

# Comité scientifique de l'estuaire 8 décembre 2017

## Mesures de débit en estuaire : l'exemple de la Seine

Piney Stéphane, Héluin Stéphane, Morel Guillaume,  
Hébrard André, Glaziou Gwen (DREAL Normandie)

&

Diribarne Julien (DRIEE Ile-de-France)

&

Kopp Sébastien (DDT de Loir-et-Cher<sup>1</sup>)

<sup>1</sup> alors au sein du CEREMA, LR de Blois



Direction régionale  
de l'Environnement,  
de l'Aménagement  
et du Logement

NORMANDIE

Direction Régionale et  
Interdépartementale de  
l'Environnement et de  
l'Énergie

Ile-de-France



Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement  
de Normandie

[www.normandie.developpement-durable.gouv.fr](http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr)

# SOMMAIRE

- 1 - Le fonctionnement fluvio-maritime de la Seine et les données d'entrée, l'objectif principal des mesures
- 2 - Méthodologie et équipement déployés
- 3 - Le fonctionnement fluvio-maritime de la Seine mis en évidence
- 4 - Analyse critique des résultats
- 5 - Conclusion : éléments généraux en matière de méthodologie



# Présentation générale de l'estuaire

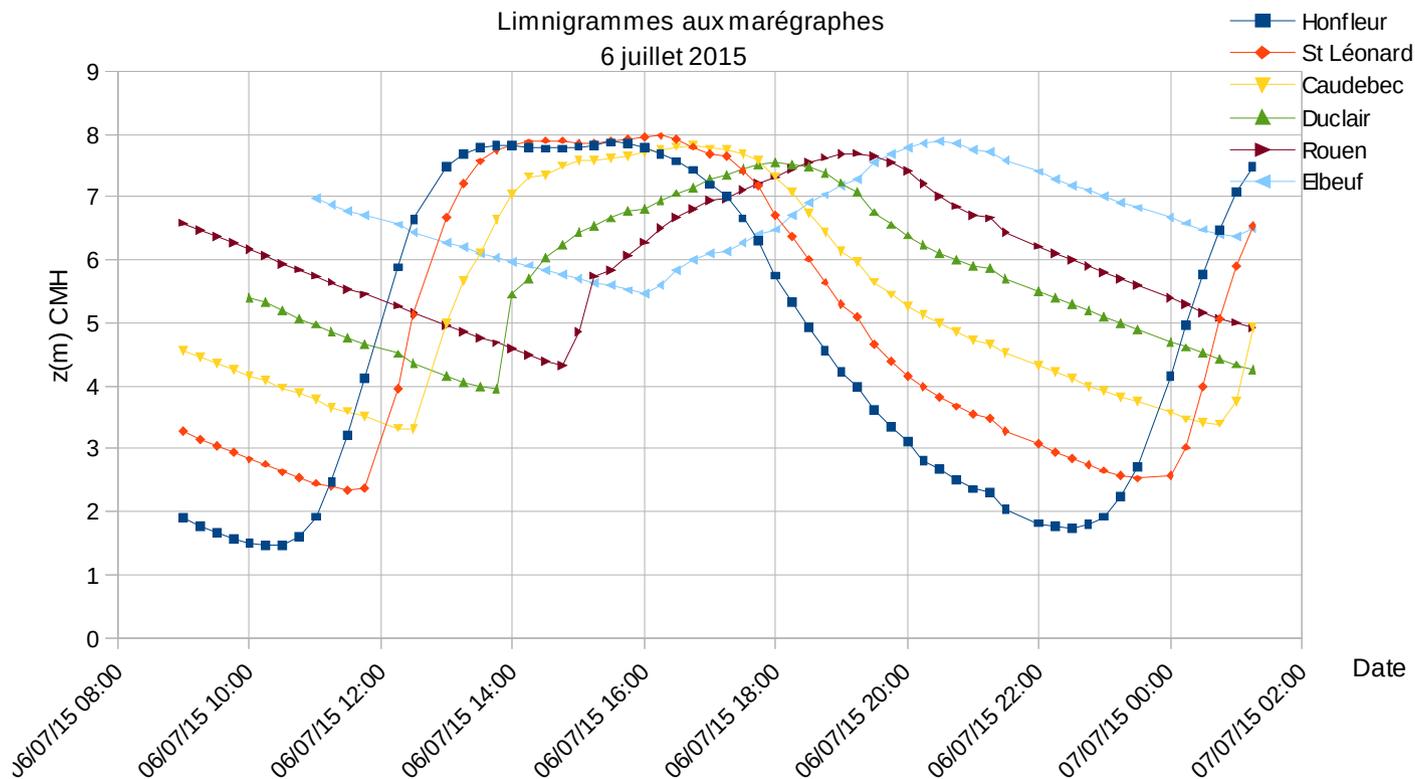


*Des mesures au droit de chaque marégraphe de Seine (GPMR)  
Même référentiel : cotes (m CMH) (= 4,378 + IGN69), au pas de temps 5'*

# Quelques éléments caractéristiques : un comportement fluvio-maritime

Marnage pour un débit de Seine de 250 m<sup>3</sup>/s de l'ordre de :

Coeff. de marée	Le Havre	St Léonard	Caudebec	Rouen
40	3,30 m	3,30 m	2,70 m	2,40 m
70	5 m	4,50 m	3,70 m	3 m
90	6,50 m	5,40 m	4,50 m	3,40 m
110	7,70 m	5,90 m	5 m	3,50 m



*Marégrammes « types » hors crue de la Seine, 6 juillet 2015,  
Q ≈ 250 m<sup>3</sup>/s, coeff. marée 91*

# Des données historiques disponibles, mais... anciennes

## des ordres de grandeur intéressants

DÉBITS MAXIMUM INSTANTANÉS POUR UN DÉBIT FLUVIAL DE 250 m<sup>3</sup>/s

LOCALITÉS	DÉBIT MAXIMUM DE FLOT			DÉBIT MAXIMUM DE JUSANT		
	Coefficient 104	Coefficient 92	Coefficient 70	Coefficient 104	Coefficient 92	Coefficient 70
		m <sup>3</sup> /s			m <sup>3</sup> /s	
La Risle.....	16.000	14.000	10.400	6.400	6.150	5.600
Courval .....	8.000	7.000	5.700	4.000	3.700	3.000
Mesnil-sous-Jumièges .....	3.200	2.950	2.500	2.500	2.300	1.800
Rouen .....	1.400	1.300	1.100	1.250	1.100	900

*Débits maximum instantanés pour un débit fluvial de 250 m<sup>3</sup>/s, Tableau C issu de [Laval, 1955] (Courval (PK 326,85 km) est proche du site d'Aizier (PK 323,40 km), la confluence avec La Risle de Fatouville (PK 350 km))*

# L'objectif principal des mesures

- **Un difficile calage du modèle hydraulique 1D déployé par le SPC SACN sur le tronçon Seine aval :**
  - **plusieurs solutions techniques répondent au calage, avec une forte disparité des coefficients de Strickler caractéristiques des pertes de charges linéaires ;**
  - **confronter les débits modélisés à ceux mesurés et pouvoir caractériser les débits maximum au flot auxquels sont associés les cotes de PM ;**
- **Disposer en conséquence d'une chronique de débits au droit de trois secteurs pour un cycle de marée quasi complet et un même débit de Seine.**

*Un intérêt aussi en matière de méthodologie : des mesures rares en estuaire qui imposent de développer un protocole particulier et aussi pour nos partenaires (GIP SA, GPMR)*

# Campagne de jaugeages en Seine du 29 septembre 2015



 <i>Liberté • Égalité • Fraternité</i> RÉPUBLIQUE FRANÇAISE	 <i>Liberté • Égalité • Fraternité</i> RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement NORMANDIE	Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie Ile-de-France



# Premiers éléments de méthodologie

- **Forte variation des débits mesurés, qui interdit la réalisation de plusieurs traversées en vue de valider les débits mesurés + largeur des transects (de 200 à 400 m) : mise en place simultanée de deux appareils à tribord et bâbord des 3 bateaux déployés, travaillant à des fréquences distinctes ;**
- **Des fonds potentiellement mobiles qui imposent un équipement avec un suivi GPS ;**
- **Des mesures en continu de 6 à 8h qui imposent un relais des équipes de jaugeages et des pilotes ;**
- **Un examen particulier des sites en vue de permettre une mise à l'eau effective (cf. forts coefficients de marée, niveau « très bas » de la BM à l'aval du point caractéristique (Aizier)) + une expérience certaine en matière de pilotage + puissance des bateaux, compte tenu du trafic ;**
- **Un collaboration nécessaire de plusieurs unités : les 2 UH (DREAL Normandie) + UH (DRIEE IdF) + LR de Blois (Cerema)**

# Bateaux et équipements déployés



*Aizier : bateau « Hydromètre » (DRIEE IdF) et SonTek M9 avec GPS (bâbord) + Rio Grande RDI (tribord), suivi avec GPS de « poche »*



*Heurteauville : bateau « Lorca » (DRIEE IdF) et SonTek M9 avec GPS (bâbord) + Rio Grande RDI (tribord)*



*Rouen : bateau « Méandre » (LR de Blois) et SonTek M9 avec GPS (bâbord) + RiverRay RDI avec son GPS (tribord)*

# La journée du 29 septembre 2015

- **$Q \approx 250 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le débit de la Seine ;**
- **Un coefficient de marée de 117.**

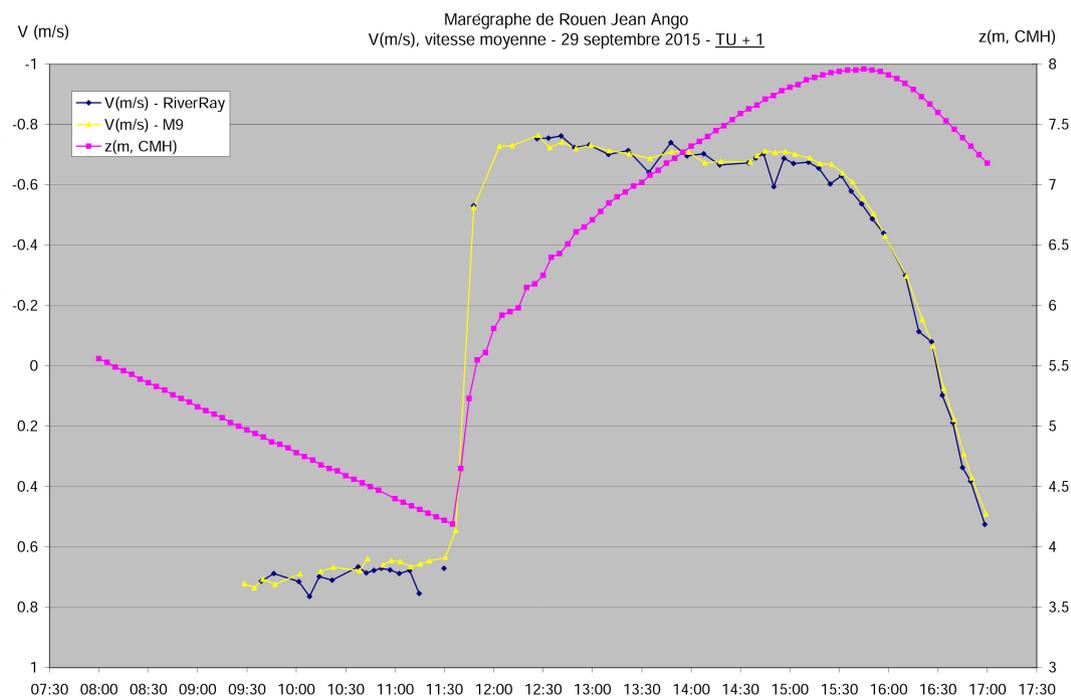
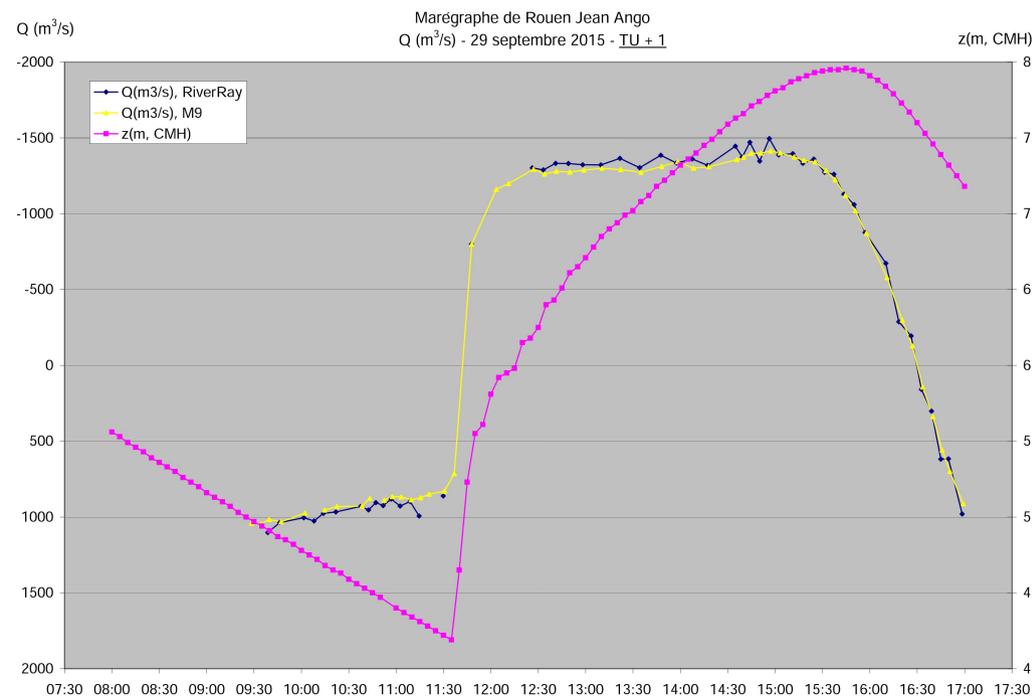
**Situation météorologique « favorable » : faible vent, hautes pressions (au marégraphe du Havre, décote instantanée de -0,12 à -0,47 m, et de -0,24 à -0,32 m à la PM).**

