauteur de près de 2 m, et le front était suivi par un train de plus de 18 ondulations bien régulière, avec une longueur d'onde de l'ordre de 20 m (Murphy 1983).

En Asie, la rivière Qiantang est sujette à un mascaret très important, qui remonte jusqu'à la ville de Hangzhou, en Chine. Le bras nord, de l'estuaire Changjiang (Chine), et aussi le sujet d'un mascaret, plus petit. On observe aussi le mascaret en Malaisie (Sarawak), en Papouasie-Nouvelle-Guinée (rivières Fly et Bamu), en Inde (rivière Hoogly), et en Australie (rivières Daly et Styx). En Afrique, le mascaret de la rivière Pungue (Mozambique) peut remonter jusqu'à plus de 80 km de l'embouchure.

Au total, au moins 80 rivières, voir même beaucoup plus, sont sujettes au phénomène du mascaret, sur tous les continents, sauf l'Antarctique.

## ● II.1 Remarques

On notera qu'il existe d'autres formes de mascaret, ou ondes positives, qui ne sont pas créés directement par les marées. Une onde positive de translation peut être induite par un raz de marées (*tsunami*), causé par un tremblement de terre, et se propageant dans l'estuaire d'une rivière avec la même forme qu'un mascaret d'origine tidale. Par exemple, cela fut observé à Hawaii en 1946, au Japon en 1983 et 2003 (ex. Shuto 1985), et en Thaïlande, Malaisie et Sri Lanka durant le tsunami du 26 décembre 2004 (Chanson 2005).

De la même manière, une surélévation rapide du niveau de la mer, durant une tempête de vent, ou un typhon, peut générer une onde positive, surtout quand la surélévation est rapide (1 m/heure ou plus) et coïncide avec le début de la marée montante. Ce phénomène est bien connu au Bangladesh et dans la Baie du Bengale (ex. Sommer et Mosley 1972,

1. Voir *La Houille Blanche*, 1963, N° 5, août-sept., p. 537.

Delwar 2001). Par exemple, dans le cas du Grand Typhon de Novembre 1970, une surélévation de plus de 5 m s'est développée en même temps que la grande marée montante durant la nuit du 12 au 13 novembre ; des calculs simplifiés<sup>2</sup> montrent la formation rapide d'un mascaret de plus de 2 m de hauteur.

## III ■ DEPUIS QUAND OBSERVE-T-ON LE MASCARET ?

En 325 (ou 326) avant notre ère, Alexandre le Grand dirigea sa flotte vers l'embouchure de l'Indus, au Pakistan, où ils furent malmenés par le mascaret (Arrian 1976, Vol. 2, pp. 156-161, « Anabasis of Alexander », VI, 19 ; Quintus Curcius 1984 p. 233, Livre 9, [9]). Les deux récits se corroborent, et correspondent bien à un mascaret se développant à marée montante dans l'embouchure de l'Indus.

Cependant, ce sont les mascarets des rivières Seine, en France, et Qiantang, en Chine, qui ont été les mieux documentés. Le mascaret de la rivière Qiantang a été mentionné au VII<sup>e</sup> siècle avant notre ère (Moule 1923, pp. 155-156), au II<sup>e</sup> siècle avant notre ère par le poète Mei Sheng (Nedham 1959, p. 485, Allee 1995, p. 65), au VII<sup>e</sup> siècle de notre ère par le poète Meh Haoran (Allee 1995, p. 61) et au VIII<sup>e</sup> siècle de notre ère par le poète Lui Yuxi (Allee 1995, p. 62). Le mascaret, avec son bruit de roulement, était parfois comparé à une « cavalcade de 10 000 chevaux », et à « une armée de 100 000 hommes » (Dai and Zhou 1987). Le mascaret de la Seine a été mentionné par Saint-Romain, de Fontenelle, et Dudon de Saint-Quentin, aux VII<sup>e</sup>, IX<sup>e</sup> et XI<sup>e</sup> siècles de notre ère (Malandain 1988, p. 34). Il pouvait remonter jusqu'à Rouen.

Le « pororoca » de l'Amazone fut observé par les aventuriers Vincente Yanez Pinzon et Charles-Marie de La Condamine, aux XVI<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles, respectivement, tandis que Jules Verne mentionnait le pororoca dans son roman « La Jaganda. Huit cent lieues sur l'Amazone » (Vol. 2, Chap. 20). Au Canada, des officiers anglais et français mentionnaient le mascaret de la rivière Petitcodiac, au XVIII<sup>e</sup> siècle. Toujours au XVIII<sup>e</sup> siècle, le père Consag fit l'expérience du mascaret de la rivière Colorado, le 18 juillet 1746 (Sykes 1937, pp. 11-12). En Inde, le mascaret de la rivière Hoogly était décrit, très clairement, dans les ouvrages de navigation anglais et français du XIX<sup>e</sup> siècle (ex. Bazin 1865).

## ● III.1 Discussion

Le mascaret est un événement bref, durant quelques minutes au plus, pour un observateur immobile sur la rive, et n'ayant lieu que deux fois par jour, en périodes de grandes marées seulement. Au total, cela ne représente qu'une durée totale d'une heure ou deux par an : il est donc facile de manquer le mascaret, comme par exemple Marco Polo qui visita la ville de Hangzhou, mais ne mentionna pas le mascaret de la rivière Qiantang.

