

Analyse de 10 ans de mesures continues de turbidité dans les sections fluviales de l'estuaire de la Gironde

Isabel Jalón-Rojas¹, Sabine Schmidt², Aldo Sottolichio³

Résumé

Les estuaires macrotidaux comme la Gironde se caractérisent par la formation d'une zone de turbidité maximale (ZTM) qui influence le transport et le dépôt des sédiments fins, l'envasement des chenaux et la qualité de l'eau (consommation d'oxygène dissous, accumulation de polluants). La compréhension et la prédiction de la dynamique de la ZTM est donc un enjeu scientifique important et un besoin pour optimiser la gestion de ces eaux de transition. La dynamique sédimentaire estuarienne est complexe et fortement variable à plusieurs échelles de temps significatives (de quelques minutes à plusieurs années). L'objectif de ce travail est l'analyse détaillée de cette dynamique dans la section fluviale de l'estuaire de la Gironde à partir des séries continues de turbidité enregistrées depuis 10 ans par le réseau de surveillance MAGEST. Le réseau MAGEST, assez précurseur en estuaires, compte 4 stations dont 3 sont situées dans les sections tidales. Nous présentons l'intérêt d'une telle base de mesures à haute fréquence et à long terme pour détailler l'influence de la marée et du débit fluvial sur les variations de turbidité aux échelles de temps intratidale, hebdomadaire, saisonnière et multi-annuelle. La persistance et la turbidité de la ZTM dans les sections fluviales présentent une forte variation interannuelle en fonction des conditions hydrologiques. L'application de l'analyse spectrale de Lomb-Scargle a permis d'estimer l'importance des différents forçages (marée, débit fluvial, turbulence) sur la variabilité de la turbidité pour chaque station du réseau MAGEST.

Introduction

Le système fluvio-estuarien de la Gironde (France Sud-Ouest, Fig. 1) est un estuaire macrotidal, très turbide, dont la partie amont consiste en deux fleuves tidaux, la Garonne et la Dordogne. L'onde de marée de type semi-diurne s'y propage jusqu'à environ 180 km de l'embouchure⁴, à La Réole et Pessac (Fig. 1). Lors de sa propagation vers l'amont, l'onde de marée devient asymétrique (phase de flot plus rapide mais plus courte que celle du jusant) et son amplitude augmente⁵ pour atteindre un maximum à 120 km de l'embouchure avant de s'atténuer dans les sections fluviales, plus étroites.

¹ UMR5805 EPOC, Université de Bordeaux, Pessac - FRANCE, isabel.jalon-rojas@u-bordeaux.fr.

² UMR5805 EPOC, CNRS, Pessac - FRANCE, sabine.schmidt@u-bordeaux.fr.

³ UMR5805 EPOC, Université de Bordeaux, Pessac - FRANCE, aldo.sottolichio@u-bordeaux.fr.

⁴ SOTTOLICHIO A., & CASTAING P., « A synthesis on seasonal dynamics of highly-concentrated structures in the Gironde estuary », Comptes Rendus de l'Académie de Sciences - Serie IIa: Sciences de La Terre et Des Planetes, n° 329, 1999, p. 795-800.

⁵ ALLEN G.P., SAUZAY G., & CASTAING P., « Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde Estuary, France », Estuarine Processes, 1977, p. 63-81.

Comme dans de nombreux estuaires macrotidaux^{6,7,8}, des quantités importantes de sédiments fins sont érodées, transportées et déposées pendant les cycles de marée, et des régions très concentrées en matières en suspension (MES) se forment. Le principal mécanisme qui piège les particules dans ces zones de turbidité maximum (ZTM, aussi appelées *bouchons vaseux*) est le transport net de MES vers l'amont dû à l'asymétrie de la marée (« tidal pumping⁹ »). La ZTM joue un rôle important dans les processus de sédimentation qui peuvent conduire à l'envasement des chenaux¹⁰, affectant les profondeurs de navigation. Une meilleure connaissance de la variabilité de la turbidité à toutes les échelles de temps significatives est essentielle pour mieux comprendre les processus hydro-sédimentaires, mais aussi pour répondre à des objectifs de gestion, tels que le suivi de la qualité d'eau des estuaires (DCE), ou encore pour prévoir l'impact d'aménagements futurs dans l'estuaire et dans son bassin versant. De plus, dans l'estuaire de la Gironde, plusieurs études ont révélé l'influence de la ZTM sur des processus biogéochimiques comme la désoxygénation de l'eau¹¹, la limitation des taux d'échange de gaz à l'interface air/eau¹² ou l'âge moyen des particules¹³.

⁶ GRABEMANN I., UNCLES R.J., KRAUSE G., & STEPHENS J. A., « Behaviour of Turbidity Maxima in the Tamar (U.K.) and Weser (F.R.G.) Estuaries », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 45, 1997, p. 235-246.

⁷ GUÉZENNEC L., LAFITE R., DUPONT J.P., MEYER R., & BOUST D. « Hydrodynamics of Suspended Particulate Matter in the Tidal Freshwater Zone of a Macrotidal Estuary (The Seine Estuary, France) », *Estuaries*, n° 22(3), 1999, p. 717-727.

⁸ UNCLES, R.J., STEPHENS, J.A., & LAW, D.J., « Turbidity maximum in the macrotidal, highly turbid Humber Estuary, UK: Flocs, fluid mud, stationary suspensions and tidal bores. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* », n° 67(1-2), 2006, p. 30-52.

⁹ ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULLET P., DU PENHOAT Y. & DE GRANDPRE C., « Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries », *Sedimentary Geology*, n° 26, 1980, p. 69-90.

¹⁰ DE-JONGE V.N., SCHUTTELAARS H.M., VAN-BEUSEKOM J.E.E., TALKE S.A., & DE-SWART H.E., « The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 139, 2014, p. 46-59.