Marégraphe	Basse Mer (29/09/2015 matin)		Pleine Mer suivante (29/09/2015)			Marnage (m)
	Horaire (TU+1)	z (m CMH)	Horaire début (TU+1)	Horaire fin (TU + 1)	z (m CMH)	
Le Havre (SHOM)	5h15	0,34 m	8h45	11h05	8,20 m	7,86 m
Aizier (GPMR)	8h55	2,24 m	10h50	13h20	8,24 m	6 m
Heurteauville (GPMR)	9h50	3,27 m	11h30 (13h25)*	14h15	8,06 m	4,79 m
Rouen (GPMR)	11h35	4,19 m	15h30	16h00	7,96 m	3,77 m

*Synthèse des données (cotes et horaires) mesurées aux marégraphes du Havre (SHOM) et d'Aizier, Heurteauville et Rouen (GPMR) [\* tenue de plein à partir de 13h25, z > 7,50 m à partir de 11h30]*

# Mesures et résultats : Rouen

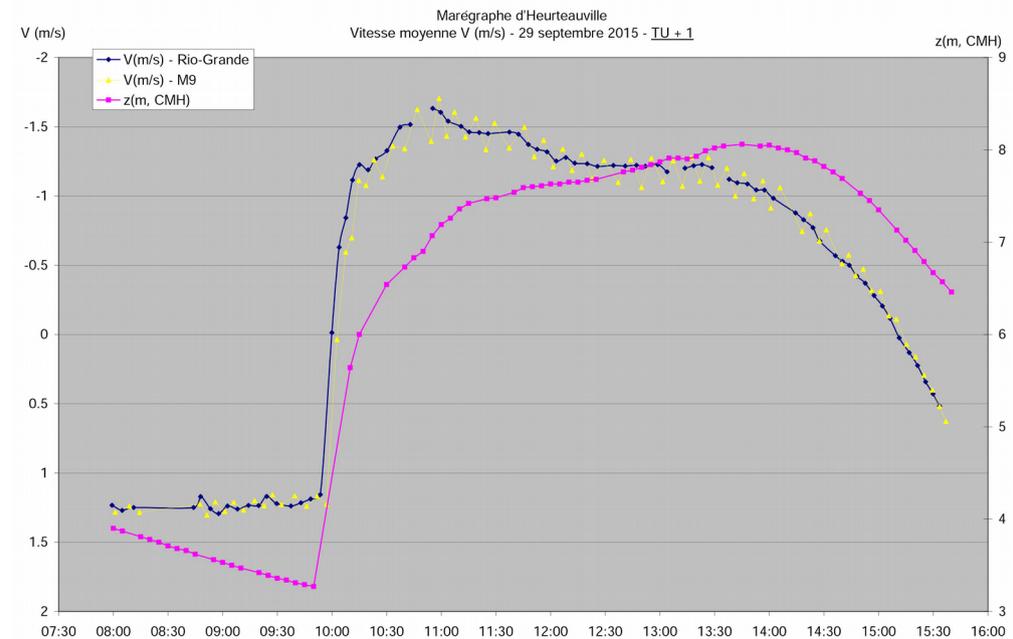
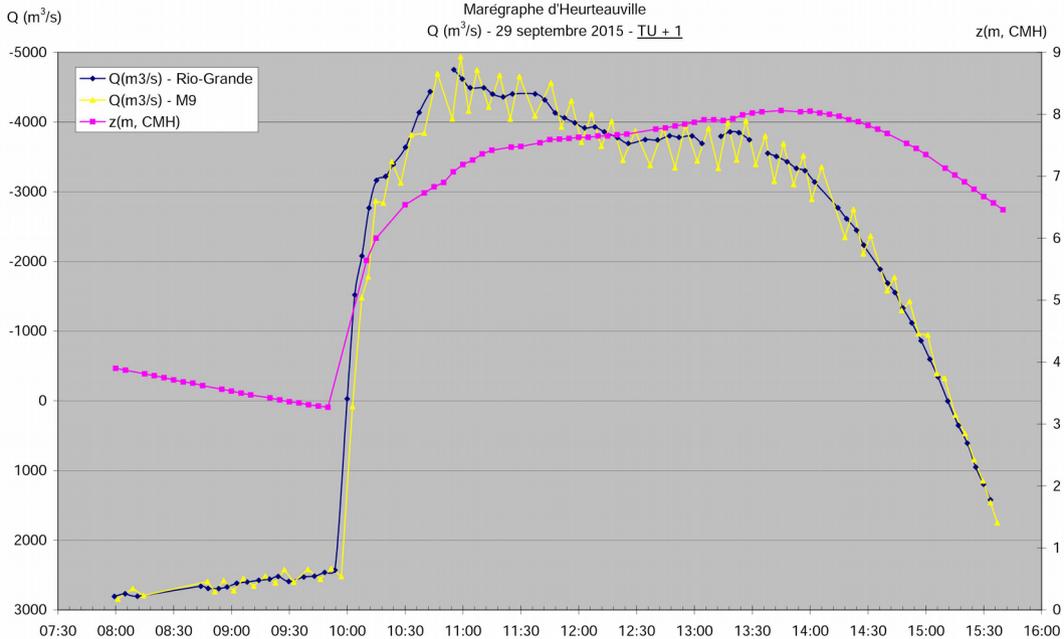
	z (m, CMH)	Q(m <sup>3</sup> /s)		V (m/s)	
		M9 - SonTek	RiverRay - RDI	M9 - SonTek	RiverRay - RDI
Maximum au flot	7,96 m CMH (15h45)	-1 410 m <sup>3</sup> /s (14h57)	- 1 500 m <sup>3</sup> /s (14h57)	- 0,77 m/s (12h27)	- 0,76 m/s (12h41)



- un gradient maximal au flot de l'ordre de - 170 m<sup>3</sup>/s/mn (+ 36 m<sup>3</sup>/s/mn au jusant)
- des vitesses moyennes maximales au flot et au jusant proches.

# Mesures et résultats : Heurteauville

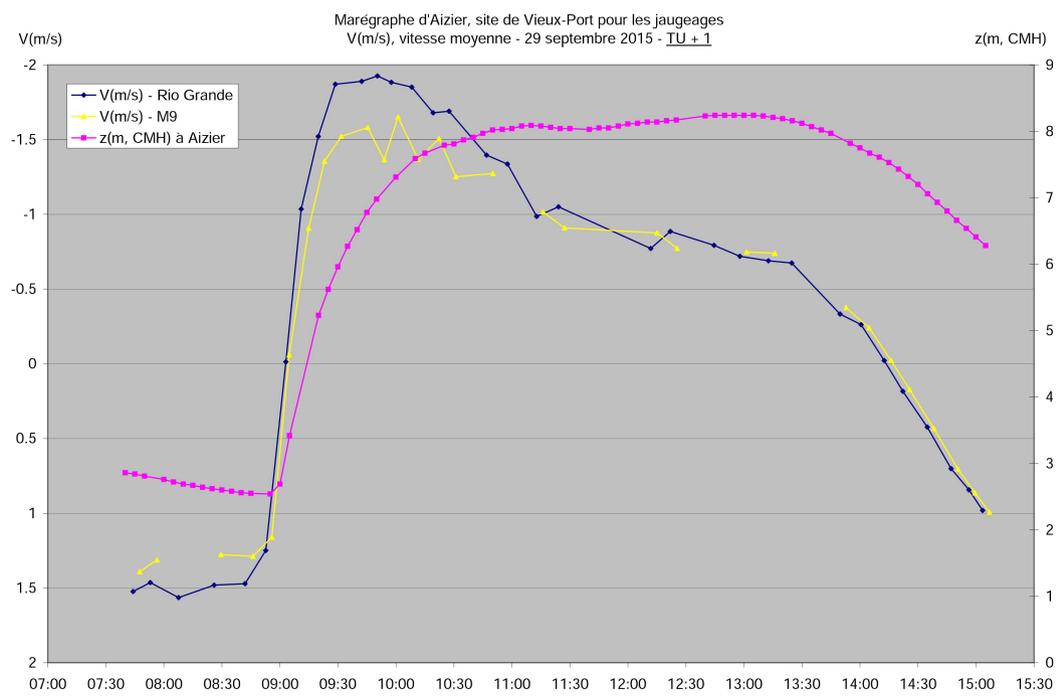
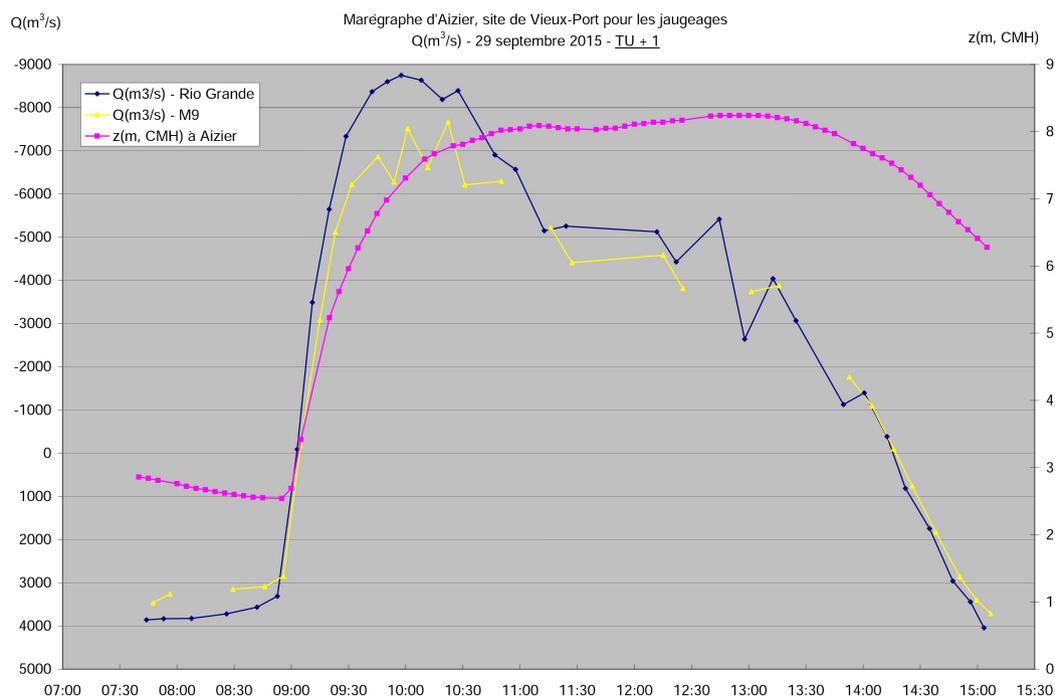
	z (m, CMH)	Q(m <sup>3</sup> /s)		V (m/s)	
		M9 - SonTek	Rio Grande - RDI	M9 - SonTek	Rio Grande - RDI
Maximum au flot	8,06 m (13h45)	- 4 940 m <sup>3</sup> /s (10h59)	- 4 750 m <sup>3</sup> /s (10h55)	- 1,70 m/s (10h59)	- 1,63 m/s (10h55)



- un gradient maximal au flot de l'ordre de - 385 m<sup>3</sup>/s/mn (+ 68 m<sup>3</sup>/s/mn au jusant)
- des vitesses moyennes maximales au début du flot plus fortes que celles au jusant, mais qui finissent par être proches.

