

## Vitesse de chute des sédiments fins cohésifs dans les eaux de surface de la Garonne tidale

Sophie DEFONTAINE <sup>1</sup>, Isabel JALON-ROJAS <sup>1</sup>, Nicolas GRATIOT <sup>2</sup>, Cédric LEGOUT <sup>2</sup>, Aldo SOTTOLICHIO <sup>1</sup>

1. Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC, UMR 5805, 33600 Pessac, France.

[sophie.defontaine@u-bordeaux.fr](mailto:sophie.defontaine@u-bordeaux.fr)

2. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France.

### Résumé :

L'utilisation d'une nouvelle colonne de décantation optique a permis d'analyser la variabilité temporelle de la vitesse de chute des sédiments fins cohésifs des eaux de surface de la Garonne tidale. Six campagnes de mesures ont été réalisées sous des conditions de forçages contrastées et sur différentes échelles de temps. Lors de ces campagnes, les vitesses de chute des sédiments ont varié entre 0,02 et 0,14 mm/s pour des particules dispersées d'un diamètre médian variant entre 4,7 et 14,4  $\mu\text{m}$ . Les données collectées ont montré que les vitesses de chute varient à la fois à l'échelle du cycle de marée et également sur des échelles de temps plus longues liées à la transition vers la saison d'étiage (diminution du débit). Contrairement aux estuaires caractérisés par de forts taux de floculation, les variations de vitesse de chute ne semblent pas corrélées à la salinité, et ne sont pas non plus corrélées à la concentration de sédiments en suspension lorsque le débit est supérieur 300 m<sup>3</sup>/s (en dehors du bouchon vaseux). Cependant, lorsque le débit est inférieur à 300 m<sup>3</sup>/s, la remontée du bouchon vaseux influence les vitesses de chute des sédiments en suspension, notamment par une forte augmentation de la concentration, qui favorise la floculation et un changement de nature des sédiments.

### Mots-clés:

Vitesse de chute, Sédiments cohésifs, SCAF, Rivière tidale, Bouchon vaseux.

### 1. Introduction

Les sédiments cohésifs ont la capacité de s'agréger sous forme de microflocs et de macroflocs, ce qui modifie grandement leur dynamique. Les vitesses de chute des floes peuvent être supérieures à celles des particules primaires de plusieurs ordres de grandeur. Le phénomène de floculation peut donc largement favoriser le dépôt des sédiments fins cohésifs et donc favoriser la formation d'un bouchon vaseux estuarien (BURCHARD *et al.*, 2018). Le processus de floculation est influencé par un certain nombre de paramètres tels que la salinité, la concentration de sédiments en suspension

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

( $C_{MES}$ ), la concentration en matière organique, et les caractéristiques turbulentes de l'écoulement (LIU *et al.*, 2018; MIKKELSEN & PEJRUP, 1998; FALL *et al.*, 2021; GRATIOT & MANNING, 2004). Tous ces paramètres sont variables dans le temps et dans l'espace, et par conséquent la vitesse de chute des sédiments l'est également.

La nature fragile des floes rend la mesure de vitesse de chute complexe. Une des techniques de mesure les plus utilisées est la colonne de décantation, telle que le tube d'Owen, car cette technique est très simple d'utilisation, économique et facile à déployer sur le terrain. Récemment, de nouvelles techniques basées sur l'analyse vidéo, optique, holographique ou laser se sont développées (AGRAVAL & POTTSMITH, 2000; FENESSY *et al.*, 1994; KINEKE *et al.*, 1989; WATSON *et al.*, 1998). Ces nouvelles techniques ont pour la plupart l'avantage d'être in situ (mesure directe dans la colonne d'eau) contrairement aux colonnes de décantation classiques. Elles peuvent également donner des informations complémentaires telles que la taille des floes, permettant ainsi d'estimer leur densité. Néanmoins, ces techniques sont généralement lourdes à mettre en place et demandent un long temps de traitement. De plus, elles ne peuvent être utilisées que dans des gammes de  $C_{MES}$  inférieures à quelques grammes par litre, limitant leur déploiement dans des milieux hyper-turbides. Une nouvelle colonne de décantation optique, connue sous le nom de SCAF (*System for the Characterization of Aggregates and Floc*), a récemment été développée pour permettre la mesure de vitesse de chute dans les milieux hyper-turbides (GRATIOT *et al.*, 2015; WENDLING *et al.*, 2015), tels que les eaux de la Garonne tidale où  $C_{MES}$  peut dépasser 5 g/L en surface (JALON-ROJAS *et al.*, 2015, 2021).