¹¹ LANOUX A., ETCHEBER H., SCHMIDT S., SOTTOLICHIO A., CHABAUD G., RICHARD M., & ABRIL G., « Factors contributing to hypoxia in a highly turbid, macrotidal estuary (the Gironde, France) », *Environmental Science: Processes & Impacts*, n° 15(3), 2013, p. 585-595.

¹² ABRIL G., COMMARIEU M.V., SOTTOLICHIO A., BRETTEL P., & GUÉRIN F., « Turbidity limits gas exchange in a large macrotidal estuary », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 83, 2009, p. 342-348.

¹³ SAARI H.-K., SCHMIDT S., CASTAING P., BLANC G., SAUTOUR B., MASSON O., & COCHRAN J.K., « The particulate ⁷Be/²¹⁰Pb_{xs} and ²³⁴Th/²¹⁰Pb_{xs} activity ratios as tracers for tidal-to-seasonal particle dynamics in the Gironde estuary (France): implications for the budget of particle-associated contaminants », *The Science of the Total Environment*, n° 408, 2010, p. 4784-4794.

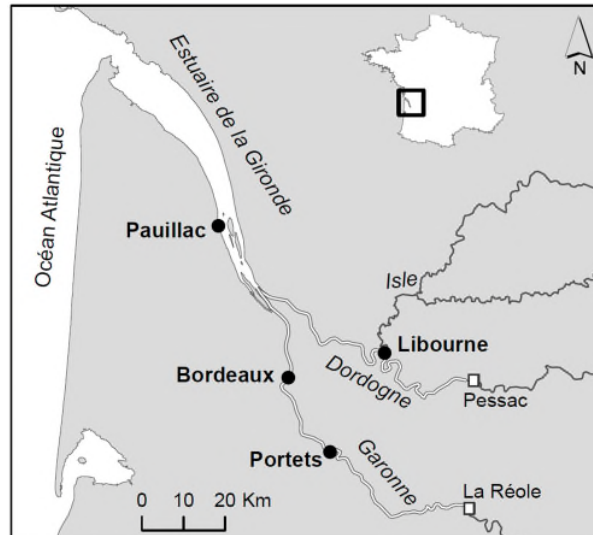


Figure 1. Localisation de la zone d'étude : le système fluvio-estuarien de la Gironde avec ses principaux tributaires (la Garonne et la Dordogne). Les cercles noirs montrent les stations de surveillance MAGEST et les carrés blancs signalent les stations hydrométriques.

Les investigations antérieures sur l'estuaire de la Gironde ont permis de comprendre les mécanismes basiques de formation de la ZTM et ses dynamiques, essentiellement dans l'estuaire aval¹⁴¹⁵¹⁶. La partie amont est moins documentée. Or, pour aborder la compréhension de l'évolution à long-terme des dynamiques sédimentaires, il est aussi nécessaire de connaître la dynamique de la ZTM dans la zone fluviale. La variabilité à long terme et les événements de basse fréquence (typiquement les crues) sont souvent difficiles à quantifier en raison du manque de données fiables sur des périodes suffisamment longues. Avec le réseau MAGEST (MAREL GIRONDE ESTUAIRE) qui dispose de stations de mesures en continu et en temps réel depuis 2004, il est maintenant envisageable de progresser sur ces questions. Ce travail présente ainsi une base de données de 10 années de mesures de turbidité à haute fréquence pour analyser et discuter les dynamiques sédimentaires à différentes échelles de temps dans l'estuaire fluvial de la Gironde (Garonne et Dordogne tidales). Cet exemple illustre l'intérêt d'une telle surveillance continue de turbidité à long-terme dans les environnements estuariens.

Méthodologie

Le réseau MAGEST

¹⁴ ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULET P., DU PENHOAT Y. & DE GRANDPRE C., « Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries », *Sedimentary Geology*, 1980, n° 26, p. 69-90.

¹⁵ CASTAING P., *Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes: cas de la Gironde*, Thèse Université de Bordeaux, 1981, 179 pp.

¹⁶ SOTTOLICHIO A., & CASTAING P., « A synthesis on seasonal dynamics of highly-concentrated structures in the Gironde estuary », *Comptes Rendus de l'Académie de Sciences - Serie IIa: Sciences de La Terre et Des Planètes*, n° 329, 1999, p. 795-800.

L'estuaire de la Gironde dispose d'un réseau de surveillance automatisé de mesures à haute fréquence, appelé MAGEST, pour le suivi en continu de la qualité de l'eau. Ce réseau compte 4 stations automatiques (Fig. 1) : Pauillac (depuis le 15 juin 2004), Bordeaux (depuis le 1 mars 2005), Libourne (depuis le 16 novembre 2004) et Portets (16 novembre 2004 au 11 janvier 2012). Ces systèmes mesurent l'oxygène dissous, la température, la turbidité et la salinité toutes les 10 minutes à 1 m sous la surface libre. Les stations de Bordeaux, de Portets et de Libourne mesurent également la hauteur d'eau du site. La sonde de turbidité (Endress and Hauser, CUS31-W2A) mesure des valeurs entre 0 et 9999 NTU avec une précision de 10%. La valeur de saturation du capteur, 9999 NTU, correspond à environ 6 g L^{-1} d'après des calibrations très récentes menées sur des particules prélevées à chacun des sites¹⁷. Pour une description complète du programme de surveillance, des caractéristiques techniques du système et pour des exemples des tendances des paramètres mesurés, le lecteur pourra se référer à Etcheber et al.¹⁸ et Schmidt et al.¹⁹.

De plus, l'estuaire dispose de marégraphes gérés par le Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB) qui mesurent toutes les 5 minutes le niveau de la marée à Bordeaux et à Pauillac. Les débits fluviaux de la Garonne et de la Dordogne sont mesurés aux stations hydrométriques de La Réole (source SPC) et de Pessac (source DREAL Aquitaine) respectivement, avec un pas de temps variable entre 1 et 24 heures.