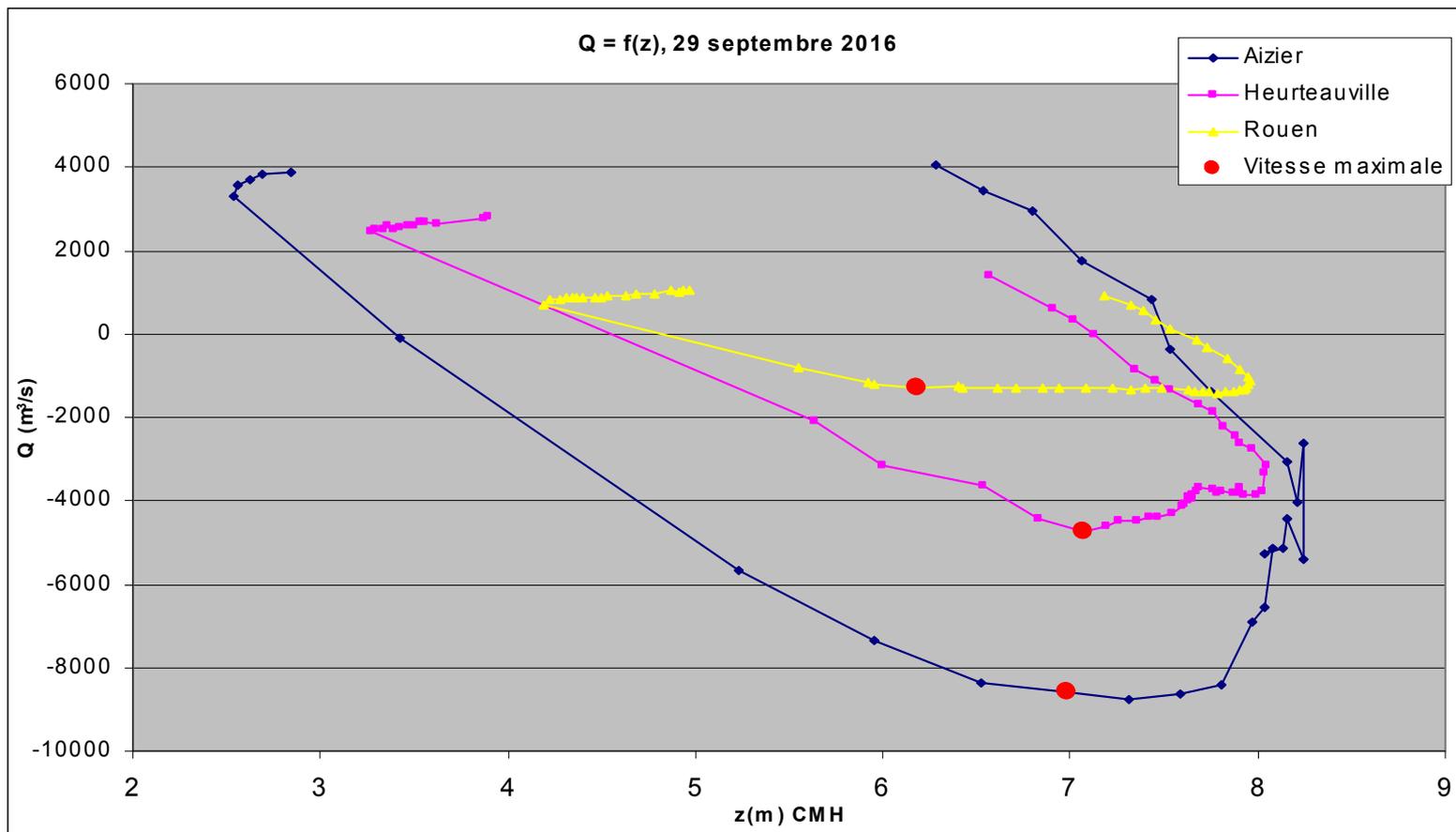
# Mesures et résultats : Aizier/Vieux-Port

	z (m, CMH)	Q(m <sup>3</sup> /s)		V (m/s)	
		M9 - SonTek	Rio Grande - RDI	M9 - SonTek	Rio Grande - RDI
<b>Maximum au flot</b>	8,24 m CMH (12h45)	- 7 670 m <sup>3</sup> /s (10h22)	- 8 750 m <sup>3</sup> /s (9h57)	- 1,65 m/s (10h01)	- 1,93 m/s (9h50)



- un gradient maximal au flot de l'ordre de - 370 m<sup>3</sup>/s/mn (+ 85 m<sup>3</sup>/s/mn au jusant)
- des vitesses moyennes maximales au début du flot nettement plus fortes/jusant « coup de flot », mais qui chutent rapidement pour être inférieures à celles au jusant.

# Q = f(z), au droit des 3 sites de mesures



*Q = f(z), et maximum de vitesses moyennes, sites de Rouen, Heurteauville, et Aizier, 29 septembre 2015*



# Ordres de grandeur des volumes entrant

CUBE D'EAU PÉNÉTRANT EN SEINE PENDANT UNE MARÉE POUR UN COEFFICIENT 92				
(millions de m <sup>3</sup> )				
Localités	Débit fluvial normal (250 m <sup>3</sup> /s)		Débit de la crue du 27-1-1955 (2.150 m <sup>3</sup> /s)	
	Cube	Durée du flot.	Cube	Durée du flot
Courval . . . . .	64 M	5 h 00	21 M	2 h 30
Mesnil-sous-Jumièges . . .	34 M	4 h 50	8,5 M	1 h 50
Rouen . . . . .	12 M		néant	

Septembre 2015 (coef. 117)

88 Mm<sup>3</sup>

63 Mm<sup>3</sup>

20 Mm<sup>3</sup>

D. Laval  
La Houille Blanche, 1955



# Analyse critique des résultats



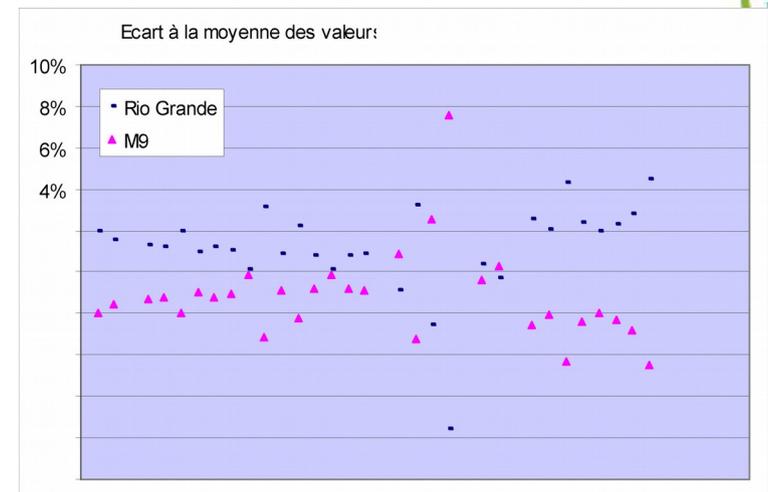
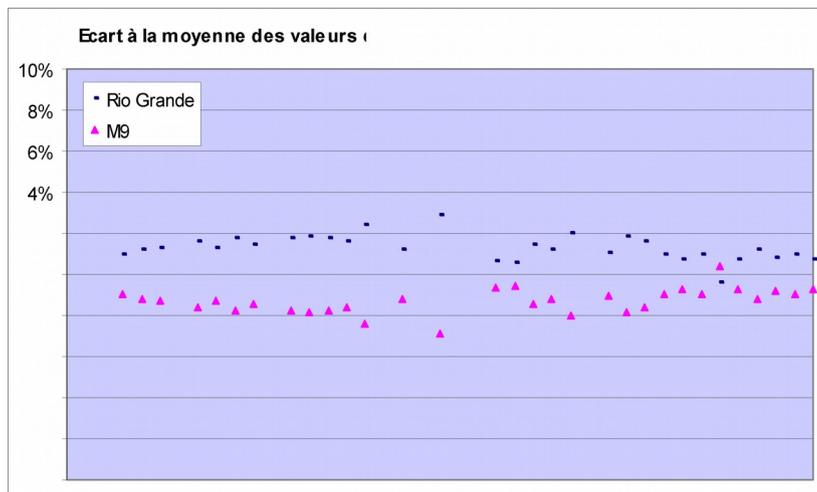
# Interférences entre appareils et impacts sur les mesures

- **Sur les sites de Aizier et de Heurteauville, utilisation d'équipements de mesure travaillant sur des fréquences proches :**
  - **Le M9 de SonTek, travaillant à 1000 kHz**
  - **Le Rio Grande de RDI, travaillant à 1200 kHz**
- **Conséquence ? De possibles interférences entre les deux appareils déployés ;**
- **Impact sur les débits calculés en filtrant les valeurs aberrantes de vitesses affichant des différences de plus de 0,2 m/s ou 0,5 m/s entre les paires de faisceaux opposés (sur le Rio Grande).**

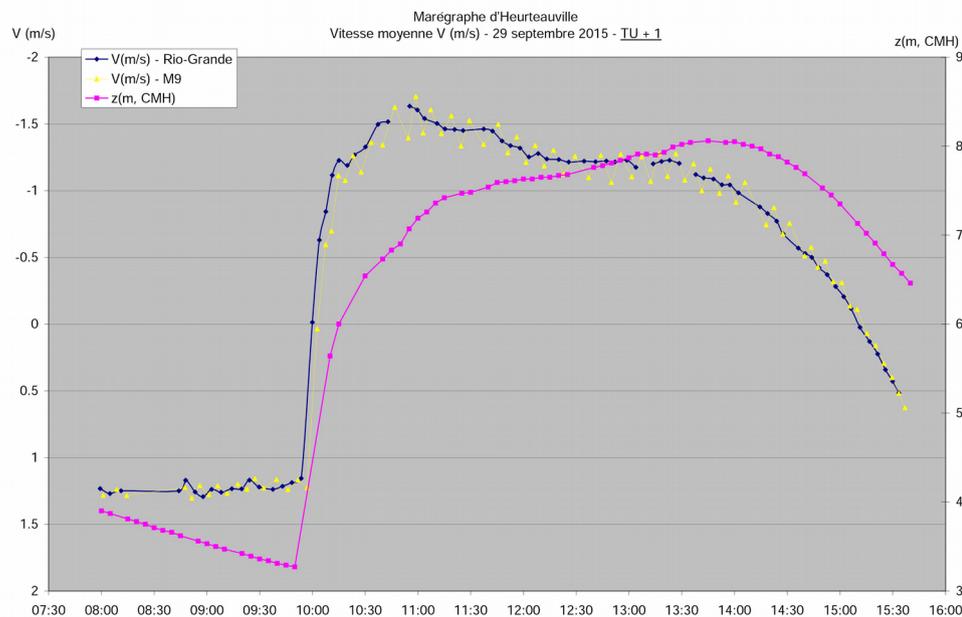
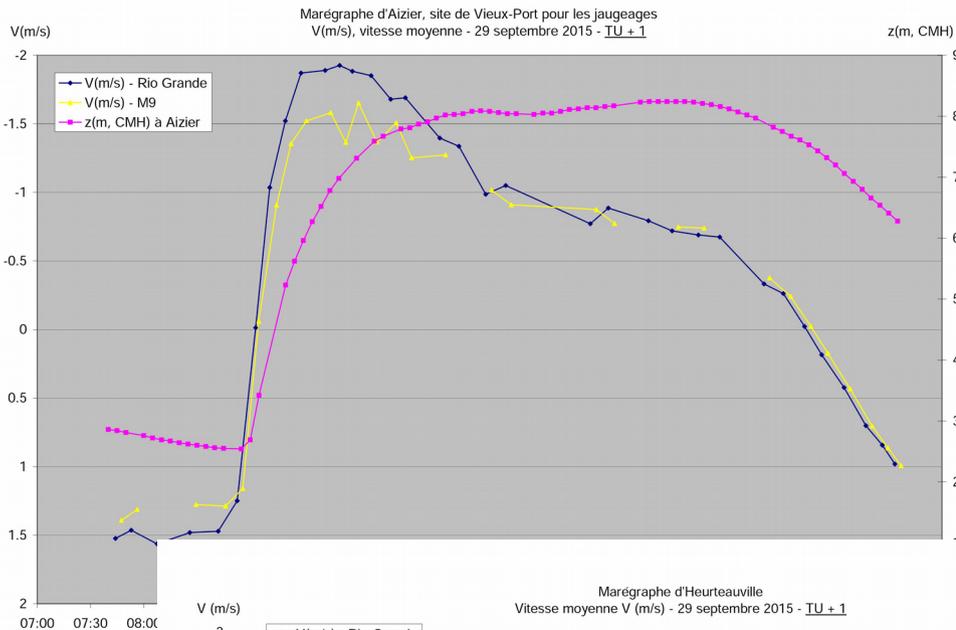
Site d'Heurteauville (77 transects)		Site d'Aizier (32 transects)	
Filtre $\Delta V \leq 0.2$ m/s	Filtre $\Delta V \leq 0.5$ m/s	Filtre $\Delta V \leq 0.2$ m/s	Filtre $\Delta V \leq 0.5$ m/s
[- 0,59 ; + 0,88] %	[- 0,19 ; + 0,08] %	[- 4,6 ; + 0,63] %	[- 0,86 ; + 0,15] %