Le mascaret peut aussi disparaître, suite à des changements de débit et du cours du fleuve. En période de crues, il est très rare d'observer un mascaret. Par exemple, la *figure 3*

2. Faits par l'auteur, en se basant sur les équations de Saint-Venant et la méthode des caractéristiques.



**Figure 3 : Le mascaret de la Dordogne (à Saint-Pardon), le 21 février 2004 autour de 17:00 (coefficient: 100, marnage : 4,6 m à la Pointe de Grave) —  
Le mascaret, en hiver, est à peine visible à cause du débit fluvial relativement important.**

montre le mascaret de la Dordogne, au même endroit que, et pour un marnage identique à, celui du mascaret illustré en *figure 2B*. Cette dernière photo a été prise à la fin de l'été, en période d'étiage, plus propice au développement d'un fort mascaret.

Le mascaret peut aussi disparaître, quand le lit de la rivière change de forme, et devient plus profond, en particulier. Par exemple, le mascaret de la rivière Ord, en Australie, observé par Wolanski *et al.* (2001), n'existe plus depuis que des crues importantes ont affouillé le lit de l'estuaire en 2000. Le mascaret de la Seine disparut quelques années, au début au XIX<sup>e</sup> siècle, suite à des travaux d'endiguement, pour réapparaître, plus en amont, avec plus de force (Malandain 1988).

Il y a aussi des mythes, et contes, qui n'ont jamais pu être étayés, sur des mascarets hypothétiques, comme le mascaret du Mékong, au Vietnam (?). De même, le public non-expert confond souvent l'effet d'un raz de marées (tsunami), ou d'une surélévation de la hauteur d'eau causée par une tempête de vent (storm surge), avec le phénomène du mascaret.

#### IV ■ COMMENT SE DÉVELOPPE UN MASCARET

Une onde positive de translation, comme le mascaret, est définie comme la réponse, d'un écoulement à surface libre, à une augmentation de la hauteur d'eau (c.a.d. la marée montante). On peut montrer simplement, par la méthode des caractéristiques, que, durant la propagation de la marée montante, la surface libre devient de plus en plus pentue,

jusqu'à la formation d'une discontinuité de la hauteur d'eau, associée à la formation et au déferlement du mascaret (*fig. 4*). Le premier point d'apparition du mascaret correspond à la première intersection de deux caractéristiques positives (ex. Henderson 1966, Viollet *et al.* 2002, Chanson 2004a,b).

Une fois le mascaret formé, les propriétés des écoulements en amont (avant le passage) et aval (après le passage) du mascaret, et la célérité du mascaret, doivent satisfaire les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, qui fournissent deux relations adimensionnelles :

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{2} * (\sqrt{1 + 8 * Fr_1^2} - 1) \quad (1)$$

$$Fr_2 = \frac{2^{3/2} * Fr_1}{(\sqrt{1 + 8 * Fr_1^2} - 1)^{3/2}} \quad (2)$$

Où  $d_1$  et  $d_2$  sont les hauteurs d'eau avant et après le passage du mascaret,  $V_1$  et  $V_2$  sont les vitesses de l'écoulement avant et après le passage du mascaret,  $U$  est la célérité du mascaret pour un observateur immobile sur la berge (*fig. 4*), et les nombres de Froude  $Fr_1$  et  $Fr_2$  sont définis comme :