Le traitement des données

La première étape indispensable à l'exploitation des données de turbidité est le tri et le nettoyage de la base de données brutes enregistrées par les quatre stations MAGEST. Une fois les mesures rapatriées sur le serveur de gestion, il y a deux niveaux de contrôle des données : un contrôle automatique, selon des gammes de valeurs déterminées, et un contrôle visuel. Ainsi, à chaque donnée est associé un code de qualité qui comprend 6 classes : (0) non qualifié ; (1) bon ; (2) hors statistiques ; (3) douteux ; (4) faux ; (9) manquant. Toutefois il est nécessaire de vérifier la cohérence des données, notamment pour la valeur de turbidité de 9999 NTU. En effet cette valeur correspond à la valeur de saturation, mais aussi à la valeur du capteur quand il est en défaut. Afin d'identifier et de supprimer les valeurs fausses, la première étape a consisté à représenter les données et leur code de qualité. La figure 2.A montre un exemple de ce type de représentation pour l'année 2006 à la station de Libourne. Il est visible sur cette figure que la méthode semi-automatique de validation identifie la plupart des données fausses. Cependant il ressort une apparente surestimation de données qualifiées douteuses ou fausses quand la sonde sature ou quand il se produit un changement brusque de tendance. Outre les codes qualité, un critère additionnel a été développé pour

¹⁷ SCHMIDT S., OUMAR L., COSSON B., DERRIENNIC H., LEBLEU P., 6 BERTIER C., « Relation entre la turbidité et la charge en matière en suspension dans l'estuaire de la Gironde : impact de la taille des particules sur l'estimation de la concentration particulaire », Colloque Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance d'environnement marin, 2014.

¹⁸ ETCHEBER H., SCHMIDT S., SOTTOLICHIO A., MANEUX A., CHABAUD G., ESCALIER J.-M., WENNEKES H., DERRIENNIC H., SCHMELTZ M., QUÉMÉNER L., REPECAUD M., WOERTHER P., & CASTAING P., « Monitoring water quality in estuarine environments : lessons from the MAGEST monitoring program in the Gironde fluvial-estuarine system », Hydrology and Earth System Sciences, n° 15, 2011, p. 831-840.

¹⁹ SCHMIDT S., ETCHEBER H., SOTTOLICHIO S., CASTAING P., « Le réseau MAGEST : bilan de 10 ans de suivi haute-fréquence de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde », dans Mesures haute résolution dans l'environnement marin côtier, Presses du CNRS, 2015.

tester si la valeur de 9999 NTU correspond à une erreur de la mesure ou bien à la saturation du capteur par une élévation de turbidité, auquel cas la donnée est à conserver. Le principe est de considérer comme fausses les valeurs égales à 9999 NTU lorsque les trois valeurs précédentes et suivantes sont inférieures à 1000 NTU (ligne bleue sur la figure 2.A), c'est-à-dire quand il n'y a pas une augmentation progressive des valeurs jusqu'à 9999 NTU. La figure 2.B montre la base de données propre, en trait noir, et les valeurs 9999 NTU identifiées comme fausses (en gris) par ce nouveau critère. Cette méthode s'est avérée très efficace et rapide pour le nettoyage de la base de données de turbidité.

Cette étape a conduit à la suppression de 7,65%, 8,77%, 13,91% et 20,61% des données enregistrées par les stations de Pauillac, Bordeaux, Portets et Libourne, respectivement. Ainsi, du 1 janvier 2005 au 30 juin 2014, la base de données de turbidité du réseau MAGEST compte 1.223.486 valeurs valides. Cela correspond à un taux de fonctionnement correct de 57%, 71%, 70% et 70% du temps respectivement à Pauillac, Bordeaux, Portets et Libourne.

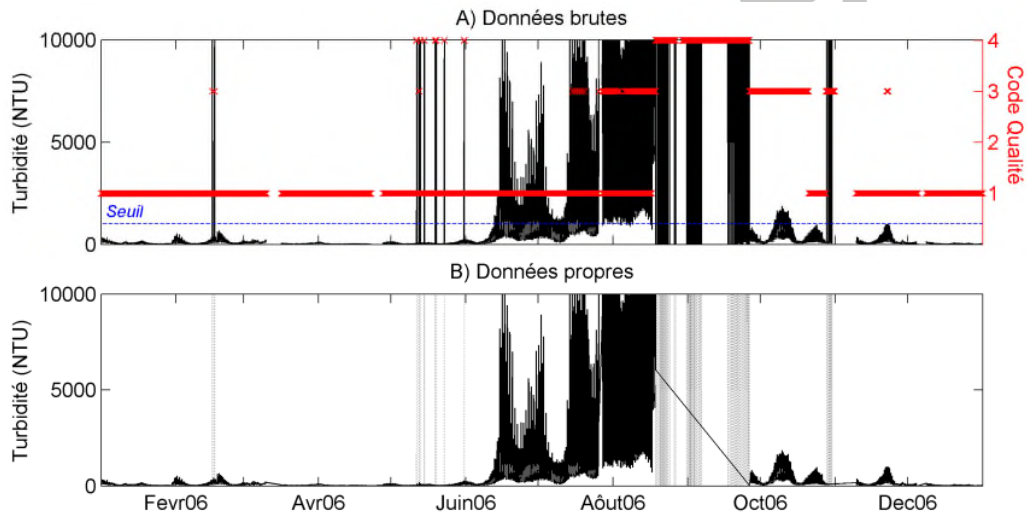


Figure 2. Exemple d'identification des données fausses dans l'étape de tri et de nettoyage des données de turbidité à Libourne pour l'année 2006 : (A) Série temporelle des données brutes avec leur code de qualité (1=bon, 2=hors statistiques, 3=douteux, 4=faux). La ligne bleue en pointillés représente le seuil utilisé dans le critère d'identification des valeurs 9999 NTU fausses ; (B) Série temporelle propre, en trait noir ; les données fausses supprimées sont figurées en gris.