# Différences de sections mesurées entre les appareils

- Pour 99 % des transects, les écarts de sections mouillées mesurées sont de moins de 5 % ;
- Ce que nous constatons sur les mesures de sections :
  - Des valeurs proches quelque soit le matériel ;
  - Pas d'impact de l'absence de GPS sur le Rio Grande d'Heurteauville ;
  - Dispersion plus importante sur le site aval ;
  - Des valeurs systématiquement plus faibles pour le M9.



# Différences de vitesses mesurées entre les appareils



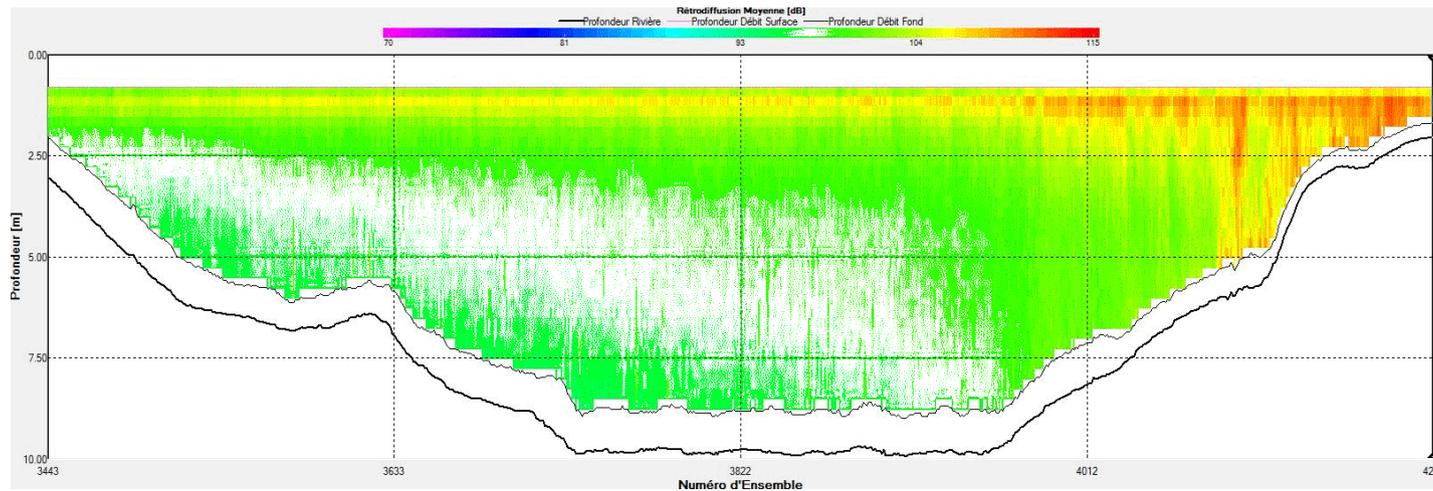
L'analyse des vitesses mesurées révèle :

- Sur le site aval, des écarts certes importants au maximum du flot mais acceptable compte tenu de la courantologie à ce moment ;
- Sur le site aval, des vitesses mesurées systématiquement inférieures pour le M9 de SonTek, lors du « coup de flot » ;
- Sur le site intermédiaire, des écarts de vitesses moyennes sur les allers-retours effectués avec le M9



# Le bouchon vaseux à l'origine de la perte de fond sur le site d'Aizier ?

- **Phénomène de fortes turbidités dues au bouchon vaseux : constat de visu lors des mesures + changement de concentration et/ou de granulométrie mis en évidence par l'analyse qualitative de la rétrodiffusion moyenne ;**



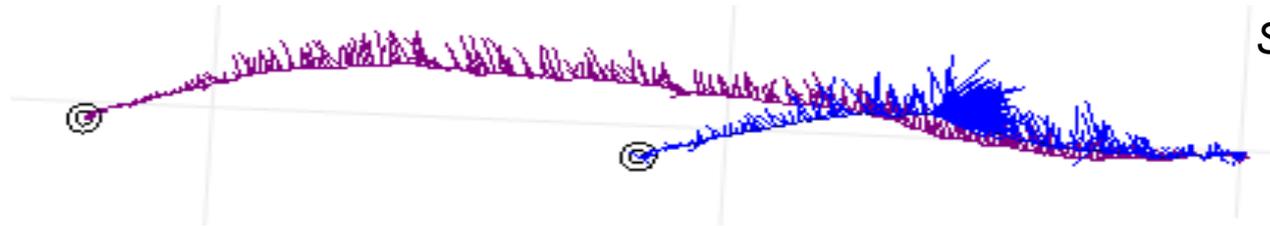
- **Rejet de la majorité des ensembles lorsque les MES se répartissent sur l'ensemble de la section par décantation suite à la chute des vitesses moyennes.**



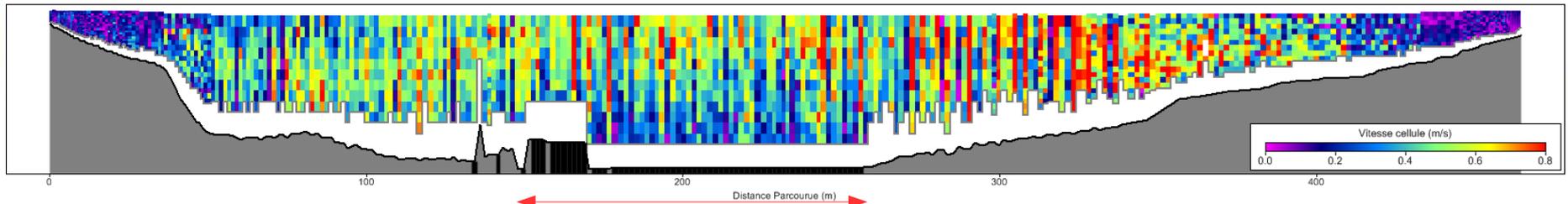
# Le bouchon vaseux à l'origine de la perte de fond sur le site d'Aizier ?

Nord

Sud

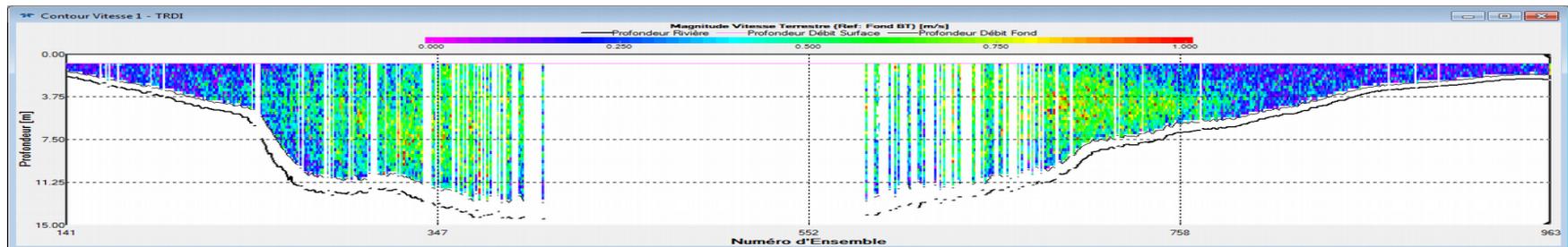


↑ Référence : GPS-GGA Coordonnées ENU  
 ↓ Référence : Suivi de fond Coordonnées ENU  
 2 m/s   
 Grille : 200.0 m



*pertes de fond*

*M9 sur le site d'Aizier (13h55 TU+1)*



*Rio Grande sur le site d'Aizier (13h55 TU+1)*

# Conclusion : éléments généraux en matière de méthodologie

- **Une importante préparation :**
  - réalisation d'une journée de tests : étude des sites, conditions de mise à l'eau, horaires des marées ;
  - étalonnage préalable des appareils sur les bateaux ;
  - relais et dimensionnement adapté des équipes, + de réelles qualités de pilotage ;
- **le déploiement systématique de deux appareils par embarcation (cf. régime fortement transitoire) et travaillant à des fréquences suffisamment distinctes en vue d'éviter de potentielles interférences ;**
- **des appareils équipés de GPS sur les secteurs à potentiels fonds mobiles (un GPS portatif pourra suffire pour les larges sections de mesures) ;**
- **une mesure en continu de la salinité sur les sites potentiellement concernés par la remontée des eaux saumâtres, et d'une mesure de turbidité étalonnée avec des prélèvement en MES sur les sites concernés par un bouchon vaseux.**

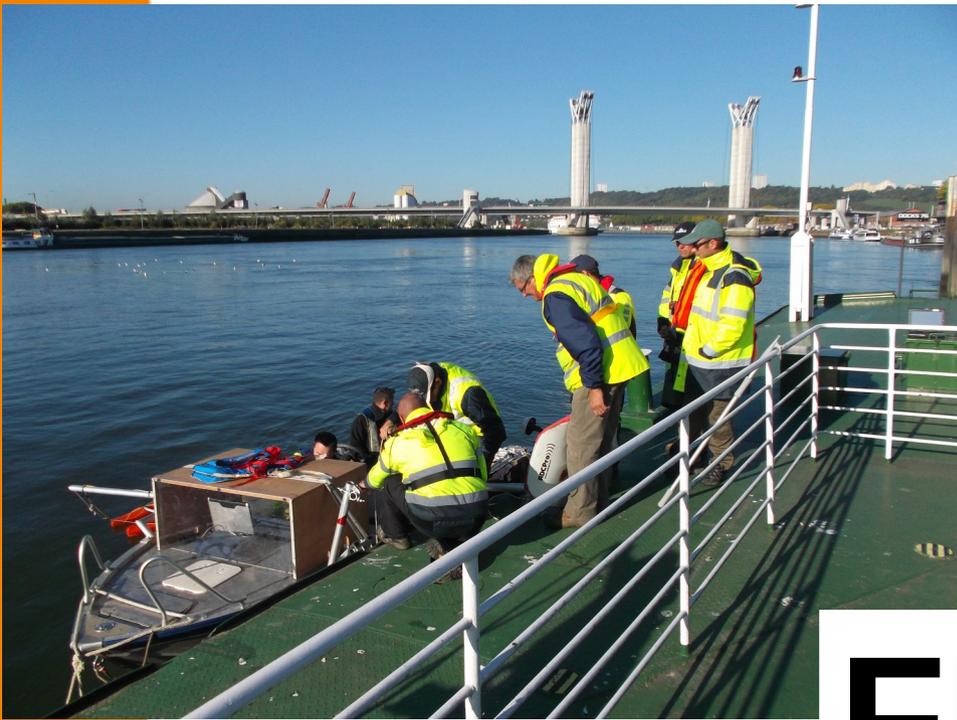
# Remerciements

*Nous remercions vivement pour cet article l'ensemble des équipes ayant participé aux mesures réalisées le 29 septembre 2015 :*