Dans cette étude, nous avons analysé les différents facteurs influençant la vitesse de chute des sédiments fins cohésifs à travers une série de mesures réalisée dans la Garonne tidale. Les mesures réalisées avec le SCAF sur une large gamme de concentration et sur une échelle de temps très courte (semi-diurne) ont permis d'explorer pour la première fois des valeurs de vitesse de chute de sédiments fins cohésifs et leur variabilité sur différentes échelles de temps dans cet environnement hyper-turbide.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1 Site d'étude

La Garonne est une rivière tidale située sur la côte Aquitaine (sud-ouest de la France) et qui alimente l'estuaire de la Gironde. La Garonne tidale s'étire sur près de 95 km depuis la confluence avec la Dordogne jusqu'à l'amortissement complet de l'onde de marée. Elle est soumise à un forçage tidal semi-diurne et macrotidal (jusqu'à 6,2 m à la confluence). L'onde de marée qui se propage dans la Garonne est caractérisée par une forte asymétrie, avec un flot plus court associé à de forts courants et un jusant beaucoup plus long associé à des courants plus faibles. Lors des périodes d'étiage, cette forte

asymétrie de marée génère un intense pompage tidal qui fait remonter les sédiments fins en suspension dans la Garonne et la Dordogne tidales, les piégeant dans un bouchon vaseux extrêmement concentré (JALON-ROJAS *et al.*, 2015, 2021). Cependant, très peu d'information sont disponibles dans la littérature sur la composition des sédiments du bouchon vaseux de la Garonne mis à part la taille des particules allant de 5 à 20  $\mu\text{m}$  et une faible teneur en matière organique (1,5 %) (ABRIL *et al.*, 2002; ETCHEBER *et al.*, 2007; GIBBS *et al.*, 1989).

## 2.2 Campagnes de mesure

Six campagnes de mesures ont été réalisées dans la Garonne tidale au niveau de la ville de Bordeaux (à 25 km de la confluence) entre le 18 mai 2021 et le 30 août 2021. Chaque campagne couvre un cycle de marée semi-diurne. Les six campagnes correspondent à trois conditions de débit de la rivière ( $>300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $300 < Q < 200 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $< 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) pour deux conditions de marée (vive-eau  $\sim 5\text{m}$  et morte-eau  $\sim 3,5\text{m}$ ), tableau 1. Les conditions de débit correspondent à la transition du bouchon vaseux remontant de l'estuaire de la Gironde ( $>300 \text{ m}^3/\text{s}$ ) vers la Garonne tidale ( $<300 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Des échantillons d'eau ont été prélevés en surface afin de mesurer la vitesse de chute des sédiments, leur granulométrie, ainsi que pour calibrer le turbidimètre. Dans le but d'observer une variabilité des vitesses de chute sur le cycle de marée et sachant que pendant les marées de vives eaux le flot ne dure que 4h à Bordeaux, nous avons décidé de prélever de l'eau toutes les deux heures et donc de laisser l'échantillon décanter 1h30. La colonne de décantation optique SCAF estime également un indice de floculation (FI), qui nous donne une indication sur la tendance des sédiments à floculer dans une eau au repos (*i.e. par chute différentielle dans la colonne de décantation*). Une valeur égale à zéro suggère un comportement non-cohésif, et plus la valeur de l'indice de floculation augmente plus les sédiments ont tendance à floculer.

*Tableau 1. Conditions hydrologiques durant les campagnes de mesures.*

<i>Date</i>	<i>Marnage</i>	<i>Débit</i>
<i>18 mai 2021</i>	<i>3,9 m</i>	<i>680-770 m<sup>3</sup>/s</i>
<i>25 mai 2021</i>	<i>5,1 m</i>	<i>350-420 m<sup>3</sup>/s</i>
<i>24 juin 2021</i>	<i>5,15 m</i>	<i>250-300 m<sup>3</sup>/s</i>
<i>05 juillet 2021</i>	<i>3,9 m</i>	<i>230-300 m<sup>3</sup>/s</i>
<i>25 août 2021</i>	<i>5,1 m</i>	<i>120 m<sup>3</sup>/s</i>
<i>30 août 2021</i>	<i>3,6 m</i>	<i>85 m<sup>3</sup>/s</i>

Des mesures complémentaires de suivi de nature du fond ont été réalisées à l'aide d'un cône Berthois sur les 40 km qui séparent Bordeaux de Cadillac en date du 24 mai, 18 juin, 19 juillet et 19 août 2021 (environ un prélèvement tous les 3 km).