Une fois la base de données propre, la turbidité a été analysée en fonction des débits fluviaux et des hauteurs d'eau à différentes échelles de temps. Pour mieux cerner la variabilité subtidale, nous avons calculé les moyennes de turbidité pour chaque cycle de marée semi-diurne (moyenne tidale), ainsi que le marnage correspondant. Pour éviter des valeurs biaisées, les moyennes ont été calculées uniquement quand les valeurs brutes enregistrées couvraient au moins 70% du cycle de marée. Comme les directives de gestion reposent souvent sur des moyennes journalières, les moyennes tidales (12,5h) et journalières (24h) ont été comparées (figure 3). Il ressort une très bonne correspondance entre les deux calculs pour la turbidité ($R^2=0.993$), ce qui valide

l'utilisation de la moyenne journalière, plus simple à calculer, pour analyser la variabilité subtidale.

La présence de la ZTM a été définie par une moyenne tidale de turbidité supérieure à 1000 NTU ($\sim 1 \text{ g L}^{-1}$)²⁰. Des analyses spectrales dont le périodogramme de Lomb-Scargle²¹ ont été appliquées pour identifier les fréquences les plus significatives des séries temporelles de turbidité de chaque station et les différents forçages qui induisent la variabilité. Nous avons retenu l'algorithme écrit sur MATLAB par Brett Shoelson (<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/993-lombscargle-m>) sur la base de Press et al.²². Ce périodogramme est dérivé de l'analyse de Fourier classique, mais présente l'avantage d'être applicable à des données non-équidistantes, et donc aux séries temporelles hautes-fréquentes avec des données manquantes. Cette méthode permet aussi d'identifier quelles fréquences sont statistiquement significatives.

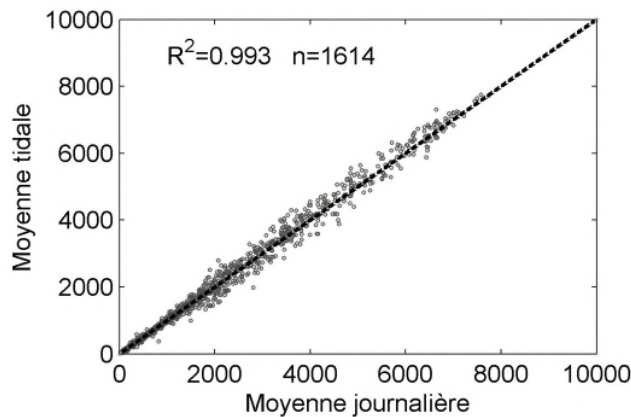


Figure 3. Comparaison des moyennes tidale et journalière de turbidité pour la station de Bordeaux.

Résultats et Discussion

La turbidité présente une variabilité complexe et montre une grande gamme de valeurs aussi bien dans la Garonne que dans la Dordogne : de 10 NTU en saison humide, quand la ZTM est dans l'estuaire aval, jusqu'à 9999 NTU en étiage, quand la ZTM remonte vers l'amont. La figure 4.A présente la série temporelle de turbidité de Bordeaux depuis 2005, pour illustrer les dynamiques de MES aux différentes échelles temporelles :

- i) *Variabilité à court terme* : Les mesures à haute fréquence détaillent l'évolution de la turbidité liée aux cycles de marée et permettent d'enregistrer le signal de turbidité au cours des crues, souvent bref et limité à quelques jours. La figure 4.B.1 montre un exemple de mesures continues

²⁰ ALLEN G.P., SAUZAY G., & CASTAING P., « Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde Estuary, France », *Estuarine Processes*, 1977, p. 63-81.

²¹ SCARGLE J.D., « Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data », *Astrophys J*, n° 273, 1982, p. R1540-1549.

²² PRESS W., TEUKOLSKY S., VETTERLING W., & FLANNERY B. « Numerical recipes in C: the art of scientific computing », Cambridge University Press, 1992, 1018 pp.

pendant une période d'étiage (débit $< 120 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) quand la ZTM est présente à Bordeaux. L'effet des échanges eau-sédiment au cours d'un cycle de marée sont illustrés : décantation des particules autour des étales de marée (haute et basse) quand les courants sont faibles, forte remise en suspension et transport des sédiments par les courants de marée pendant le flot et le jusant. Ces schémas sont identiques à ceux préalablement détaillés dans l'estuaire aval²³.

La figure 4.B.2 montre le signal de turbidité associé à une crue printanière en 2007 (de $480 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 27 mai, le débit culmine à $1730 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 28 et diminue jusqu'à $1070 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à l'issue du 29 mai.). Dans cet exemple, la turbidité est minimale pendant le flot, quand les courants de marée sont opposés au flux du fleuve, et atteint le maximum entre mi-jusant et marée basse. D'autres événements de crue présentent un pic de turbidité à mi-flot, suggérant une remise en suspension locale de sédiments déposés et donc la présence de vase dans la section fluviale. L'analyse systématique de tous les événements de crue enregistrés à Bordeaux montre que la turbidité est un indicateur de la présence de vase dans l'estuaire amont²⁴.

- ii) *Variabilité hebdomadaire* : Le marnage minimal, moyen et maximal mesuré à Bordeaux pour la période janvier 2005–juin 2014 est de 2,6, 4,9 et 6,6 m respectivement. La variation du marnage lors d'un cycle vives eaux-mortes eaux induit des changements dans la vitesse du courant et donc dans la contrainte de cisaillement sur le fond. Pendant les vives-eaux, les contraintes de cisaillement sont plus fortes, ce qui favorise une plus forte remise en suspension des sédiments et donc des turbidités élevées²⁵. La figure 4.C illustre cette dynamique en comparant l'évolution de la turbidité et du marnage pendant août 2009 : le pic de turbidité associé à la resuspension était de 3750 NTU pour le marnage le plus faible (3,7 m), contre 9999 NTU pour les vives-eaux (marnages entre 5 et 6 m). La turbidité présente des valeurs plus grandes en déchet qu'en revif, ce qui indique la consolidation des sédiments déposés pendant les mortes-eaux²⁶, quand les vitesses de courant, et donc la resuspension, sont plus faibles.