*J. Diribarne, N. Duvinage, C. Dycke, et É. Jacob de l'Unité Hydrométrie et Réseaux de Mesures de la DRIEE Île-de-France,*

*E. Bourban, F. Garnier, S. Kopp, et A. Séguy de l'Unité Bathymétrie et Sédimentologie du LR de Blois (CEREMA, DTer NC),*

*B. Alexandre, B. Boutet, L. Decaëns, A. Demarquet, C. Flouzat, C. Girard, A. Hébrard, S. Hélouin, G. Lemerrier, G. Morel, D. Nzussing, S. Piney, E. Raimbault, et C. Zaniolo des Unités Hydrométrie et Hydrologie et du SPC SACN de la DREAL Normandie.*



**FIN**



# Mesures de débit en estuaire : l'exemple de la Seine

## Résultats et enseignements

Stéphane PINEY, Stéphane HÉLOUIN, Guillaume MOREL, André HÉBRARD, Gwen GLAZIOU<sup>1</sup>  
& Julien DIRIBARNE<sup>2</sup> & Sébastien KOPP<sup>3</sup>

<sup>1</sup> DREAL Normandie, SRN/B2HPC, 1 rue Dufay, 76 100 Rouen et 10 boulevard du Général Vanier, CS 60040, 14 006 Caen, France, [prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr](mailto:prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr) ;

<sup>2</sup> DRIEE Ile-de-France, SPRN/PHPC/UHRM, 10, rue Crillon, 75 194 Paris cedex 04, France, [julien.diribarne@developpement-durable.gouv.fr](mailto:julien.diribarne@developpement-durable.gouv.fr) ;

<sup>3</sup> DDT de Loir-et-Cher, SEB/UHP, 17 quai de l'abbé Grégoire, 41 000 Blois, France, [sebastien.kopp@loir-et-cher.gouv.fr](mailto:sebastien.kopp@loir-et-cher.gouv.fr)

*Les mesures de débit en site estuarien, et en particulier sur la Seine, sont relativement rares, alors que l'estuaire est bien instrumenté avec 17 marégraphes.*

*L'objectif de la campagne menée par les unités Hydrométrie de la DRIEE Ile-de-France et de la DREAL Normandie était de disposer d'une chronique de débits au droit de 3 secteurs sur un cycle de marée quasi complet.*

*L'objet de l'article est :*

- de présenter la méthodologie mise en œuvre, ses limites (ce qu'il aurait fallu faire), et d'en tirer des enseignements plus généraux en matière de protocole de mesure de débit en site estuarien ;
- de caractériser le fonctionnement estuarien de la Seine sur les 3 sites ;
- enfin, de présenter les résultats des mesures et d'en faire une analyse critique.

*Mots-clefs : jaugeages, estuaire, Seine*

## Discharge measurements in estuaries : the example of the Seine river

### Results and lessons learned

*Discharge measurements in estuary waters, especially in the Seine river, are relatively uncommon, even though the estuary is well instrumented with 17 tide gauges.*

*The goal of the measurement campaign undertaken by the hydrometry services of DRIEE Ile-de-France and DREAL Normandie was to acquire a time series of stream flow at 3 sites over almost a full tide cycle.*

*The purposes of this paper are the following :*

- to describe the implemented methodology, its limits (what should have been done) and to draw out more general lessons regarding a discharge measurement procedure in estuary waters ;
- to characterize the estuarine behaviour of the Seine river in these 3 areas ;
- finally, to present the measurement results and to provide their critical analysis.

*Key words : discharge measurements, estuary, Seine river*

## I INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS

### I.1 LE FONCTIONNEMENT FLUVIO-MARITIME DE LA SEINE ET LES DONNÉES EXISTANTES

La Seine présente un fonctionnement fluvio-maritime depuis son débouché en mer au large de Honfleur et du Havre jusqu'au barrage de Poses, en amont, sur un linéaire d'environ 160 km. L'estuaire est particulièrement bien instrumenté avec 17 marégraphes propriétés du GPMR<sup>1</sup>, permettant de disposer de données de cotes marines dans un même référentiel<sup>2</sup> au pas de temps 50 (cf. Figure 1 ci-contre).

*Figure 1 : les 17 marégraphes de Seine du GPMR + Poses (capteur à l'aval du barrage, VNF et DREAL Normandie), fond GIP Seine-Aval).*



<sup>1</sup> Grand Port Maritime de Rouen (GPMR)

<sup>2</sup> Cotes marines du Havre (CMH) : 1 m CMH = 1 m IGN69 + 4,378 m

Pour un débit de Seine de 250 m<sup>3</sup>/s (inférieur au module), le marnage observé est de l'ordre de (Tableau 1) :

Coefficient de marée	Le Havre	St Léonard	Caudebec	Rouen
40	3,30 m	3,30 m	2,70 m	2,40 m
70	5 m	4,50 m	3,70 m	3 m
90	6,50 m	5,40 m	4,50 m	3,40 m
110	7,70 m	5,90 m	5 m	3,50 m

Tableau 1 : coefficients de marée et ordres de grandeur des marnages aux marégraphes du Havre, de St Léonard, de Caudebec et Rouen, pour un débit de la Seine  $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$

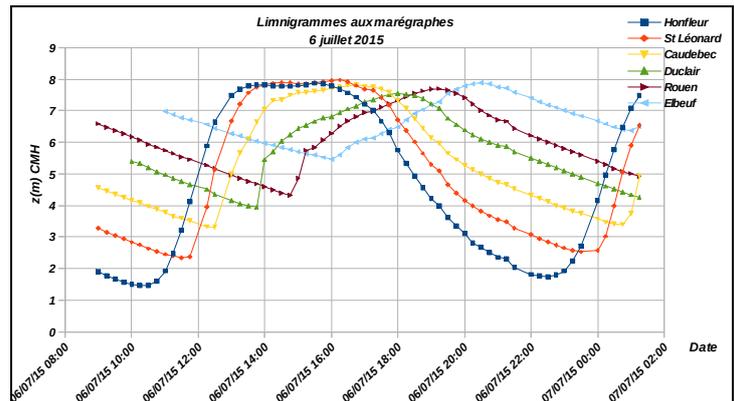


Figure 2 : marégrammes « types » (hors crue de la Seine) aux marégraphes du tableau ci-contre et Elbeuf (situation du 6 juillet 2015, coefficient de marée 91,  $Q \approx 250 \text{ m}^3/\text{s}$ )

On constate sur les marégraphes aval (secteur à dominante « maritime ») le fort gradient de montée au flot (marégrammes non « symétriques », la descente au jusant étant plus longue) et des tenues de plein importantes, de l'ordre 4h, avec souvent une double pleine mer lors de forts coefficients de marée (cf. [GIP Seine aval, 2012]). A partir de Duclair, le gradient de montée très fort à la bascule diminue ensuite (Duclair, Rouen) et les tenues de plein sont aussi plus faibles, de l'ordre de l'heure ; cette tendance s'accroissant plus on va vers l'amont (Elbeuf). Enfin, les temps de propagation des pleines mers (PM) depuis l'aval, fonction du tirant d'eau, sont de l'ordre de 6h du marégraphe du Havre à celui de Rouen.

Si des données historiques de débits sont disponibles, elles sont anciennes, et la reconfiguration du chenal à l'aval de l'estuaire qui est intervenue depuis est de nature à ne pas permettre leur utilisation. Elles offrent cependant des ordres de grandeur intéressants, comme en témoignent les valeurs de débits maximum instantanés citées dans [Laval, 1955] (Tableau 2 ci-dessous).

DÉBITS MAXIMUM INSTANTANÉS POUR UN DÉBIT PLUVIAL DE 250 M<sup>3</sup>/S

LOCALITÉS	DÉBIT MAXIMUM DE FLOT			DÉBIT MAXIMUM DE JUSANT		
	Coefficient 104	Coefficient 92	Coefficient 70	Coefficient 104	Coefficient 92	Coefficient 70
		m <sup>3</sup> /s			m <sup>3</sup> /s	
La Risle.....	16.000	14.000	10.400	6.400	6.150	5.600
Courval .....	8.000	7.000	5.700	4.000	3.700	3.000
Mesnil-sous-Junivèges .....	3.200	2.950	2.500	2.500	2.300	1.800
Rouen .....	1.400	1.300	1.100	1.250	1.100	900

Tableau 2 : débits maximum instantanés pour un débit fluvial de 250 m<sup>3</sup>/s. Tableau C issu de [Laval, 1955] (Courval (PK 326,85 km) est proche du site de Aizier (PK 323,40 km), la confluence avec La Risle de Fatouville (PK 350 km), cf. Figure 1) [l'article ne mentionne pas comment ces valeurs ont été obtenues]

## I.2 L'OBJECTIF PRINCIPAL DES MESURES

L'objectif principal de la campagne menée le 29/09/2015 par les 3 unités Hydrométrie des DRIEE Ile-de-France et la DREAL Normandie avec l'appui du LR de Blois<sup>3</sup> était de disposer d'une chronique de débits au droit de 3 secteurs du tronçon Seine aval, sur un cycle de marée complet.

Ces données ont permis, notamment, de confronter les débits mesurés aux valeurs issues du modèle hydraulique utilisé par le Service de prévision des crues Seine aval et Côtiers Normands, d'en valider le calage, et de mieux appréhender les volumes rentrant au flot et les champs de vitesse correspondants. Il s'agissait en particulier de pouvoir caractériser les débits maximum au flot auxquels sont associées les cotes de pleine mer atteintes.

<sup>3</sup> CEREMA, Dter Normandie-Centre

## II MÉTHODOLOGIE ET ÉQUIPEMENT DÉPLOYÉS

### II.1 LE CHOIX DES SITES

Les 3 sites retenus : Aizier, Heurteauville et Rouen, ont été choisis de manière à caractériser 3 secteurs distincts (respectivement aux PK 323,40, 297,65 et 243,70 km) du tronçon Seine aval, lors d'une situation présentant un fort coefficient de marée et un faible débit de Seine, en vue d'appréhender, comme on l'a vu, les débits maximum atteints au flot, dans un contexte à dominante maritime.

Le site le plus amont (Rouen) a été retenu en raison de son positionnement en limite aval du secteur à dominante « fluviale »<sup>4</sup>, et dans la mesure où la Seine présente encore sur ce site un seul chenal d'écoulement. En outre, il présente l'avantage, comme le site d'Heurteauville, de disposer de chroniques de mesures ponctuelles de vitesse déjà réalisées par le GPMR. Le site le plus aval Aizier (Vieux Port) a été retenu, quant à lui, dans la mesure où nous nous situons à la limite de la remontée des eaux saumâtres (salinité < 5 g/l, cf. [GIPSA, 2013]). Enfin, le temps de propagation de la marée dans l'estuaire et la volonté de réaliser des mesures sur une seule journée (même situation « hydrologique » mesurée aux trois sites), et de jour, imposaient aussi que les sites retenus ne soient pas trop éloignés les uns des autres.

Le choix des sites a été aussi réalisé au regard d'une possibilité aisée de mise à l'eau et de réembarquement, ce qu'il convient de vérifier avec attention compte tenu des forts coefficients de marée, et donc d'une cote de basse mer (BM) particulièrement basse en aval du point caractéristique (site d'Aizier en particulier) : caractériser le maximum de débit au flot, supposait, compte tenu du fort gradient de hauteurs et de débits, de débiter les mesures avant l'étalement de BM.

Enfin, les trois sites se situent systématiquement au droit d'un marégraphe du GPMR pour lequel on dispose, comme on l'a vu, de données de cotes marines (m CMH) au pas de temps de 5 s ce qui nous permet de connaître au droit de chaque section de jaugeage les variations correspondantes de la ligne d'eau.