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Les sédiments collectés dans les prélèvements nature du fond et d'eau de surface ont été analysés par diffraction laser avec un granulomètre laser Malvern (opérant sur une gamme de 0,01 à 2000  $\mu\text{m}$ ) après une minute d'agitation et de traitement par ultrasons.

### 3. Résultats

Dans cette étude, les vitesses de chute font référence aux vitesses médianes  $w_{50}$  et les diamètres font référence aux diamètres médians  $D_{50}$  des particules dispersées (i.e. après le traitement aux ultrasons).

#### 3.1 Variabilité sur le cycle de marée

Durant ces différentes campagnes de mesure les vitesses de chute ont varié entre 0,02 et 0,14 mm/s, pour des particules dispersées dont le diamètre médian a varié entre 4,7 à 14,4  $\mu\text{m}$ . Durant chaque cycle de marée, la vitesse de chute suit la même tendance, avec une valeur minimale et une distribution restreinte à marée haute, et une valeur maximale et une distribution étendue en fin de jusant (figure 1a). Des variations de vitesses de chute similaires ont été observées dans l'estuaire du Dollard (VAN DER LEE, 2000). Le diamètre médian des particules dispersées semble également suivre la même tendance, avec un minimum à marée haute et des maximums en fin de jusant (figure 1b).

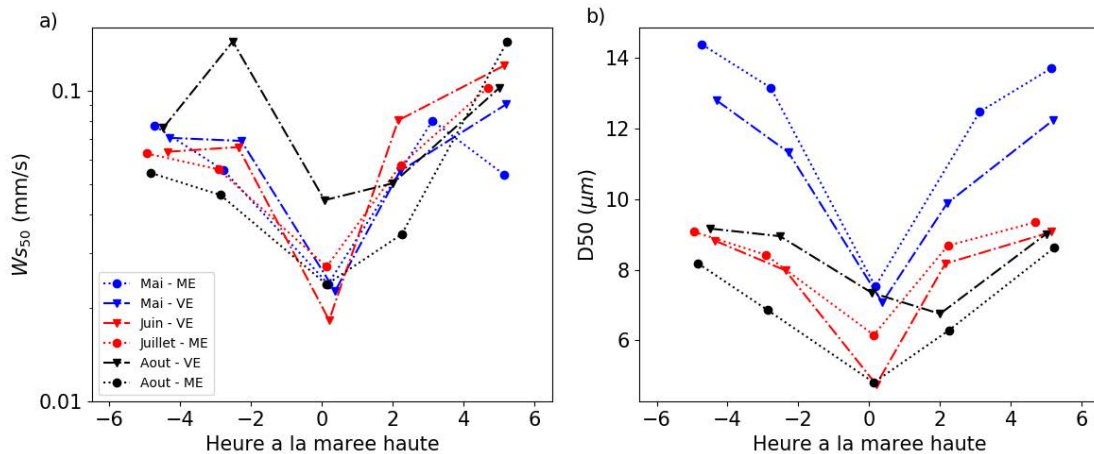


Figure 1. Variation de la vitesse de chute médiane (a) et du diamètre médian des particules dispersées (b) au cours du cycle de marée pour différentes conditions de marnage (vive-eau (VE), morte-eau (ME)) et de débit.

Cette tendance pourrait en partie s'expliquer par les variations de hauteurs d'eau au cours du cycle de marée et par des processus tidaux tels que la déposition et la resuspension. À marée haute, la hauteur d'eau étant maximum et les vitesses relativement faibles, les seules particules capables d'être maintenues en suspension à la

surface sont les plus fines, impliquant une faible vitesse de chute et une distribution restreinte. Au contraire, en fin de jusant, la forte resuspension et la faible hauteur d'eau permettent à de plus grosses particules de rester en suspension à la surface, ce qui expliquerait de plus grandes vitesses de chute et une plus large distribution.

### 3.2 Variabilité sur le cycle semi-lunaire

Bien que les vitesses de chute suivent la même tendance sur chaque cycle de marée, des différences peuvent être observées entre les marées de vives eaux et de mortes eaux (figure 1a). Les vitesses de chute sont légèrement plus élevées et la distribution plus large lors des marées de vives eaux, avec des moyennes de 0,07 mm/s et 0,06 mm/s respectivement. Ces caractéristiques sont très probablement liées à des courants et de la remise en suspension plus importants lors des marées de vives eaux. Les diamètres médians sont quant à eux relativement similaires entre les marées de vives eaux et de mortes eaux, même si on peut noter une inversion entre mai et août. Les valeurs de  $D_{50}$  sont plus grandes à morte-eau en mai alors qu'elles sont plus grandes à vive-eau en août. Ceci pourrait être expliqué en partie par un débit plus important à morte-eau qu'à vive-eau en mai, et l'inverse en août.