$$Fr_1 = \frac{V_1 + U}{\sqrt{g * d_1}}$$

$$Fr_2 = \frac{V_2 + U}{\sqrt{g * d_2}}$$

## Développement de l'onde positive en translation

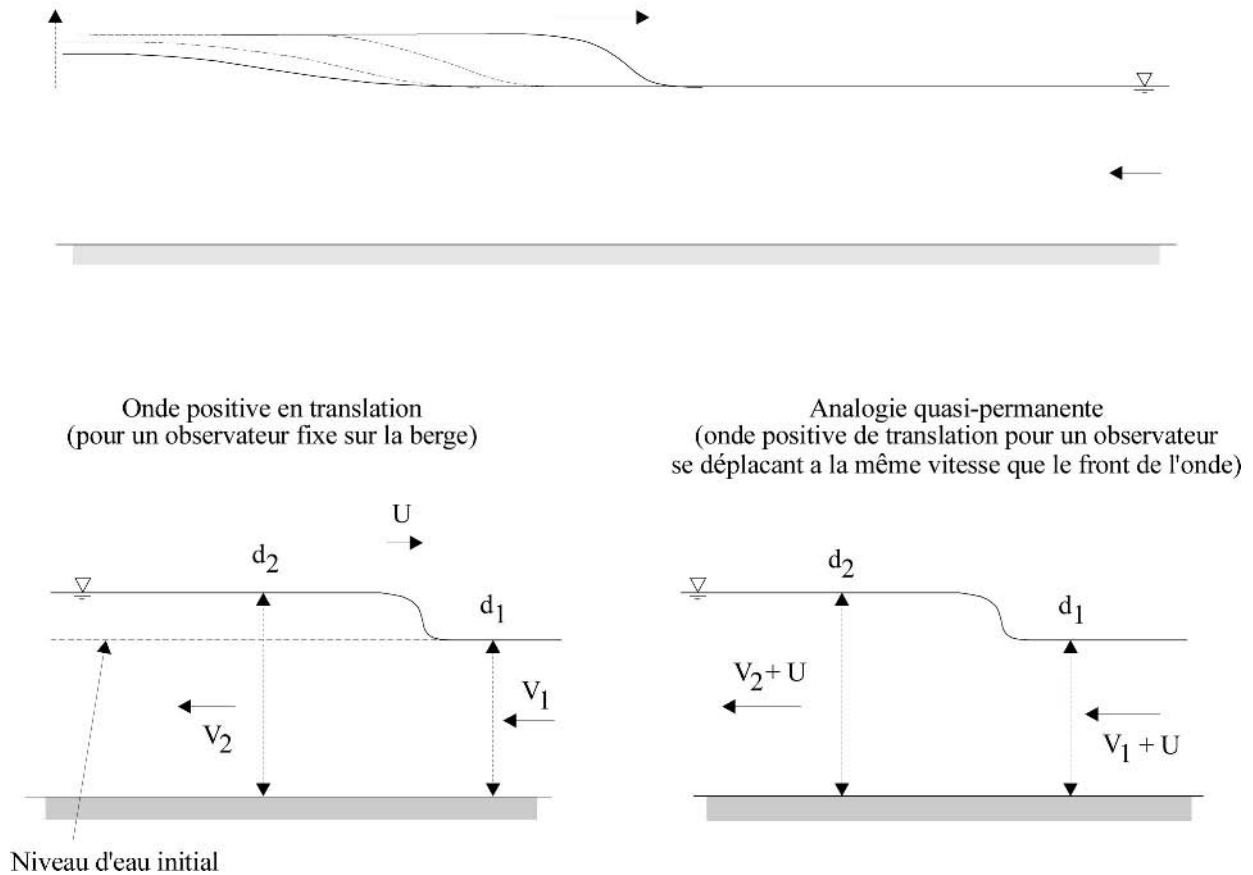


Figure 4 : Sketch du développement et de la propagation d'une onde positive de translation.

L'équation de conservation de la masse donne l'expression de la célérité (ou vitesse de propagation) du mascaret :

$$U = \frac{V_1 * d_1 - V_2 * d_2}{d_2 - d_1} \quad (3)$$

Pour une personne en translation avec l'écoulement amont, avant le passage du mascaret (vitesse  $V_1$ ), la célérité  $U$  du mascaret, relative à l'écoulement amont est :

$$V_1 + U = \sqrt{g * d_1} * \sqrt{\frac{1}{2} * \frac{d_2}{d_1} * \left(1 + \frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (4)$$

On montre facilement que le mascaret se propage plus rapidement que le flot de la marée montante : c.a.d.,  $U > |V_2|$ .

#### ● IV.1 Discussion

Dans le lit principale de la rivière, on observe deux types de mascaret : le mascaret déferlant (*fig. 1C et 2A*), et le mascaret ondulé (*fig. 1A, 1B, 2B, 3*). La forme du mascaret est principalement une fonction du nombre de Froude amont  $Fr_1$ . Pour  $Fr_1 < 1,4$  à  $1,6$ , le mascaret a une forme ondulante, et le front du mascaret est suivi par un train d'ondulations bien formées et quasi-bidimensionnelles, appelées éteules. Le mascaret déferlant est observé pour  $Fr_1 > 1,6$ . Il est un phénomène rare, et plus de 95 % des mascarets sont des masca-

rets ondulés. En pratique, avec un ressaut ondulé, il est courant que des petites vagues déferlantes soient observées près des rives, ou sur des hauts-fonds : c.a.d., avec de faibles profondeurs d'eau.

Plusieurs études sur les ondes positive de translation ondulées fournissent des informations sur les propriétés intrinsèques des ondulations (ex. amplitude, longueur d'ondes) : par exemple, Lemoine (1948), Benet et Cunge (1971), Treske (1994). De plus, des études théoriques et expérimentales ont montré des variations longitudinales importantes des distributions de vitesses et pressions, associées avec le passage des ondulations du mascaret (e.g. Peregrine 1966, Chanson 2001). Donnelly et Chanson (2002) discutaient spécifiquement des implications en terme d'affouillement et de transport advectif de sédiments.

On note, cependant, qu'une onde positive en translation n'est pas comparable à un ressaut hydraulique stationnaire. Cela a été montré expérimentalement par Montes (1978, 1986), Chanson (1995) et Montes and Chanson (1998).