### II.2 PREMIERS ÉLÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE

Une première journée de mesures le 21 avril 2015, où des jaugeages ont été réalisés au droit des sites d'Aizier et de Rouen, avait permis de tirer les premiers enseignements suivants :

- compte tenu de la forte variation des débits mesurés, il est impossible d'envisager plusieurs traversées pour valider les jaugeages réalisés. Sur les 3 sites de mesure, la Seine présente une largeur respective de l'ordre de 450 m (Aizier), de 250 m (Heurteauville) et 200 m (Rouen) : en fonction de la courantologie, les temps de traversée sont ainsi de l'ordre de 2 à 12 mn ; le débit mesuré sera donc un débit moyen sur cette durée<sup>5</sup>.

Aussi, il s'agira à chaque fois de mettre en œuvre simultanément deux ADCP (à tribord et bâbord des bateaux déployés), travaillant à des fréquences différentes en vue d'éviter les « interférences » entre signaux et de manière à ce que chaque appareil réceptionne bien le train d'ondes qu'il a lui-même émis ;

- il est aussi apparu nécessaire d'équiper un maximum d'entre eux d'un système GPS au regard d'un fond mobile présent en particulier sur le(s) site(s) aval ;
- les jaugeages prévus nécessitent des mesures « continues » sur une période de l'ordre de 6 à 8h, ce qui suppose un relais des équipes de jaugeages et des pilotes, et donc le dimensionnement des équipes en conséquence.

### II.3 LE MATÉRIEL ET LES ÉQUIPEMENTS DÉPLOYÉS

Le 29 septembre 2015, les bateaux et matériels suivants ont été déployés sur chacun des sites :

- sur le site d'Aizier (Vieux-Port) : zodiac semi-rigide « Hydromètre » (5,25 m x 2,15 m), moteur de 110 Cv, de la DRIEE IdF, avec deux ADCP : Rio Grande 1200 (RDI) et M9 (SonTek) ;

<sup>4</sup> Le profil en long de la Seine est globalement « plat » depuis l'aval jusqu'au port Rouen (cf. trafic maritime), où il présente ensuite une nette rupture vers l'amont.

<sup>5</sup> Les durées de réalisation des transects (par les 2 ADCP de chaque bateau) furent au final le 29/09/2015, de 3' à 16'10" à Rouen, de 2'30" à 11'55" Heurteauville, et de 4'40" à 10'35" sur Vieux-Port (Aizier).

- sur le site de Heurteauville : zodiac semi-rigide « Lorca » (5 m x 2,1 m), moteur de 85 Cv, de la DRIEE IdF, avec deux ADCP : Rio Grande 1200 (RDI) et M9 (SonTek) ;
- sur le site de Rouen : bateau rigide « Méandre », arkip 460, coque alu (4,60 m x 1,85 m), moteur de 50 Cv, du LR de Blois (CEREMA), avec deux ADCP : RiverRay (RDI) et M9 (SonTek).

Les RiverRay et Rio Grande (RDI) travaillent respectivement avec une fréquence de 600 et 1 200 kHz. Le M9 (SonTek) dispose quant à lui d'un capteur dédié au suivi de fond (500 kHz) et de 2 groupes de 4 transducteurs travaillant respectivement à 1 000 et 3 000 kHz. Lors des mesures, les M9 (SonTek) ont au final essentiellement travaillé à 1 000 kHz : il conviendra donc d'examiner l'impact des potentielles interférences entre les deux appareils sur les débits calculés sur les sites de Heurteauville et d'Aizier.



Illustration 1 : vue de la « Hydromètre » à Vieux Port (Aizier), à bâbord le SonTek M9 avec son GPS, à tribord le Rio Grande (RDI) sur sa potence



Illustration 2 : vue du « Lorca » à Heurteauville, à bâbord le SonTek M9 avec son GPS, à tribord le Rio Grande (RDI) sur sa potence lors de sa mise à l'eau



Illustration 3 : vue du « Méandre » à Rouen, à bâbord le SonTek M9 avec son GPS, à tribord le RiverRay (RDI) avec son GPS

### III LE FONCTIONNEMENT FLUVIO-MARITIME DE LA SEINE MIS EN ÉVIDENCE

#### III.1 LA JOURNÉE DU 29 SEPTEMBRE 2015

Le débit de la Seine à Vernon était de l'ordre de  $Q = 210$  à  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  (lundi 28 et mardi 29/09) ; celui de l'Eure à Louviers de l'ordre de  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$  ; aussi un ordre de grandeur de  $Q \approx 250 \text{ m}^3/\text{s}$  peut être retenu pour le débit de la Seine, en amont du tronçon concerné.

Le coefficient de marée correspondant au pic de PM du mardi 29/09 matin est de 117. La situation météorologique était particulièrement « favorable » : faible vent, hautes pressions. Au marégraphe du Havre (SHOM), on observait une décote instantanée allant de  $-0,12$  à  $-0,47 \text{ m}$ , et de  $-0,24$  à  $-0,32 \text{ m}$  à la pleine mer.

Les horaires des Basse Mer (BM) et Pleine Mer (PM) et les marnages étaient les suivants :

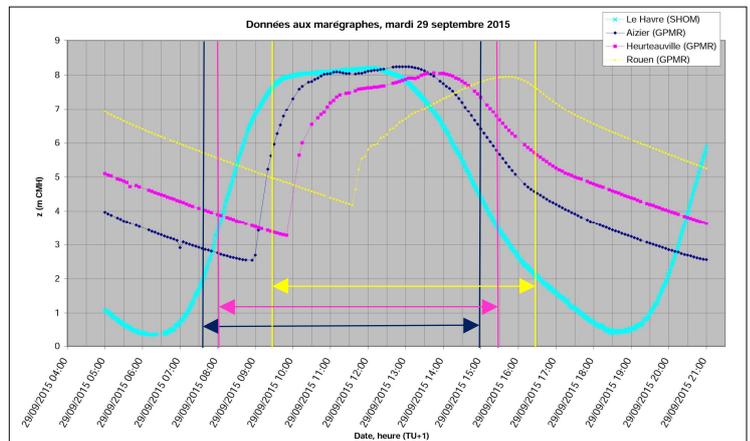


Figure 3 :  $z$  (m CMH) aux marégraphes le 29/09/2015 (en TU+1 (= HL-1)), et plages des mesures sur chaque site

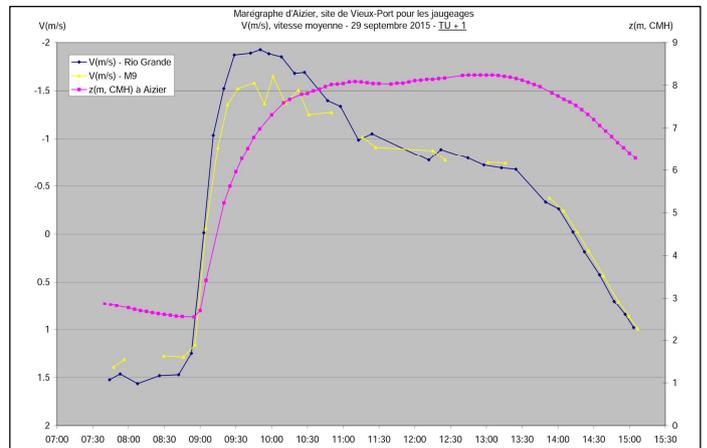
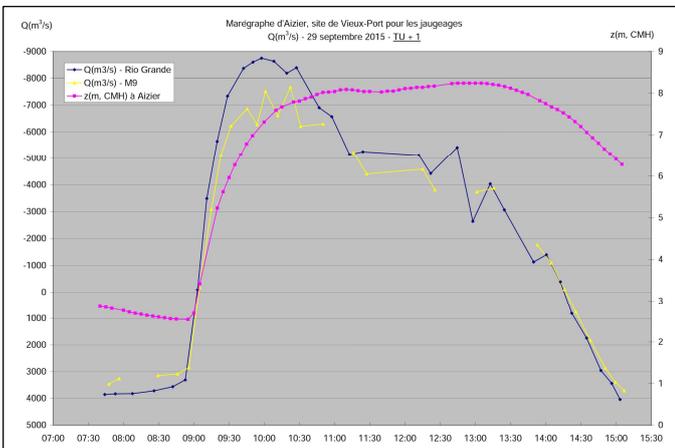
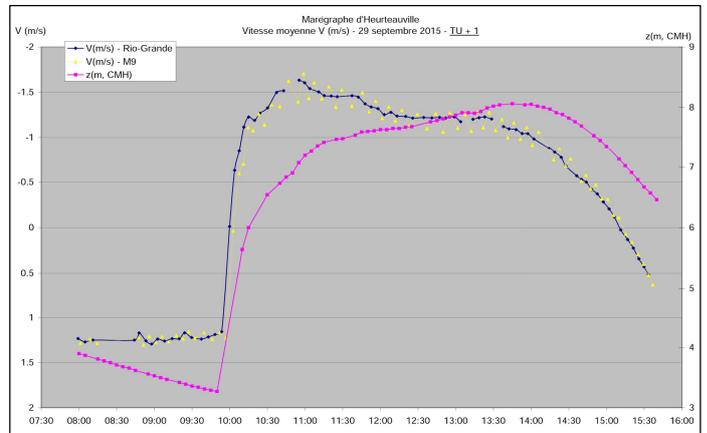
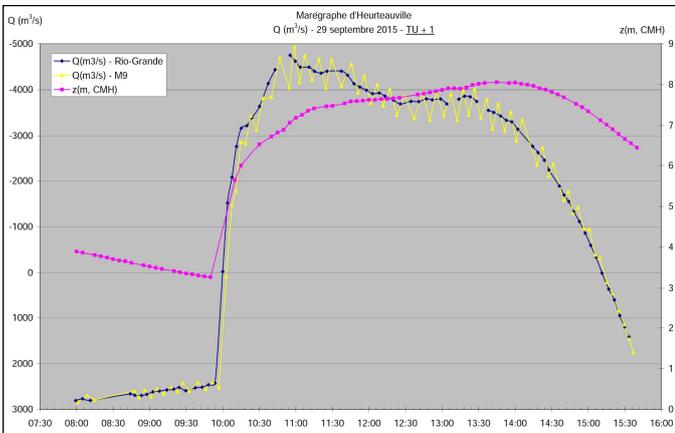
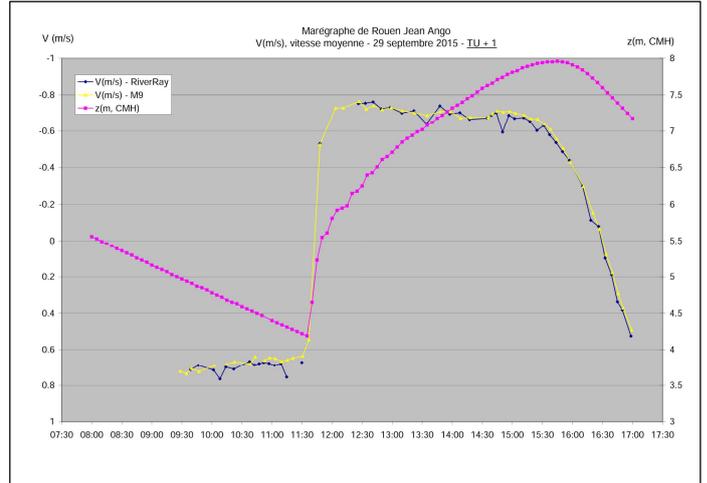
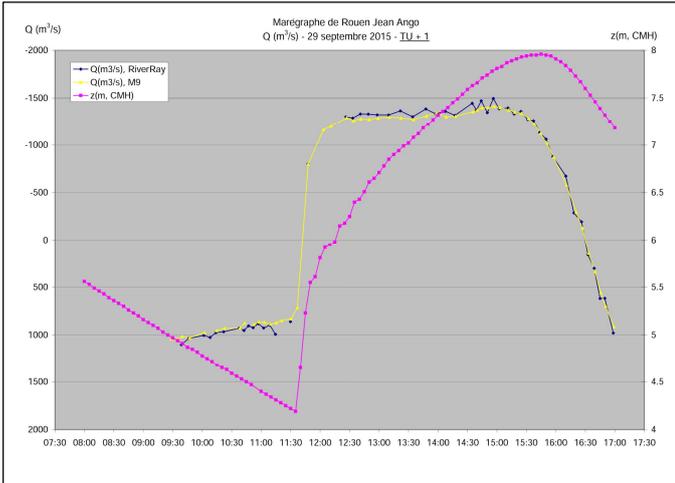
Marégraphe	Basse Mer (29/09/2015 matin)		Pleine Mer suivante (29/09/2015)		Marnage (m)
	Horaire (TU+1)	$z$ (m CMH)	Horaire début / fin (TU+1)	$z$ (m CMH)	
Le Havre (SHOM)	6h15	0,34 m	9h45 / 12h05	8,20 m	7,86 m
Aizier (GPMR)	8h55	2,24 m	10h50 / 13h20	8,24 m	6,00 m
Heurteauville (GPMR)	9h50	3,27 m	11h30 (13h25)* / 14h15	8,06 m	4,79 m
Rouen (GPMR)	11h35	4,19 m	15h30 / 16h00	7,96 m	3,77 m