### 3.3 Passage à la saison d'étiage

Dans le but d'analyser l'influence de l'installation du bouchon vaseux sur la variabilité de la vitesse de chute, des mesures ont été effectuées sous différentes conditions de débit de la rivière: i) supérieur à 300 m<sup>3</sup>/s pendant lequel le bouchon vaseux n'est encore remonté jusqu'à Bordeaux, ii) entre 200 et 300 m<sup>3</sup>/s quand le bouchon vaseux atteint la ville de Bordeaux, et iii) inférieur à 200 m<sup>3</sup>/s quand le bouchon vaseux s'étale dans la Garonne jusqu'à Cadillac (~40 km de Bordeaux). Les vitesses de chute augmentent légèrement entre les mois de mai et d'août, avec une moyenne sur le cycle de marée qui passe de 0,059 à 0,072 mm/s. On peut noter que l'augmentation des vitesses de chute entre les mois de mai et d'août est plus prononcée sur les marées de vives eaux que sur les marées de mortes eaux. Contrairement à la vitesse de chute, le diamètre médian des sédiments en suspension décroît entre les mois de mai et d'août, avec une moyenne sur le cycle de marée qui passe de 11,5 à 7,6  $\mu$ m (figure 1b). La figure 2a illustre le changement très net dans la distribution des tailles de particules dispersées. A partir d'un débit inférieur à 300 m<sup>3</sup>/s (i.e. arrivée du bouchon vaseux dans la Garonne tidale), la quantité de particules ayant un diamètre inférieur à 10  $\mu$ m augmente fortement. Ceci indique un changement de nature de particules qui pourrait s'expliquer par la formation d'une couche de crème de vase suite à l'installation du bouchon vaseux dans la Garonne. Les prélèvements de nature du fond effectués pendant le passage à la période d'étiage semblent confirmer l'installation d'une couche de crème de vase avec la diminution du débit (figure 3). En mai (Q=400 m<sup>3</sup>/s), le fond de la Garonne entre Bordeaux et Cadillac est principalement composé de sables et de galets,

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

avec quelques patches de vase. En juin, le débit diminue ( $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et de la vase s'installe sur environ 20 km. En juillet, le débit augmente ( $Q=225 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et une partie de la vase installée en juin est évacuée. En août, le débit diminue de nouveau ( $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et la vase se dépose sur plus de 30 km. Cette crème de vase pourrait être à l'origine du changement observé sur la distribution de taille des sédiments en suspension.

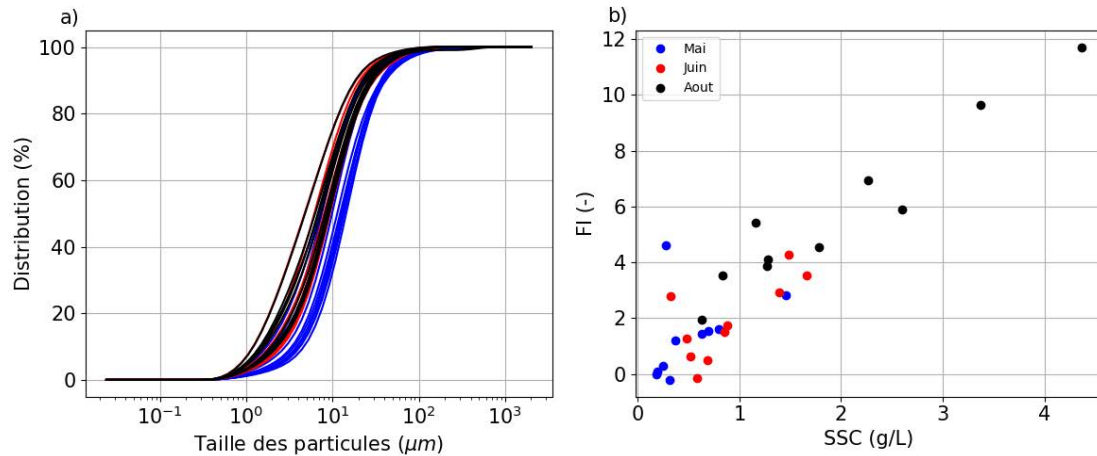


Figure 2. a) Distribution cumulée des tailles de particules dispersées, b) variation de l'indice de floculation en fonction de la concentration en sédiment en suspension pour différentes périodes mai (bleu), juin (rouge) et août (noir).