#### V ■ POURQUOI LE MASCARET EST-IL IMPORTANT ?

Le mascaret est un phénomène très important pour la zone intertidale d'une rivière. En effet, le mascaret, comme tout ressaut, est un système extrêmement turbulent, associé à un brassage important des eaux, un affouillement des sédiments

du lit de la rivière, et un entraînement d'air dans le rouleau, dans le cas d'un mascaret déferlant. Le passage du mascaret, et sa propagation amont, génèrent une zone de mélange et de dispersion : par exemple, de sédiments fins et de salinité, comme cela a été mesuré sur le Rio Mearim au Brésil (Kjerfve et Ferreira 1993), sur les rivières Ord et Daly en Australie (Wolkanski *et al.* 2001, 2004) et sur l'estuaire de la rivière Yangtze<sup>3</sup> en Chine (Chen 2003). De simples tests, avec du colorant, ont été conduits en Alaska (Bartsch-Winkler et Lynch 1988), tandis que M. Partiot réalisa des tests avec des flotteurs lestés, à plusieurs profondeurs, dans la Seine en 1855 (Bazin 1865). Tous ces essais ont montré la complexité des processus de mélange dans un mascaret, sans, malheureusement, apporter de réponses simples et définitives. Cependant, plus le mascaret remonte loin dans des terres, plus son effet est important : par exemple, le mascaret de l'Amazone peut remonter jusqu'à plus de 80 km en amont de l'embouchure, tandis que le mascaret de la rivière Punge, au Mozambique, peut avoir plus de 0,5 m de hauteur, à 50 km en amont de l'embouchure.

Plusieurs études ont démontré l'impact du mascaret sur le transport de sédiments. Par exemple, à Petitcodiac (Canada), dans la Baie du Mont-Saint-Michel (France), dans la Baie de Hangzhou (Chine), à Turnagain en Alaska (Tessier and Terwindt 1994, Chen *et al.* 1990, Bartsch-Winkler *et al.* 1985). Le passage du mascaret est associé à un affouillement du fond vaseux, une mise en suspension des matériaux fins, et l'advection de ces matériaux vers l'amont. Ce processus est répété à chaque passage du mascaret. Donnelly and Chanson (2002) soulignait que le transport de solides est probablement plus intense avec les mascarets ondulés, car les ondulations et éteules, qui suivent le front du mascaret, contribuent à maintenir en suspension une grande quantité de matériaux fins, qui sont transportés vers l'amont, derrière le mascaret.

Le mascaret joue un rôle important sur l'écologie d'un estuaire. De nombreuses espèces de poissons, de tailles petites et moyennes, perdent leur sens d'orientation, quand elles sont mises à mal par le rouleau turbulent du mascaret, et deviennent des proies faciles pour leurs prédateurs. Ainsi certains animaux se nourrissent derrière le mascaret, en suivant sa remontée dans l'embouchure : en particulier, les piranhas sur l'Amazone, les requins à Broudsound (Australie), les bélugas à Turnagain (Alaska), les crocodiles sur la rivière Daly (Australie) (Cousteau et Ricards 1984, Jones 2003, Molchan-Douthit 1998, Wolanski *et al.* 2004). De la même manière, en Alaska, les goélands et aigles des mers pêchent dans le rouleau du mascaret à Turnagain et Knickarm (Bartsch-Winkler et Lynch 1988, Molchan-Douthit 1998). La zone intertidale, sujette au mascaret, est aussi un zone de reproduction, et un terrain de prédilection pour la pêche : les esturgeons et les anguilles dans la rivière Severn (Grande-Bretagne), les anguilles dans la rivière Qiantang (Chine), les « striped bass » et certaines espèces de saumons et de truites en Baie de Fundy (Witts 1999, Jones 2003, Morris *et al.* 2003, Locke *et al.* 2003). Ainsi, dans la Dordogne, on pêche le Lamproie et le Mule, avant l'arrivée et juste au passage du mascaret<sup>4</sup>.

De la même manière, la disparition, ou des changements importants, du mascaret peuvent entraîner une modification

drastique de la faune aquatique. Par exemple, dans la rivière Petitcodiac, la construction d'un barrage en 1968, associée à la quasi-disparition du mascaret, a été accompagnée par l'élimination de nombreuses espèces traditionnelles de poissons, et l'apparition d'espèces « introduites » (Locke *et al.* 2003).

## VI ■ DISCUSSION : INTERACTIONS ENTRE L'HOMME ET LE MASCARET

Durant des siècles, le mascaret a eu une sinistre réputation, en partie due à son impact tragique sur les transports fluviaux. Cela a été bien documenté, pour la Seine (France), mais aussi sur le Colorado (Mexique), la rivière Petitcodiac (Canada), et les rivières Fly et Bamu (Papouasie-Nouvelle-Guinée) (Malandain 1988, Gordon 1924, Sykes 1937, Tricker 1965, Beaver 1920). De nos jours, le mascaret reste un frein au développement économique de certaines régions, comme en Papouasie-Nouvelle-Guinée, au Sarawak (Malaisie), en Inde (rivière Hoogly) (ex. Mazumder et Bose 1995), ou même en Europe, où le mascaret de la rivière Trent pourrait gêner le transport par barges des ailes de l'Airbus A380. Le passage du mascaret a aussi un effet important sur la tenue de navires amarrés à quai : son arrivée provoque une poussée directement proportionnelle à la masse du navire et la pente du front, et se mobilisant en quelques secondes.

D'un autre côté, l'homme a toujours été fasciné par le mascaret, qui est devenu une attraction touristique majeure. Par exemple, en Chine, chaque année, au moment du festival de la Lune, en Septembre/Octobre, plus de 300 000 personnes se massent sur les berges de la rivière Qiantang pour voir passer le mascaret. L'évènement est souvent retransmis, en direct, sur la télévision, pendant plus de 3 heures, avec une audience de plusieurs millions de téléspectateurs. En Europe, des compétitions de surf ont lieu, chaque été, sur la Severn, et la Dordogne, et accueillent plusieurs centaines de surfeurs et spectateurs. Dans les années cinquante et début des années soixante, des milliers de parisiens et rouennais venaient, surtout le week-end, voir passer le mascaret de la Seine, à Caudebec-en-Caux par exemple (*fig. 5*). Au Canada, des activités de rafting sont organisées sur le mascaret de la rivière Shubenacadie en Baie de Fundy.