Tableau 3 : synthèse des données (cotes et horaires) mesurées aux marégraphes du Havre (SHOM) et d'Aizier, Heurteauville et Rouen (GPMR) [\* tenue de plein à partir de 13h25,  $z > 7,50 \text{ m}$  à partir de 11h30]

### III.2 LES DÉBITS ET LES VITESSES MOYENNES MESURÉS SUR LES TROIS SITES

	z (m, CMH)	Q(m <sup>3</sup> /s)		V(m/s)	
		M9 - SonTek	RiverRay/RG - RDI	M9 - SonTek	RiverRay/RG - RDI
Site de Rouen	7,96 m (15h45)	- 1 415 m <sup>3</sup> /s (14h57)	- 1 495 m <sup>3</sup> /s (14h57)	- 0,77 m/s (12h27)	- 0,76 m/s (12h41)
Site de Heurteauville	8,06 m (13h45)	- 4 940 m <sup>3</sup> /s (10h59)	- 4 750 m <sup>3</sup> /s (10h55)	- 1,70 m/s (10h59)	- 1,63 m/s (10h55)
Site de Aizier	8,24 m (12h45)	- 7 670 m <sup>3</sup> /s (10h22)	- 8 745 m <sup>3</sup> /s (9h57)	- 1,65 m/s (10h01)	- 1,93 m/s (9h50)

Tableau 4 : synthèse des données mesurées (maximum au flot) au marégraphe de Rouen, le 29 septembre 2015 de 9h28 à 16h59 (TU+1), de Heurteauville de 7h59 à 15h37 (TU+1), et de Aizier de 7h44 à 15h07 (TU+1)



Figures 4, 5, 6, 7, 8, et 9 : sites de Rouen, Heurteauville et Aizier, cotes marines, débits et vitesses (M9 et RiverRay/Rio Grande)

Ces mesures ont permis de mettre en évidence (Tableau 5) :

Site	Vitesses maximales au flot et au jusant	Gradient
Rouen	Des vitesses moyennes maximales au flot et au jusant <sup>6</sup> proches.	Un gradient maximal au flot de l'ordre de - 168 m <sup>3</sup> /s/mn. La bascule au jusant présente un gradient de débit plus faible (de l'ordre de + 36 m <sup>3</sup> /s/mn).
Heurteauville	Des vitesses moyennes maximales au début du flot plus fortes que celles que l'on observe au jusant, mais qui finissent par présenter des ordres de grandeur proches.	Un fort gradient du débit à la bascule au flot de - 385 m <sup>3</sup> /s/mn. La bascule au jusant présente un gradient plus faible (de l'ordre de + 68 m <sup>3</sup> /s/mn).
Aizier	Des vitesses moyennes maximales au début du flot (« coup de flot ») nettement plus fortes que celles que l'on observe au jusant, mais qui diminuent rapidement pour être au final inférieures à celles observées au jusant.	Un fort gradient du débit à la bascule au flot de l'ordre de - 370 m <sup>3</sup> /s/mn (proche de Heurteauville). La bascule au jusant présente un gradient plus faible (de l'ordre de + 86 m <sup>3</sup> /s/mn).

Tableau 5 : analyse des vitesses moyennes et des gradients de débits mesurés sur les trois sites

Nous faisons figurer ci-dessous (Figure 10) pour les 3 sites de Rouen, Heurteauville et Aizier, la courbe

$Q = f(z)$  ( $z$ (m) CMH) telle qu'elle s'établit le 29 septembre 2015. Elle permet de mettre en évidence :

- un maximum en matière de cotes qui s'observe toujours après la pointe de vitesse et de débit (la vitesse moyenne et le débit au flot diminuent tandis que la cote marine continue d'augmenter) ;
- une vitesse moyenne maximale au flot qui s'observe avant le débit maximum sur le site de Rouen<sup>7</sup>, et (quasi) en phase avec la pointe de débit sur les sites de Heurteauville et d'Aizier.

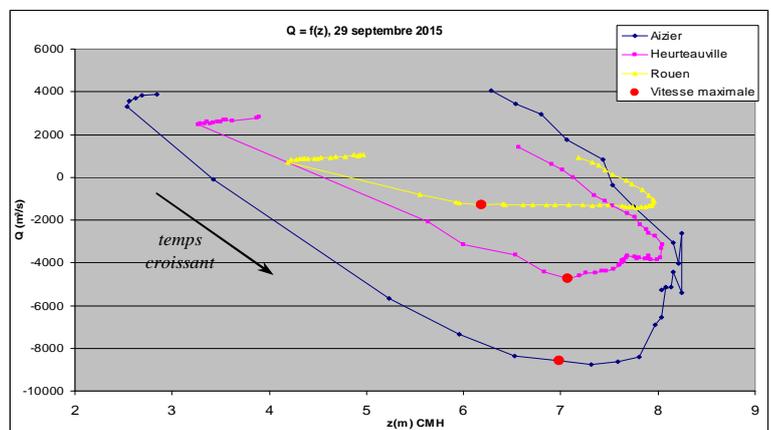


Figure 10 :  $Q = f(z)$ , et maximum de vitesses moyennes, sites de Rouen, Heurteauville, et Aizier, 29 septembre 2015

#### IV ANALYSE CRITIQUE DES RÉSULTATS

Au total, sur les 3 sections, ce sont 324 mesures qui ont été réalisées le 29 septembre 2015 (104 sur la section de Rouen, 156 sur celle de Heurteauville, et 64 retenues sur celle d'Aizier).

##### IV.1 INTERFÉRENCES ENTRE APPAREILS ET IMPACTS SUR LES MESURES

Comme on l'a vu précédemment (cf. chapitre II.3), les mesures réalisées sur les sites de Heurteauville et Aizier ont été potentiellement affectées par des interférences entre les deux appareils déployés : le Rio Grande (RDI) travaillant à 1 200 kHz, et le M9 (SonTek), essentiellement, à 1 000 kHz. En effet, les fréquences retour analysées par le Rio Grande (RDI) se situent dans une plage de  $\pm 25\%$  de la fréquence émise, elle-même variant de  $\pm 12,5\%$  par rapport à la valeur centrale affichée (1 200 kHz) : les fréquences retour analysées par l'appareil sont donc potentiellement comprises entre [785 ; 1 690] kHz.

Pour peu que l'impact de ces interférences se traduise essentiellement par des valeurs aberrantes de vitesses (cf. échanges avec un des constructeurs (RDI)), nous avons procédé à un filtre des valeurs de vitesses sur la base d'une différence maximale de 0,2 et 0,5 m/s entre les valeurs de vitesses verticales mesurées respectivement par chacune des 2 paires de faisceaux opposés (critère « Error Velocity » sous WinRiver (RDI)). En retirant les deux transects réalisés sur chaque site à la bascule (les différences entre

<sup>6</sup> sur la base d'une extrapolation de la chronique mesurée (idem sur les autres sites).

<sup>7</sup> même si, lors du maximum de vitesse, le débit a quasi atteint son maximum.



Une analyse plus détaillée des mesures réalisées révèle :

- des écarts entre valeurs de débits et de vitesses maximum au flot qui peuvent sembler importants sur le site d'Aizier (cf. *Figures 8 et 9*). Toutefois, lors de ce « coup de flot », la moyenne des écarts à la moyenne est de 9,3 % avec un écart type de 4,4 %, ce qui, au regard de la courantologie observée, reste satisfaisant. On remarquera cependant, sur ce site, que les valeurs de débits et de vitesses moyennes mesurées par le Rio Grande (RDI) sont quasi systématiquement supérieures à celles mesurées par le M9 (SonTek) ;
- une variabilité des mesures de débits et de vitesses moyennes réalisées par le M9 (SonTek) sur le site d'Heurteauville (cf. *Figures 6 et 7*) en fonction du sens de la mesure (RD → RG et inv.). Ce phénomène s'explique certainement par un étalonnage du compas réalisé, sur ce site, à l'extérieur du bateau : la masse du bateau associée au moteur a certainement eu une influence sur le compas conduisant à cet effet de rive.

### IV.3 LE MOUVEMENT DE FOND ET LE NÉCESSAIRE SUIVI GPS

Lors des mesures, tous les appareils étaient équipés d'un suivi GPS en vue de limiter l'impact des mouvements de fond sur les mesures, excepté le Rio Grande (RDI) déployé sur le site d'Heurteauville. Les trois M9 (SonTek) étaient équipés du DGPS distribué par le constructeur, avec une précision maximale annoncée de 1 m en planimétrie. Le RiverRay (RDI) disposait d'un GPS RTK (temps réel) offrant une précision centimétrique en planimétrie. Le Rio Grande (RDI), déployé sur le site d'Aizier, disposait d'un GPS portatif bon marché annonçant une précision de 3 m en planimétrie en condition optimale.

Compte tenu de la bonne couverture en satellites et d'une utilisation majoritaire de DGPS, c'est la trame GGA qui a été prise comme référence pour dépouiller les jaugeages. En se basant sur le nombre de satellites réceptionnés et sur le HDOP<sup>11</sup>, les précisions observées (*Tableau 8*) se révèlent globalement satisfaisantes<sup>12</sup> en particulier au regard des largeurs des sections des 3 sites.

Site	Équipement	Nombre de satellites (couverture moyenne)	Précision moyenne en planimétrie en (m)
Rouen	M9 (SonTek)	9	1.05
	RiverRay (RDI)	13 (cf. Glonass disponible)	≈ 0.01
Heurteauville	M9 (SonTek)	8	1
	Rio Grande (RDI)	-	-
Aizier	M9 (SonTek)	8	1.12
	Rio Grande (RDI)	10	2.5

*Tableau 8 : précisions moyennes (m) du positionnement en planimétrie des équipements déployés*

Sur le site de Rouen, les écarts de débits mesurés via le suivi de fond de l'appareil et le suivi GPS sont en grande majorité peu significatifs : ils révèlent l'absence de mouvement de fond sur le site de Rouen lors des mesures. Par ailleurs, si le RiverRay (RDI) disposait d'un GPS compatible Glonass et d'une correction RTK assurant une grande précision du relevé, au vu des valeurs très proches des deux équipements, ce système n'apporte pas, sur une section aussi large (200 m), une réelle plus value sur la mesure de débit.

Sur les sites d'Heurteauville et Aizier, à la fin du jusant et avant la bascule de l'étale de BM, nous observons peu de différences entre la planimétrie issue du suivi de fond des appareils et le suivi GPS. Dès le début du flot, nous observons nettement la dérive du suivi de fond engendrée par la mise en mouvement des sédiments. Pendant cette phase, aussi bien à Aizier qu'à Heurteauville, les ADCP déployés équipés de GPS sont dans la capacité de détecter le fond sans difficulté, et le tracé GPS permet de compenser efficacement l'influence du fond mobile.

<sup>9</sup> Respect. -28,7 m<sup>3</sup>/s (RG) et +67,2 m<sup>3</sup>/s (M9) (BM vers PM) et +4,50 m<sup>3</sup>/s (RG) et +180 m<sup>3</sup>/s (M9) (PM vers BM).

<sup>10</sup> Respect. -64,3 m<sup>3</sup>/s (RG) et -157,1 m<sup>3</sup>/s (M9) (BM vers PM) et -347,7 m<sup>3</sup>/s (RG) et -69,1 m<sup>3</sup>/s (M9) (PM vers BM).