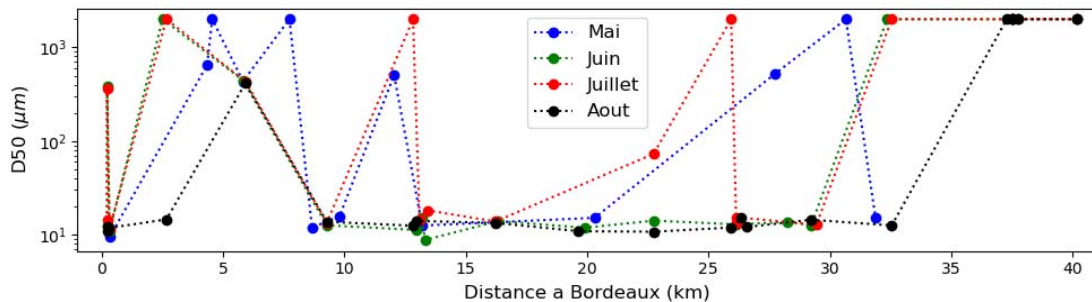


Figure 3. Évolution du diamètre médian des sédiments du fond de la Garonne entre Bordeaux et Cadillac pour différentes périodes mai (bleu), juin (vert), juillet (rouge) et août (noir).

L'augmentation de la vitesse de chute lors de la période d'étiage alors que les particules dispersées diminuent en taille semble indiquer un processus de floculation, qui serait plus important en août qu'en mai. Cette hypothèse semble être confirmée par l'indice de floculation estimé par le SCAF (figure 2b). L'indice de floculation (FI) semble être corrélé à la concentration de sédiment en suspension (SSC), avec une augmentation linéaire de FI avec la SSC. En mai, la SSC reste faible et donc le FI aussi, avec une

valeur moyenne de 1,34. En août, avec la diminution du débit, la SSC augmente ainsi que le FI, avec une valeur moyenne de 5,8. L'augmentation de la SSC avec l'installation du bouchon vaseux dans la Garonne semble favoriser la floculation des sédiments en suspension et pourrait expliquer l'augmentation des vitesses de chute des sédiments sur la période d'étiage.

#### 4. Conclusions

Cette étude présente les premières valeurs des vitesses de chute des sédiments collectés dans les eaux de surface de la Garonne tidale avec un instrument innovant. L'ergonomie et la maniabilité du SCAF rendent la mesure de vitesse de chute aisée durant les campagnes de mesure dans des environnements hyper-turbides soumis à des forçages semi-diurnes. Une variabilité temporelle des vitesses de chute a pu être observée lors de cette étude. Les vitesses de chutes des sédiments de surface varient sur deux échelles de temps, à savoir le cycle de marée semi-diurne, et également la période de remontée du bouchon vaseux dans la Garonne. La concentration de sédiments en suspension semble favoriser la floculation à partir d'une concentration supérieure au gramme par litre (c'est-à-dire pendant la période d'étiage). La formation d'une couche de crème de vase au fond de la Garonne lors de la remontée du bouchon semble être la source de sédiments plus fins que ceux présents sur le site hors de la période d'étiage. Ce changement de nature de sédiments ne permet pas de contrebalancer l'effet du processus de floculation et une augmentation de la vitesse de chute dans le bouchon vaseux a pu être mesurée. Ces premières observations nous montrent que les vitesses de chute des sédiments de surface évoluent de manière dynamique et sont affectées par différents processus physiques sur différentes échelles de temps.

#### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Nationale de la Recherche et les fonds de recherche du Québec pour le soutien financier dans le cadre du projet EMPHASE. Les auteurs souhaitent également remercier toutes les personnes ayant pris part à la collecte des données: Marine Vandenhove, Maurizio d'Anna, Mario Humbert, Marion Chapalain, Carla Labarthe et Guillaume Detand.