Enfin il faut mentionner le bruit du mascaret qui avance. Comparé, parfois, à un train, ou une cavalerie au galop, le mascaret se fait entendre avant d'être vu, parfois plus de 30 minutes en avance. Les animaux y sont très sensibles. Le compositeur canadien Gordon Monahan en a fait aussi une composition musicale « The Tidal Bore of the Maccan River » (1981).

### ● VI.1 Fragilité du mascaret

La plupart des mascarets sont des mascarets ondulés, caractérisés par un nombre de Froude inférieur à 1,4 à 1,6. On rappelle que le mascaret disparaît totalement quand le nombre de Froude devient égal ou inférieur à l'unité. Pour  $1 < Fr_1 < 1,4$  à 1,6, l'écoulement est appelé trans-critique (ex. Henderson 1966, Chanson 2004a). Une faible variation de l'énergie spécifique, par exemple causée par le frottement ou un obstacle, peut induire une variation très importante de la hauteur d'eau, du nombre de Froude, et donc la forme du mascaret, incluant même sa disparition. On comprend, alors,

3. Branche Nord de l'estuaire Changjiang.

4. comme l'a observé l'auteur en Février 2004.



(A) Le mascaret à Caudebec-en Caux en Avril 1958 (Collection Jacques Huguerre, avec l'aide de N. Lemière).



(B) Le mascaret à la cale du bac de Yainville, rive droite, près de l'ancienne centrale électrique vers 1930 (Photo par Mr. G. Fromager).

**Figure 5 : Le Mascaret de la Seine.**

que le mascaret est un phénomène très sensible au marnage, à des modifications du cours d'eau, au débit d'eau douce, et aux conditions atmosphériques. Dans plusieurs cas, la cons-

truction de barrage(s), le long de la rivière, a entraîné la disparition du mascaret : par exemple, sur le rivière Colorado (Mexique), Petitcodiac (Canada) et Couesnon (France). La





**Figure 6 : Le Mascaret du Couesnon, Baie du Mont Saint Michel, le 7 mars 2004 autour de 18:25 devant al Tour Gabriel (coefficient 97, marnage 13,2 m au Mont-Saint-Michel) — Le mascaret n'est plus qu'une série de rides, qui n'a rien de comparable au mascaret puissant d'autrefois.**

figure 6 montre une photo récente du mascaret du Couesnon, qui n'a plus la force d'autrefois, quand il pouvait remonter vers Pontorson des deux cotés du Mont, avant la construction de la Digue en 1879. De la même manière, l'endiguement et le dragage de la Seine ont entraîné la disparition du mascaret, sous sa forme déferlante d'autrefois.

Le mascaret est aussi sensible aux conditions météorologiques. Des tempêtes de vent peuvent renforcer le mascaret, comme en Alaska et au Bangladesh. En Alaska, toujours, le tremblement de terre de 1964 a abaissé le fond des estuaires Kinckarm et Turnagain, où, depuis, le mascaret est beaucoup moins intense, en raison de la profondeur d'eau plus importante dans les estuaires.

## VII ■ SOMMAIRE ET CONCLUSION

Le mascaret est un processus hydraulique bien connu : c.a.d., une onde positive de translation. Sa formation et sa propagation peuvent être expliquées par une analyse simple, monodimensionnelle. Par contre, il faut une combinaison de conditions tidales, fluviales, topographiques et météorologiques bien particulières, pour que le mascaret puisse se développer et se former durant les quelques heures de la marée montante. De ce fait, et à quelque(s) exception(s) près, le mascaret est un phénomène rare, ne se produisant qu'en période de grandes marées, dans certains estuaires, et, de préférence, en périodes d'étiage.

On observe des mascarets sur tous le continents, sauf l'Antarctique, depuis plusieurs siècles. Le passage du mascaret est associé à un brassage rapide, mais très intense, des eaux, un affouillement du lit de la rivière, et un transport de

solides fins vers l'amont. Ces conditions sont propices au développement d'écosystèmes uniques comme, par exemple, la Baie du Mont-Saint-Michel et le Bassin de l'Amazone, mais aussi à la prolifération et reproduction d'espèces aquatiques bien spécifiques, dont certaines sont en danger d'extinction malheureusement.

En fin de compte, le mascaret reste un phénomène mal connu, rarement étudié en détail. L'instationnarité du processus le rend difficile à étudier sur le terrain, mais aussi en modèle physique. On espère que l'article présent aidera les ingénieurs, les étudiants, mais aussi les passionnés de la mer, à mieux le comprendre.

## VIII ■ REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier, tout particulièrement, M. J.J. Malandain, Mme N. Lemiere, Dr E. Jones pour leurs aide et suggestions, ainsi que toutes les personnes qui lui ont fourni des informations sur le mascaret. Il remercie aussi M. J. Chapon pour ses conseils et suggestions.