<sup>11</sup> Coefficient d'affaiblissement de la précision horizontale. En situation optimale ce coefficient doit être proche de 1.

<sup>12</sup> Sur les sites d'Aizier et d'Heurteauville, la couverture boisée de la rive droite a pu augmenter significativement l'imprécision en rive (HDOP x 2).

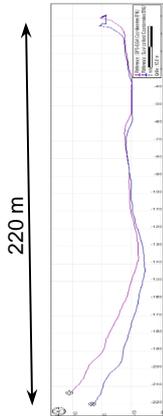


Figure 14 : M9 à Heurteauville 10h TU+1 (suivi GPS à gauche, suivi de fond à droite)

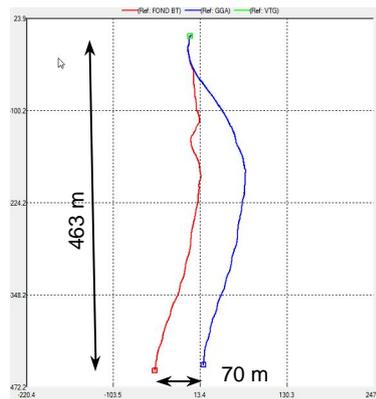


Figure 15 : Rio Grande à Aizier 9h46 TU+1 (suivi GPS à droite, suivi de fond à gauche)

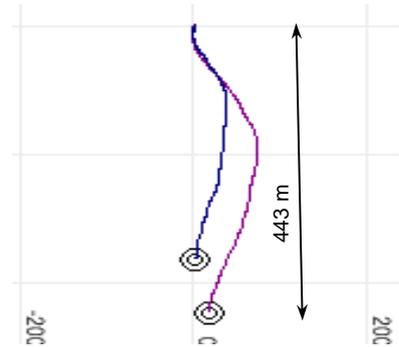


Figure 16 : M9 à Aizier 9h50 TU+1 (suivi GPS à droite, suivi de fond à gauche)

Sur le site de Heurteauville, la présence d'un mouvement de fond est réelle (cf. Figure 14). La comparaison du tracé GPS du M9 (SonTek) et son suivi de fond met en évidence des mouvements de fond entraînant des dérives de l'ordre de 10 à 40 m, soit une dérive de l'ordre de 5 à 6 % sur les débits les plus élevés ; dérive susceptible elle aussi d'être observée sur le Rio Grande. Bien que cette approche soit très empirique, la proximité des résultats entre les deux appareils (cf. Tableau 7) conforte l'idée que l'impact des mouvements de fonds à Heurteauville sur les jaugages réalisés avec le Rio Grande (RDI) conduit à une incertitude acceptable.

On remarquera enfin, que si pour le Rio Grande (RDI) la perte de fond entraîne systématiquement la perte d'ensemble, l'appareil estime cependant relativement bien son trajet dans la plupart des cas ; la manœuvre de l'embarcation, en maintenant un cap et une vitesse régulière favorisant certainement ce résultat. Pour le M9 (SonTek), on observe, aussi bien à Aizier qu'à Heurteauville, des pertes ponctuelles de repères qui peuvent, elles, entraîner des différences majeures. En effet la perte de fond n'entraîne pas systématiquement une perte d'ensemble, puisque le système extrapole la profondeur afin de conserver les ensembles (on obtient un résultat) : la correction GPS est alors essentielle et permet de reconstituer des transects relativement complets, et de corriger les vecteurs vitesses obtenus. A défaut l'appareil perd son déplacement et son cap et les mesures se succèdent au même point (x,y), avec des vecteurs vitesses dans toutes les directions. Le suivi GPS est donc indispensable pour cet équipement (M9), au risque à défaut de disposer de valeurs effectivement calculées, mais fausses.

Au final, le suivi GPS s'est révélé de qualité car les sites étaient dégagés et bénéficiaient d'une bonne couverture satellite. La précision des GPS (y compris le portatif à Aizier) était suffisante compte tenu de la largeur des sections mesurées. L'influence, sur le tracé, des mouvements de fond a bien été compensée par le suivi GPS, lorsque les appareils en bénéficiaient. Cependant, ce suivi ne suffit pas toujours à assurer une bonne mesure : le suivi de fond et les mesures par les deux appareils sont restés problématiques sur le site d'Aizier lors de plusieurs traversées.

#### IV.4 LE BOUCHON VASEUX À L'ORIGINE DE LA PERTE DE FOND SUR LE SITE D'AZIER ?

La perte de fond conduit, soit à un échantillonnage très faible du débit mesuré (Rio Grande (RDI)), soit à une incertitude sur le fond extrapolé pour le M9 (SonTek), le fond étant alors linéairement extrapolé entre la dernière et la nouvelle valeur mesurée entre les deux points calculés par le GPS. Ces pertes de fond observées sur le site d'Aizier interviennent à partir de 11h (TU+1) ; elles semblent faire suite à l'apparition du bouchon vaseux, des fortes turbidités ayant été constatées en surface lors des mesures<sup>13</sup>.

L'analyse qualitative de la rétrodiffusion moyenne (dB) sur le site d'Aizier montre un changement de concentration et/ou de granulométrie qui apparaît d'abord en rive droite (9h11 TU+1, Rio Grande), puis se répartit en surface sur toute la section (9h57 TU+1), avant de manifester affecter progressivement toute la section (11h12 TU+1). A partir de 11h (TU+1), alors que la cote de la ligne d'eau est quasi maximale, on

<sup>13</sup> bouchon effectivement susceptible d'affecter le site d'Aizier (cf. [Guézennec, 1999], fig. 15, p. 31).

constate simultanément que les vitesses moyennes chutent en-dessous de 1 m/s. L'analyse des profils bathymétriques montre d'abord une perte de fond par la tête dédiée à la mesure de la profondeur sur le M9 (SonTek), travaillant pourtant à basse fréquence 500 kHz<sup>14</sup>. C'est semble-t-il lorsque les MES constitutives du bouchon vaseux commencent à se répartir sur l'ensemble de la section (décantation suite à la chute de la vitesse moyenne dans la direction principale de l'écoulement), que les appareils ne parviennent plus à capter le fond ou rejettent des ensembles<sup>15</sup> (trop forte dispersion des directions des vecteurs vitesses ?).

#### IV.5 PREMIÈRES PISTES D'AMÉLIORATION

A l'issue de cette campagne, nous pouvons mettre en évidence les pistes d'améliorations suivantes :

- en vue de réduire le potentiel impact de la mobilité du fond sur les mesures, il aurait été sans doute profitable de déployer aussi un GPS avec le Rio Grande (RDI) sur le site d'Heurteauville ;
- sur les étalonnages des différents appareils : un étalonnage du compas à réaliser sur le bateau et non sur la berge, en vue d'éviter un effet de rive (cf. M9 à Heurteauville), et à réaliser, de préférence, en amont de la campagne de mesures. Sur le site d'Aizier, le jour des mesures, plusieurs tentatives d'étalonnage du Rio Grande (RDI) se sont révélées infructueuses, elles conduisent à une incertitude supplémentaire sur les valeurs mesurées ;
- le déploiement de matériels travaillant à des fréquences suffisamment distinctes pour ne pas générer de potentielles interférences entre appareils ;
- une mesure en continu de la salinité qu'il aurait été nécessaire de déployer sur le site aval (Aizier) quand bien même celui-ci se situait, à priori, en limite de la remontée des eaux saumâtres : elle aurait permis de vérifier si cette hypothèse était effectivement vérifiée (absence de salinité significative d'une part, et/ou, à défaut, stabilité de la concentration correspondante, y compris sur l'ensemble de la colonne d'eau) ;
- sur le site d'Aizier, des prélèvements de MES avec caractérisation des concentrations et des distributions granulométriques auraient été utiles, en vue de suivre, une fois ces paramètres liés à la rétrodiffusion, via l'analyse de son évolution, la dynamique du bouchon vaseux.

#### V CONCLUSION

A la suite de cette campagne de mesures en estuaire, les principaux enseignements en matière de protocole de mesures de débits en estuaire apparaissent les suivants (cf. chapitres II.1, II.2, IV.1 et IV.5) :

- une importante préparation, passant par la réalisation d'une journée de premiers tests, en vue d'étudier l'ensemble des sites, les horaires des BM et PM et la durée prévue des mesures, les conditions de mise à l'eau, et de procéder, si possible, avant les mesures, à l'étalonnage préalable des appareils sur les bateaux (il n'est guère envisageable de reporter les mesures au regard de l'organisation nécessaire !) ;
- le déploiement systématique de deux appareils par embarcation travaillant à des fréquences distinctes (cf. forte variation des débits interdisant de reproduire la mesure à un autre instant t) ;
- une durée des mesures nécessitant un relais et un dimensionnement adaptés des équipes, et de réelles qualités de pilotage associées à des bateaux offrant la puissance nécessaire (cf. importante courantologie, et fort trafic maritime dans le cas de la Seine) ;
- des appareils équipés d'un GPS sur les secteurs à potentiel fond mobile (un GPS portatif pourra suffire pour de larges sections de mesure), d'une mesure en continu de la salinité sur les secteurs concernés par la potentielle remontée des eaux saumâtres, et d'une mesure de turbidité étalonnée avec des prélèvements de MES sur les sites potentiellement concernés par un bouchon vaseux.

Les mesures réalisées ont aussi permis de caractériser le fonctionnement fluvio-maritime de l'estuaire sur trois sites distincts pour une même situation « type » présentant un faible débit de Seine et de forts coefficients de marée. On notera que les maximum de débits mesurés au flot sur les 3 sites présentent au final des ordres de grandeurs proches de ceux mentionnés par [Laval, 1955]. Enfin, l'important corpus de

<sup>14</sup> dès 9h03 TU+1, puis reprise des mesures sur les profils suivants, jusqu'à une nouvelle perte à 11h12 TU+1.

<sup>15</sup> nous n'en avons pas fait l'analyse détaillée (en particulier leurs distributions verticales).

mesures rassemblé, mis à disposition de collectivités ou d'organismes de recherches, pourra être exploité en vue du calage de modèles hydrauliques, de courbes de tarage à double échelle (cf. [Camenen B. et al., 2017]), ou de l'analyse de la distribution des champs de vitesses et des concentrations en MES et de leur évolution sur un cycle de marée (analyses non réalisées ici).

## VI REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement pour cet article l'ensemble des équipes ayant participé aux mesures réalisées le 29 septembre 2015 : J. Diribarne, N. Duvinage, C. Dycke, et É. Jacob de l'Unité Hydrométrie et Réseaux de Mesures de la DRIEE Île-de-France, E. Bourban, F. Garnier, S. Kopp, et A. Séguy de l'Unité Bathymétrie et Sédimentologie du LR de Blois (CEREMA, DTer NC), B. Alexandre, B. Boutet, L. Decaëns, A. Demarquet, C. Flouzat, C. Girard, A. Hébrard, S. Hérouin, G. Lemerrier, G. Morel, D. Nzussing, S. Piney, E. Raimbault, et C. Zaniolo des Unités Hydrométrie et Hydrologie et du SPC SACN de la DREAL Normandie.

## VII RÉFÉRENCES

Camenen B., Dramais G., Le Coz J., Ho T. D., Gratiot N., Piney S. (2017). - Estimation d'une courbe de tarage hauteur-débit pour une rivière influencée par la marée. 7 p. ;

GIP Seine Aval (2012). - La marée dans l'estuaire de la Seine. Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6 p. ;

GIP Seine Aval (2013). - Contextes climatique, morphologique & hydro-sédimentaire : la salinité dans l'estuaire de la Seine, 6 p. ;

Guézennec L. (1999). - Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal : l'exemple de l'estuaire de la Seine (France), thèse de doctorat de l'Université de Rouen, 254 p. ;

Hauet A., Le Coz J., Sevrez D., Dramais G., Hénault F., Perret C., Pierrefeu G., Pobanz K., Thollet F. (2012). - Intercomparaison ADCP sur le canal de La Gentille (12 - 16/09/2011) ;

Laval D. (1955). - Mesures de débits faites en Seine-Maritime lors de la crue de janvier 1955, combinaison de la crue et de la marée, La Houille Blanche, 1955, 7 p..