²³ ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULET P., DU PENHOAT Y. & DE GRANDPRE C., « Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries », *Sedimentary Geology*, 1980, n° 26, p. 69-90.

²⁴ JALÓN-ROJAS I., SCHMIDT S., & SOTTOLICHIO A., « Turbidity in the fluvial section of the Gironde Estuary (France) based on 10-year continuous monitoring : sensitivity to hydrological conditions », pour être soumis à *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, en préparation.

²⁵ CORMAULT, P. « Determination experiment du debit solide d'érosion des sediments fins cohésifs », IAHR XIV Congress, 1971.

²⁶ GRABEMANN I., UNCLES R.J., KRAUSE G., & STEPHENS J. A., « Behaviour of Turbidity Maxima in the Tamar (U.K.) and Weser (F.R.G.) Estuaries », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 45, 1997, p. 235-246.

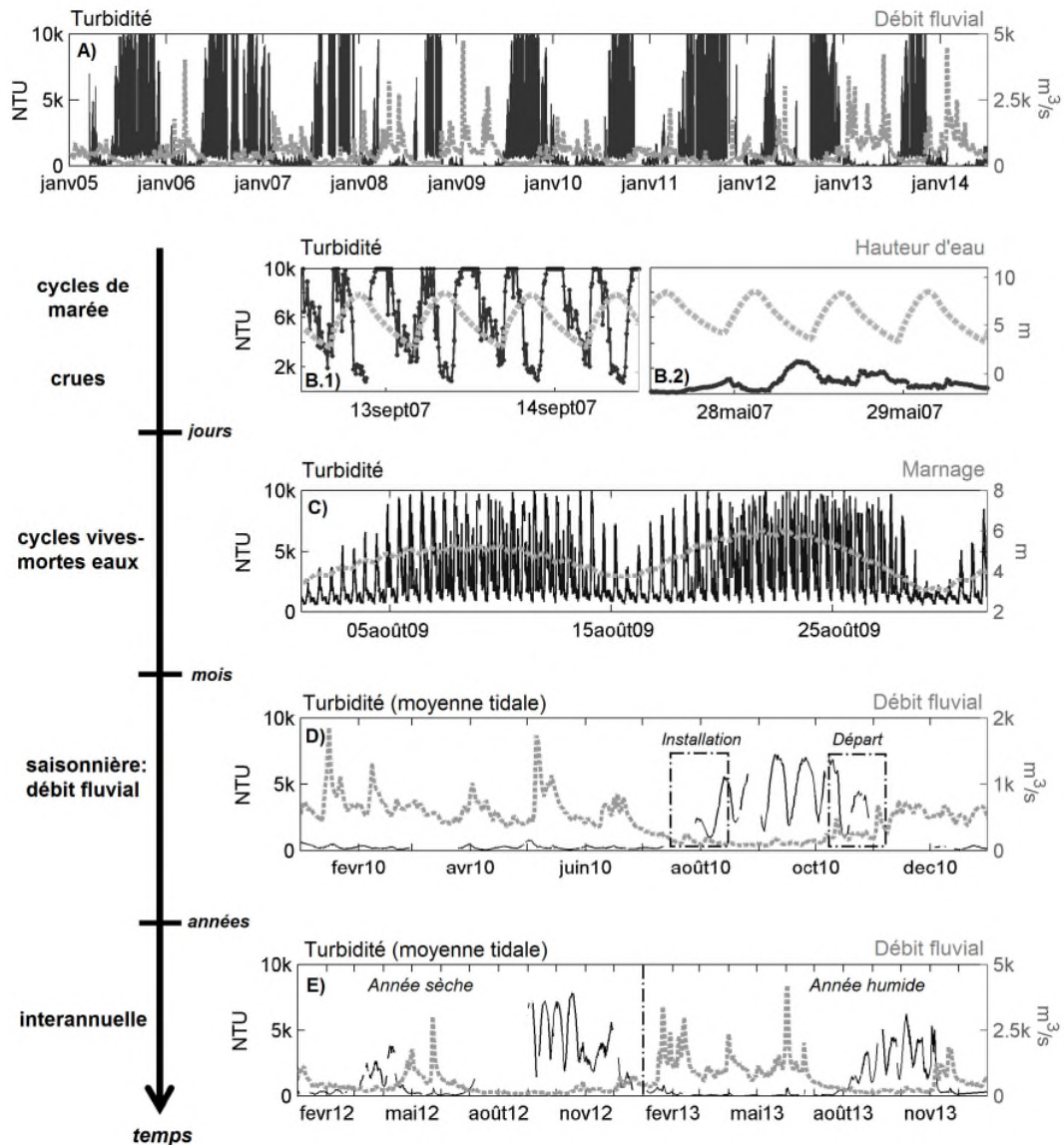


Figure 4. (A) Série temporelle de turbidité à Bordeaux (pas de temps de 10 min) et de débit de la Garonne à La Réole. Différentes échelles de temps sont détaillées : (B) valeurs instantanées de turbidité et d'hauteur d'eau pendant 48h d'étiage (B.1 : débit < $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ou de crue (B.2 Débit_{pic} = $1730 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); (C) impact du marnage sur la moyenne tidale de la turbidité; (D) lien entre débit fluvial et de turbidité (moyenne tidale); (E) évolution de la turbidité (moyenne tidale) et débit fluvial entre une année sèche (2012) et une année humide (2013).