## IX ■ NOTATION

$d$	hauteur (m) d'eau ;
$Fr$	nombre adimensionnel de Froude ;
$g$	accélération ( $m/s^2$ ) de la gravité ;
$U$	célérité (m/s) du mascaret pour un observateur immobile sur la berge ;
$V$	vitesse (m/s) ;

## Indice

- 1 conditions de l'écoulement avant le passage du mascaret ;
- 2 conditions de l'écoulement après le passage du mascaret.

## X ■ APPENDIX A — NOMS DONNÉS AU MASCARET

### ● X.1 Vocabulaire

Langue	Mascaret induit par les marées	Nom local	Eteules
Français	<i>mascaret</i>	<i>barre</i> ou <i>flot</i> (Seine) <i>montant</i> (Garonne)	<i>êteules</i>
Anglais	<i>tidal bore</i>		<i>undulations</i> <i>whelps</i>
Portugais (Brésil)	<i>pororoca</i>	<i>pororoca</i> (Amazon, Guama, Araguari ...)	
Espagnol	<i>macareo</i>	<i>burro</i> (Colorado)	
Celte	<i>aegir</i> (ou <i>eagre</i> ou <i>eager</i> )		
Malay	<i>benak</i>		
Papou	<i>ibua</i>	<i>ibua</i>	
Bengali (Bangladesh)		<i>ban</i>	

Langue	Onde positive	Ressaut hydraulique	Ressaut ondulé
Français	<i>onde positive de translation, onde de compression, ressaut hydraulique en translation</i>	<i>ressaut hydraulique</i>	<i>ressaut ondulé</i>
Anglais	<i>positive surge, bore</i>	<i>hydraulic jump</i>	<i>undular jump</i>
Espagnol		<i>resalto hidraulico</i>	

## XI ■ APPENDIX B — LE MASCARET DES RIVIÈRES SÉLUNE ET SÉE LE 7 AVRIL 2004

Le 7 avril 2004, l'auteur a observé, sur plus de 14 km, le mascaret des rivières Sélune et Sée, en Baie du Mont-Saint-Michel, depuis le lieu dit la Roche-Torin, et à Pontaubault (e.g. *fig. 1A*). Le marnage était de 13,75 m, et le coefficient de marée était 107<sup>5</sup>, le plus important pour l'année 2004.

A la Roche-Torin, on entendit le mascaret entre 25 et 30 minutes avant son arrivée. Le mascaret était bien visible entre l'Île de Tombelaine<sup>6</sup> et la Pointe du Grouin du Sud. Le mascaret s'étendait sur plus de 1 km de largeur, avant de s'engouffrer dans les rivières Sélune et Sée. Juste devant la Roche-Torin, le mascaret de la Sélune progressait avec une célérité de 2,7 à 3,1 m/s, et il était haut de 0,3 à 0,6 m. Toutefois, la forme du mascaret changeait constamment, en réponse aux changements de topographie du lit de la rivière. Dans la partie profonde du lit, le mascaret avec une forme

5. Introduits par Laplace, les coefficients de marées sont utilisés couramment en France depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. De nos jours, le coefficient de marée est calculé par rapport aux marées hautes à Brest. Un coefficient de 100 (ou 100 %) correspond à la grande marée d'équinoxe, à Brest (Simon 2002).

6. L'Île de Tombelaine (ou Mont Tombelaine) est à 4,5 km à l'ouest de la Pointe du Grouin du Sud, et à 2,5 km au nord du Mont-Saint-Michel. Une légende raconte que la reine Guenièvre, épouse du roi Arthur, y est enterrée. Une autre légende dit qu'une jeune princesse, Elaine, y est enterrée.

ondulée, tandis qu'il était déferlant en eaux peu profondes, près des rives, et débordait parfois sur les berges vaseuses.

Cinquante minutes plus tard, on observa le mascaret de la Sélune à Pontaubault, situé 8 km en amont de la Roche-Torin (*fig. 1A*). La célérité du mascaret était de l'ordre de 2,5 à 2,7 m/s, avec une hauteur de 0,4 à 0,6 m. Le mascaret s'engouffra sous le Pont Aubaud, un vieux pont en pierre du XV<sup>e</sup> siècle, qui fut le siège d'une terrible bataille entre les Chouans et l'armée républicaine en 1793, et qui fut utilisé par les troupes de l'armée de Patton durant la percée d'Avranches le 31 juillet 1944. On note que les piles du pont ont une forme tranchante, en amont et en aval, pour minimiser l'affouillement causé par les crues et le mascaret respectivement.

## XII ■ BIBLIOGRAPHIE

- ALLEE S.D. (1995). — "The Qiantang Tidal Bore." *Asian Art and Culture*, Vol. 8, pp. 61-73.
- ARRIAN (1976). — "Arrian." *Harvard University Press*, Cambridge, USA, translated by P.A. Brunt, 2 volumes.
- BARTSCH-WINKLER S., EMMANUEL R.P. and WINKLER G.R. (1985). — "Reconnaissance Hydrology and Suspended Sediment Analysis, Turnagain Arm Estuary, Upper Cook Inlet." *US Geological Survey Circular*, N° 967, pp. 48-52.
- BARTSCH-WINKLER S. and LYNCH D.K. (1988). — "Catalog of Worldwide Tidal Bore Occurrences and Characteristics." *US Geological Survey Circular*, N° 1022, 17 pages.