#### 5. Références bibliographiques

- ABRIL G., NOGUEIRA M., ETCHEBER H., CABECADAS G., LEMAIRE E., BROGUEIRA M. (2002). *Behaviour of organic carbon in nine contrasting European estuaries*. *Estuarine, coastal and shelf science* 54, 241–262.  
<https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0844>
- AGRAVAL Y.C., POTTSMITH H.C. (2000). *Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport*. *Marine Geology* 168, 89–114.  
[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00044-X)

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

- BURCHARD H., SCHUTTELAARS H.M., RALSTON D.K. (2018). *Sediment trapping in estuaries*. Annual review of marine science 10, 371–395. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060535>
- ETCHEBER H., TAILLEZ A., ABRIL G., GARNIER J., SERVAIS P., MOATAR F., COMMARIEU M.V. (2007). *Particulate organic carbon in the estuarine turbidity maxima of the Gironde, Loire and seine estuaries: origin and lability*. Hydrobiologia 588, 245–259. doi 10.1007/s10750-007-0667-9
- FALL K.A., FRIEDRICHS C.T., MASSEY G.M., BOWERS D.G., SMITH S.J. (2021). *The importance of organic content to fractal floc properties in estuarine surface waters: Insights from video, lisst, and pump sampling*. Journal of Geophysical Research: Oceans 126, e2020JC01678. <https://doi.org/10.1029/2020JC016787>
- FENNESSY M., DYER K., HUNTLEY D. (1994). *Inssev: An instrument to measure the size and settling velocity of flocs in situ*. Marine geology 117, 107–117. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(94\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(94)90009-4)
- GIBBS R., TSHUDY D., KONWAR L., MARTIN J.M. (1989). *Coagulation and transport of sediments in the Gironde estuary*. Sedimentology 36, 987–999. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1989.tb01536.x>
- GRATIOT N., COULAUD C., LEGOUT C., MERCIER B., MORA H., WENDLING V. (2015). *Unit for measuring the falling speed of particles in suspension in a fluid and device comprising at least one measuring unit and one automatic sampler*. Patent n° : WO2015055963A1. hal-03707439
- GRATIOT N., MANNING A., (2004). *An experimental investigation of floc characteristics in a diffusive turbulent flow*. Journal of Coastal Research, 105–113. <http://www.jstor.org/stable/25736635>
- JALON-ROJAS I., SCHMIDT S., SOTTOLICHIO A. (2015). *Turbidity in the fluvial Gironde estuary (south-west France) based on 10-year continuous monitoring: sensitivity to hydrological conditions*. Hydrology and Earth System Sciences 19, 2805–2819. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2805-2015>
- JALON-ROJAS I., DIJKSTRA Y., SCHUTTELAARS H., BROUWER R., SCHMIDT S., SOTTOLICHIO A. (2021). *Multidecadal evolution of the turbidity maximum zone in a macrotidal river under climate and anthropogenic pressures*. Journal of Geophysical Research: Oceans 126, e2020JC016273. <https://doi.org/10.1029/2020JC016273>
- KINEKE G., STERNBERG R., JOHNSON R. (1989). *A new instrument for measuring settling velocities in situ*. Marine Geology 90, 149–158. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(89\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90038-8)
- LIU D., EDRAKI M., BERRY L. (2018). *Investigating the settling behaviour of saline tailing suspensions using kaolinite, bentonite, and illite clay minerals*. Powder Technology 326, 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.070>



- MIKKELSEN O., PEJRUP M. (1998). *Comparison of flocculated and dispersed suspended sediment in the Dollard estuary*. Geological Society, London, Special Publications 139, 199–209. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.139.01.16>
- WATSON J., CHALVIDAN V., CHAMBARD J., CRAIG G., DIARD A., FORESTI G., FORRE B., GENTILI S., HOBSON P., LAMPITT R., MAINE P., MALMO J.T., NAREID H., PESCIETTO A., PIERONI G., SERPICO S., TIPPING K., TRUCCO A. (1998). *High-resolution in situ holographic recording and analysis of marine organisms and particles (Holomar)*. IEEE Oceanic Engineering Society. OCEANS'98. Conference Proceedings (Cat. No. 98CH36259), IEEE. pp. 1599–1603.
- VAN DER LEE W.T.B. (2000). *Temporal variation of floc size and settling velocity in the Dollard estuary*. Continental Shelf Research 20, 1495–1511. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00034-0)
- WENDLING V., GRATIOT N., LEGOUT C., DROPPA I.G., COULAUD C., MERCIER B. (2015). *Using an optical settling column to assess suspension characteristics within the free, flocculation, and hindered settling regimes*. Journal of Soils and Sediments 15, 1991–2003 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1135-1>  
<https://doi.org/10.1007/s11368-015-1135-1> Soils and Sediments 15, 1991–2003.

*Thème 2 – Dynamique sédimentaire*