- iii) *Variabilité saisonnière* : L'observation des cycles annuels de turbidité et de débit fluvial (figure 4.A) met en évidence la relation étroite entre ces deux variables dans l'estuaire fluvial. La figure 4.D détaille cette relation pour l'année 2010 : la ZTM se déplace vers l'amont à mesure que le débit fluvial diminue et s'installe, en général, dans les sections fluviales pendant l'été (moyennes tidales de turbidité entre 1000 et 8000 NTU). Avec les

premières crues automnales, voire hivernales, la ZTM se déplace vers l'aval. Pendant les périodes de forts débits, la turbidité est minimale en amont. La comparaison des turbidités au cours des périodes d'installation et d'expulsion de la ZTM montre que, pour une même valeur de débit, la turbidité est systématiquement plus élevée pendant l'expulsion. Ces cycles d'hystérésis lors des périodes de transition de la ZTM suggèrent la persistance d'un dépôt de sédiment piégé dans les sections fluviales après le passage de la ZTM²⁷.

- iv) *Variabilité interannuelle* : Un des principaux enjeux de la dynamique sédimentaire des estuaires est la variabilité aux échelles temporelles longues pour mieux comprendre l'évolution morphologique des fleuves tidaux ou la qualité de l'eau. Il y a une forte variabilité interannuelle de la durée de la présence et de la concentration de la ZTM dans la Garonne tidale à Bordeaux (figure 4.A), même si la saturation de la sonde ne permet pas d'accéder aux valeurs maximales de turbidité. La figure 4.E compare l'évolution de la moyenne tidale de turbidité avec le débit fluvial pendant les années 2012 (sèche) et 2013 (humide) et le Tableau 1 récapitule la durée et la turbidité moyenne maximale enregistrées par la station MAGEST. Les années caractérisées par des débits élevés et des étiages courts, comme 2008 ou 2013, sont défavorables à une présence prolongée de la ZTM en amont à la différence des années sèches comme 2011 ou 2012. Par exemple en 2012 la ZTM a persisté à Bordeaux pendant 168 jours et atteint une turbidité maximale de 7665 NTU, contre 93 jours et 5828 NTU en 2013. Une explication serait que plus les crues sont nombreuses et fortes, plus importantes seront les quantités de sédiments expulsées vers l'aval, voire la région côtière. Pour les années 2005, 2008, 2011 et 2012, la ZTM est aussi apparue en hiver à Bordeaux durant des périodes de débit faible. La figure 4.E illustre clairement cette variabilité interannuelle de turbidité avec notamment la présence hivernale de la ZTM en mars 2012, qui a été la plus longue (39 jours), et la plus turbide (3779 NTU), depuis le début du suivi haute-fréquence.

²⁷ JALÓN-ROJAS I., SCHMIDT S., & SOTTOLICHIO A., « Turbidity in the fluvial section of the Gironde Estuary (France) based on 10-year continuous monitoring : sensitivity to hydrological conditions », pour être soumis à Hydrol. Earth Syst. Sci., en préparation.

Année	Durée de la ZTM (jours)		T _{max} de la ZTM (NTU)	
	hivernale	Estivale	hivernale	estivale
2005	17	170	1451	6534
2006	-	239	-	6639
2007	-	160	-	7629
2008	18	100	3442	5679
2009	-	145	-	5996
2010	-	106	-	7223
2011	9	250	1908	7665
2012	39	168	3778	7538
2013	-	93	-	5828

Table 1. Durée et turbidité maximale (moyenne tidale) de la ZTM hivernale et estivale à Bordeaux par année de suivi haute-fréquence MAGEST.

L'analyse spectrale permet d'évaluer les échelles temporelles significatives d'une série de données ; c'est aussi une méthode efficace pour comparer les échelles de variation entre différents sites. La figure 5 représente les périodogrammes de turbidité de chaque station en mode log-log, calculés à partir de la totalité des données continues. Les forçages déterministes sont associés à cinq pics principaux d'énergie dont les périodes sont : (a) 363 jours, (b) 14,8 jours, (c) 12,42 heures, (d) 6,21 heures, et (e) 4,09 heures. La période (a) est associée à la présence saisonnière du bouchon vaseux, la période (b) correspond aux cycles vives eaux - mortes eaux, et les cycles (c), (d) et (e) coïncident avec les périodes caractéristiques de la marée semi-diurne. Cette analyse confirme la forte interdépendance entre la turbidité, les cycles de marée et le débit fluvial. De plus, il existe une dynamique stochastique avec un régime qui suit une loi de puissance ($E(f) \sim f^\beta$) caractérisée par une pente (figure 5) proche de celle de la turbulence ($\beta=5/3$)^{28,29}.

²⁸ SCHMITT F. G., « Relating Lagrangian passive scalar scaling exponents to Eulerian scaling exponents in turbulence », *European Physical Journal B*, 2008, n° 48, p. 129-137.

²⁹ SCHMITT F.G., DUR G., SOUSSI S., & BRIZARD-ZONGO S., « Statistical properties of turbidity, oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France) », *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2008, n° 387(26), p. 6613-6623.

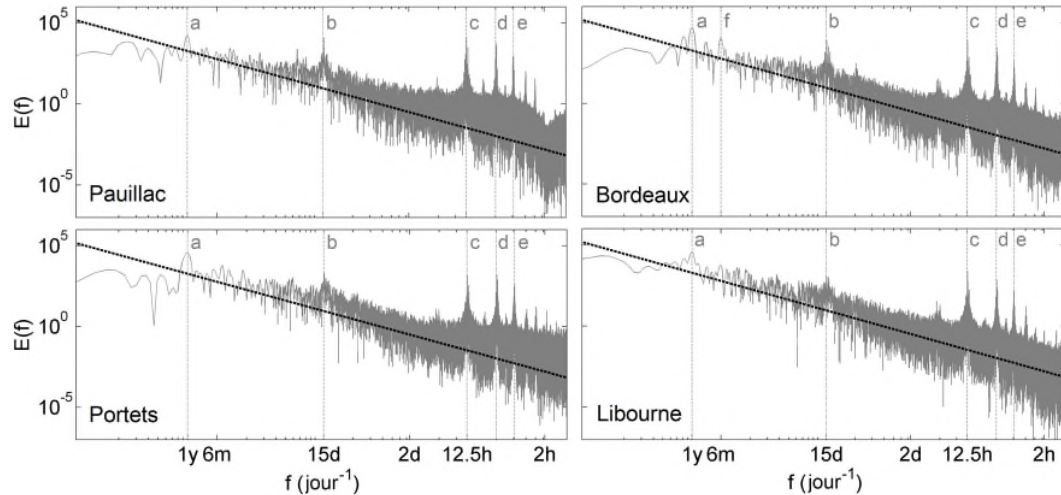


Figure 5. Périodogrammes de turbidité en représentation log-log des stations MAGEST. La ligne en pointillés indique la loi de puissance de la turbulence : $E(f) \sim f^{-5/3}$.