- BAZIN H. (1865). — « Recherches Expérimentales sur la Propagation des Ondes. » *Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences*, Paris, France, Vol. 19, pp. 495-644 (in French).
- BEAVER W.N. (1920). — “Unexplored New Guinea. A Record of the Travels of a Resident Magistrate amongst the Head-Hunting Savages and Cannibals of the Unexplored Interior of New Guinea.” *Seeley, Service & Co*, London, UK, 320 pages.
- BENET F. and CUNGE J.A. (1971). — “Analysis of Experiments on Secondary Undulations caused by Surge Waves in Trapezoidal Channels.” *Jl of Hyd. Res.*, IAHR, Vol. 9, N° 1, pp. 11-33.
- BOUNICEAU M. (1845). — « Etudes sur la Navigation des Rivières à Marées. » Paris, France.
- CHANSON H. (1995). — « Ressaut Hydraulique Ondulé : Mythes et Réalités. » *La Houille Blanche*, N° 7, pp. 54-65.
- CHANSON H. (2004a). — “The Hydraulics of Open Channel Flows: An Introduction.” *Butterworth-Heinemann*, Oxford, UK, 2nd edition, 630 pages (ISBN 0 7506 5978 5).
- CHANSON H. (2004b). — “Environmental Hydraulics of Open Channel Flows.” *Elsevier Butterworth-Heinemann*, Oxford, UK, 483 pages (ISBN 0 7506 6165 8).
- CHANSON H. (2005). — “Le Tsunami du 26 décembre 2004 : un Phénomène Hydraulique d'Ampleur Internationale. Premier Constats.” *Jl La Houille Blanche*, N° 2, pp. 25-32.
- CHEN S. (2003). — “Tidal Bore in the North Branch of the Changjiang Estuary.” *Proc. Intl Conf. on Estuaries & Coasts ICEC-2003*, Hangzhou, China, Nov. 8-11, Intl Research & Training Center on Erosion & Sedimentation Ed., Vol. 1, pp. 233-239.
- CHEN Jiyu, LIU Cangzi, ZHANG Chongle and WALKER H.J. (1990). — “Geomorphological Development and Sedimentation in Qiantang Estuary and Hangzhou Bay.” *Jl of Coastal Res.*, Vol. 6, N° 3, pp. 559-572.
- COUSTEAU J.Y. and RICHARDS M. (1984). — “Jacques Cousteau's Amazon Journey.” *The Cousteau Society*, Paris, France. (also *RD Press*, Australia, 1985.)
- DAI Zheng and ZHOU Chaosheng (1987). — “The Qiantang Bore.” *Intl Jl of Sediment Research*, N° 1, November, pp. 21-26.
- DELWAR H.S.M. (2001). — “Hydrodynamic Characteristics of the Coastal Areas of Bangladesh.” *Proc. Intl Seminar on Quaternary Development and Coastal Hydrodynamics of Ganges Delta Bangladesh*, Khorshed-Alam-A-K-M and Khairul-Islam-M Editors, Geological Survey of Bangladesh Publ., Dhaka, Bangladesh, pp. 69-85.
- DONNELLY C. and CHANSON H. (2002). — “Environmental Impact of a Tidal Bore on Tropical Rivers.” *Proc. 5th Intl River Management Symp.*, Brisbane, Australia, Sept. 3-6, 9 pages.
- GORDON J.H. (1924). — “Tidal Bore at Mouth of Colorado River. December 8 to 10, 1923.” *Monthly Weather Review*, Vol. 52, Feb., pp. 98-99.
- HENDERSON F.M. (1966). — “Open Channel Flow.” *MacMillan Company*, New York, USA.
- JONES E. (2003). — Pers. Comm., 26 Mar. 2003.
- KJERFVE B. and FERREIRA H.O. (1993). — “Tidal Bores: First Ever Measurements.” *Ciência e Cultura (Jl of the Brazilian Assoc. for the Advancement of Science)*, Vol. 45, N° 2, March/April, pp. 135-138.
- LEMOINE R. (1948). — “Sur les Ondes Positives de Translation dans les Canaux et sur le Ressaut Ondulé de Faible Amplitude.” *Jl La Houille Blanche*, Mar-Apr., pp. 183-185.
- LOCKE A., HANSON J.M., KLASSEN G.J., RICHARDSON S.M. and AUBE C.I. (2003). — “The Damming of the Peteticodioc River: Species, Populations and Habitats Lost.” *Northeastern Naturalist*, Vol. 10, N° 1, pp. 39-54.
- LYNCH D.K. (1982). — “Tidal Bores.” *Scientific American*, Vol. 247, N° 4, Oct., pp. 134-143.
- MALANDAIN J.J. (1988). — « La Seine au Temps du Mascaret. » (“The Seine River at the Time of the Mascaret.”) *Le Chasse-Marée*, N° 34, pp. 30-45 (in French).
- MAZUMDER N.C. and BOSE S. (1995). — “Formation and Propagation of Tidal Bore.” *Jl of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, Vol. 121, N° 3, pp. 167-175.
- MOLCHAN-DOUTHIT M. (1998). — “Alaska Bore Tales.” *National Oceanic and Atmospheric Administration*, Anchorage, USA, revised, 2 pages.
- MONTES J.S. (1979). — “Undular Hydraulic Jump — Discussion.” *Jl of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 105, N° HY9, pp. 1208-1211.
- MONTES J.S. (1986). — “A Study of the Undular Jump Profile.” *Proc. 9th Australasian Fluid Mechanics Conference AFMC*, Auckland, New Zealand, pp. 148-151.
- MONTES J.S. and CHANSON H. (1998). — “Characteristics of Undular Hydraulic Jumps. Results and Calculations.” *Jl of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 124, N° 2, pp. 192-205.
- MORRIS J.A., RULIFSON R.A. and TOBUREN L.H. (2003). — “Life History Strategies of Striped Bass, *Morone saxatilis*, Populations inferred from Otolith Microchemistry.” *Fisheries Research*, Vol. 62, pp. 53-63.
- MOULE A.C. (1923). — “The Bore on the Ch'ien-T'ang River in China.” *Comptes-Rendus de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, 13 April, pp. 135-188 & 1 plate.
- MURPHY D. (1983). — “Pororoca!” *Calypso Log*, Cousteau Society, Vol. 10, N° 2, June, pp. 8-11.
- NEEDHAM J. (1959). — “Science and Civilisation in China.” *Cambridge University Press*, London, UK, Vol. III, pp. 483-485.
- PEREGRINE D.H. (1966). — “Calculations of the Development of an Undular Bore.” *Jl. Fluid Mech.*, Vol 25, pp.321-330.
- Quintus Curcius (1984). — “The History of Alexander.” *Penguin*, New York, USA, translated by J. Yardley, 332 pages.
- SHUTO N. (1985). — “The Nihonkai-Chubu Earthquake Tsunami on the North Akita Coast.” *Coastal Eng. in Japan*, Vol. 20, pp. 250-264.
- SIMON B. (2002). — « Niveaux Caractéristiques et Coefficients de Marée. Calcul Direct à l'Aide des Constantes Harmoniques. » *Annales Hydrographiques*, SHOM, 6<sup>e</sup> Série, Vol. 2, N° 771, pp. 5-1 to 5-11.
- SOMMER A. and MOSLEY W.H. (1972). — “East Bengal Cyclone of November 1970. Epidemiological Approach to Disaster Assessment.” *Le Lancet*, Vol. 299, N° 7759, Sat. 13 May, pp. 1029-1036.
- SYKES G. (1937). — “The Colorado Delta.” *Carnegie Institution of Washington*, Publ. N° 460, Baltimore, USA, 193 pages & 1 map.
- TESSIER B. and TERWINDT J.H.J. (1994). — “An Example of Soft-Sediment Deformations in an intertidal Environment — The Effect of a Tidal Bore”. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, Série II, Vol. 319, N° 2, Part 2, pp. 217-233.
- TRESKE A. (1994). — “Undular Bores (Favre-Waves) in Open Channels — Experimental Studies.” *Jl of Hyd. Res.*, IAHR, Vol. 32, N° 3, pp. 355-370. Discussion: Vol. 33, N° 3, pp. 274-278.
- TRICKER R.A.R. (1965). — “Bores, Breakers, Waves and Wakes.” *American Elsevier Publ. Co.*, New York, USA.

- VIOLLET P.L., CHABARD J.P., ESPOSITO P. and LAURENCE D. (2002). — « Mécanique des Fluides Appliquée. Ecoulements Incompressibles dans les Circuits, Canaux et Rivières, autour des Structures et dans l'Environnement. » *Presses des Ponts et Chaussées*, Paris, France, 2nd édition, 367 pages.
- WITTS C. (1999). — "The Mighty Severn Bore." *Rivern Severn Publications*, Gloucester, UK.
- WOLANSKI E., MOORE K., SPAGNOL S., D'ADAMO N. and PATTIERATCHI C. (2001). — "Rapid, Human-Induced Siltation of the Macro-Tidal Ord River Estuary, Western Australia." *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 53, pp. 717-732.
- WOLANSKI E., WILLIAMS D., SPAGNOLA S. and CHANSON H. (2004). — "Undular Tidal Bore Dynamics in the Daly Estuary, Northern Australia." *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 60, N° 4, pp. 629-636.

## ● XII.1 Sites Internet

- CHANSON H. (2004). — "Tidal bores, Mascaret, Pororoca. Myths, Fables and Reality!!!" *Internet resource* (Internet address: [http://www.uq.edu.au/~e2hchans/tid\\_bore.html](http://www.uq.edu.au/~e2hchans/tid_bore.html)).
- CHANSON H. (2003). — "Free-Surface Undulations in Open Channel Flows: Undular Jumps, Undular Surges, Standing Waves." *Internet resource* (Internet address: <http://www.uq.edu.au/~e2hchans/undular.html>).
- CHANSON H. (2000). — "The tidal bore of the Seine river, France. Le Mascaret de la Seine." *Internet resource* (Internet address: <http://www.uq.edu.au/~e2hchans/mascaret.html>).
- CHANSON H. (1999). — "Gallery of Photographs in Fluid Mechanics and Hydraulic Engineering." *Internet resource* (Internet address: <http://www.uq.edu.au/~e2hchans/photo.html>).