Même si les fréquences les plus significatives et leurs forçages associés sont communs aux quatre stations, il existe de différences dans l'importance relative de chaque pic d'énergie. Le pic d'énergie associé à la présence saisonnière du bouchon vaseux est bien plus faible à la station Pauillac dans l'estuaire central, par rapport aux stations fluviales. Cela tient au fait que, dans cette section, il existe une ZTM quasi permanente qui coïncide avec une zone de fort piégeage de vase³⁰. Plus la station est en amont, plus les pics associés à la marée sont petits, en particulier celui associé aux cycles vives eaux-mortes eaux. Enfin, notons qu'à Bordeaux un pic d'énergie modeste (f , 6 mois) pourrait correspondre à la ZTM hivernale.

Conclusions et Perspectives

La mesure continue à long terme de la turbidité fournit des informations détaillées sur le fonctionnement de la zone de turbidité maximum (ZTM) dans l'estuaire fluvial de la Gironde. Le jeu de données haute-fréquence permet de documenter et d'analyser la dynamique à court terme, mais aussi l'effet des événements de basse fréquence, associés aux changements hydrologiques à long-terme et aux événements de crue. Les sédiments en suspension dans la ZTM décrivent un cycle de dépôt-mise en suspension-transport, similaire à celui précédemment décrit par Allen et al.³¹ dans l'estuaire aval. Au cours des événements de crue, le transport depuis l'amont peut être supérieur à la resuspension locale en fonction de la quantité relative des sédiments déposés sur le lit et transportés par le fleuve. Ainsi, le mode de variation de la turbidité lors de ces

³⁰ SOTTOLICHIO A., & CASTAING P., « A synthesis on seasonal dynamics of highly-concentrated structures in the Gironde estuary », Comptes Rendus de l'Académie de Sciences - Serie IIa: Sciences de La Terre et Des Planetes, n° 329, 1999, p. 795-800.

³¹ ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULET P., DU PENHOAT Y. & DE GRANDPRE C., « Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries », Sedimentary Geology, 1980, n° 26, p. 69-90.

événements peut être un indicateur du stock de vase estuarienne remontée avec le bouchon vaseux et piégée dans les fleuves tidaux. Sur une échelle de temps hebdomadaire, il existe une variabilité prononcée de la turbidité sous l'effet des cycles vives-eaux–mortes-eaux qui modulent l'intensité de la remise en suspension de sédiments. A l'échelle de temps saisonnière, la turbidité est fortement affectée par les changements de débit, qui déplacent la ZTM vers l'amont lors des baisses et vice-versa. A l'échelle pluri-annuelle, il existe une variabilité de la durée de présence et de la concentration de la ZTM, associée au régime des fleuves. La pénurie de crues pendant l'hiver et le printemps limite l'expulsion des sédiments vers l'aval. Ceci, ajouté aux longues périodes d'étiage, conduit à des ZTM très concentrées avec une présence dans la Garonne fluviale pouvant se prolonger jusqu'à 70% de l'année. Pendant l'hiver, des débits fluviaux faibles conduisent à la remontée de la ZTM avant même l'arrivée de l'étiage estival, bouleversant les schémas saisonniers typiques.

L'analyse spectrale de la turbidité, à un stade préliminaire, confirme les fréquences de variabilité significatives. Elle montre une influence moindre de la marée bihebdomadaire pour les stations fluviales, et du débit fluvial pour la station centrale. Cette analyse se poursuivra en considérant des périodes hydrologiquement différentes, l'étude de l'évolution du spectre au cours du temps à travers l'analyse d'ondelettes ou l'analyse spectrale singulière qui a l'avantage d'estimer le pourcentage de variabilité expliqué par chaque variable.

Il est important de souligner que le réseau fournit des mesures fixes, et à une seule profondeur. Le jeu de données est donc limité spatialement. Pour compléter la description des schémas de turbidité dans l'estuaire amont, il sera nécessaire d'examiner la représentativité des mesures des stations automatiques dans la section transversale et de connaître la turbidité sur toute la colonne d'eau. Pour cela, 8 campagnes de mesure ont été réalisées d'avril à novembre 2014 pour mesurer des profils verticaux de turbidité pendant les cycles de marée complets, à deux points de la section transversale (figure 6.A), illustrés figure 6.B. Ces campagnes sont en cours d'analyse.

Enfin, au-delà de leur analyse, les données haute-fréquence du réseau MAGEST seront utiles pour améliorer la calibration des modèles numériques hydrosédimentaires de l'estuaire. Les modèles permettront notamment d'approfondir cette analyse, et d'accéder, par la simulation, à la turbidité sur l'ensemble de l'estuaire et pour différents scénarios hydrologiques et climatiques (naturels ou influencés par les activités humaines).

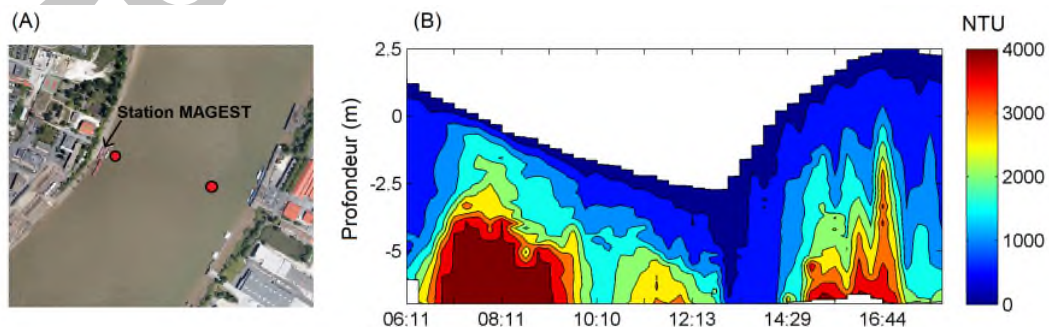


Figure 6. (A) Localisation des deux points de mesure des profils de turbidité dans la section transversale de la Garonne, face à la station de Bordeaux. (B) Exemple de l'évolution de la turbidité mesurée à proximité de la station MAGEST pendant un cycle de marée (25 juin 2014).

Références bibliographiques

- SOTTOLICHIO A., & CASTAING P., « A synthesis on seasonal dynamics of highly-concentrated structures in the Gironde estuary », *Comptes Rendus de l'Académie de Sciences - Serie Iia : Sciences de La Terre et Des Planetes*, n° 329, 1999, p. 795-800.
- ALLEN G.P., SAUZAY G., & CASTAING P., « Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde Estuary, France », *Estuarine Processes*, 1977, p. 63-81.
- GRABEMANN I., UNCLES R.J., KRAUSE G., & STEPHENS J. A., « Behaviour of Turbidity Maxima in the Tamar (U.K.) and Weser (F.R.G.) Estuaries », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 45, 1997, p. 235-246.
- GUÉZENNEC L., LAFITE R., DUPONT J.P., MEYER R., & BOUST D., « Hydrodynamics of Suspended Particulate Matter in the Tidal Freshwater Zone of a Macrotidal Estuary (The Seine Estuary, France) », *Estuaries*, n° 22(3), 1999, p. 717-727.
- UNCLES, R.J., STEPHENS, J.A., & LAW, D.J., « Turbidity maximum in the macrotidal, highly turbid Humber Estuary, UK : Floccs, fluid mud, stationary suspensions and tidal bores. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* », n° 67(1-2), 2006, p. 30-52.
- ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULLET P., DU PENHOAT Y. & DE GRANDPRE C., « Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries », *Sedimentary Geology*, n° 26, 1980, p. 69-90.
- DE-JONGE V.N., SCHUTTELAARS H.M., VAN-BEUSEKOM J.E.E., TALKE S.A., & DE-SWART H.E., « The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 139, 2014, p. 46-59.
- LANOUX A., ETCHEBER H., SCHMIDT S., SOTTOLICHIO A., CHABAUD G., RICHARD M., & ABRIL G., « Factors contributing to hypoxia in a highly turbid, macrotidal estuary (the Gironde, France) », *Environmental Science : Processes & Impacts*, n° 15(3), 2013, p. 585-595.
- ABRIL G., COMMARIEU M.V., SOTTOLICHIO A., BRETTEL P., & GUÉRIN F., « Turbidity limits gas exchange in a large macrotidal estuary », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 83(3), 2009, p. 342-348.
- SAARI H.-K., SCHMIDT S., CASTAING P., BLANC G., SAUTOUR B., MASSON O., & COCHRAN J.K., « The The particulate $^{7}\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ and $^{234}\text{Th}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ activity ratios as tracers for tidal-to-seasonal particle dynamics in the Gironde estuary (France): implications for the budget of particle-associated contaminants », *The Science of the Total Environment*, n° 408, 2010, p. 4784-4794.
- CASTAING P., *Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes : cas de la Gironde*, Thèse Université de Bordeaux, 1981, 179 pp.
- ETCHEBER H., SCHMIDT S., SOTTOLICHIO A., MANEUX A., CHABAUD G., ESCALIER J.-M., WENNEKES H., DERRIENNIC H., SCHMELTZ M., QUÉMÉNER L., REPECAUD M., WOERTHER P., & CASTAING P., « Monitoring water quality in estuarine environments : lessons from the MAGEST monitoring program in the Gironde fluvial-estuarine system », *Hydrology and Earth System Sciences*, n° 15, 2011, p. 831-840.
- SCHMIDT S., ETCHEBER H., SOTTOLICHIO S., CASTAING P., « Le réseau MAGEST : bilan de 10 ans de suivi haute-fréquence de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde », dans *Mesures haute résolution dans l'environnement marin côtier*, Presses du CNRS, 2015.
- SCHMIDT S., OUMAR L., COSSON B., DERRIENNIC H., LEBLEU P., & BERTIER C., « Relation entre la turbidité et la charge en matière en suspension dans l'estuaire de la Gironde : impact de la taille des particules sur l'estimation de la concentration particulaire », *Colloque Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance d'environnement marin*, 2014.
- SCARGLE J.D., « Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data », *Atrophys J*, n° 273, 1982, p. R1540-1549.

- PRESS W., TEUKOLSKY S., VETTERLING W., & FLANNERY B. « Numerical recipes in C : the art of scientific computing », Cambridge University Press, 1992, 1018 pp.
- CORMAULT P. « Determination experiment du debit solide d'érosion des sediments fins cohésifs », IAHR XIV Congress, 1971.
- JALÓN-ROJAS I., SCHMIDT S., & SOTTOLICHIO A., « Turbidity in the fluvial section of the Gironde Estuary (France) based on 10-year continuous monitoring : sensitivity to hydrological conditions », Pour être soumis à Hydrol. Earth Syst. Sci., en préparation.
- SCHMITT F.G., « Relating Lagrangian passive scalar scaling exponents to Eulerian scaling exponents in turbulence », European Physical Journal B, n° 48, 2008, p. 129-137.
- SCHMITT F.G., DUR G., SOUSSI S., & BRIZARD-ZONGO S., « Statistical properties of turbidity, oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France) », Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, n° 387(26), 2008, p. 6613-6623.

Sous presse