



Les mouvements

Les sédiments

La dynamique du bouchon vaseux

La dynamique du bouchon vaseux

Préambule

La première version de l'indicateur, éditée en 2014, décrit le fonctionnement du bouchon vaseux dans l'estuaire et le suivi des concentrations en matières en suspension, entre Nantes et Donges. Les variations sont caractérisées grâce au réseau de mesures haute fréquence SYVEL, mis en place en 2007 et aux mesures mensuelles des réseaux de surveillance de la qualité des eaux.

Cette nouvelle édition présente la mise à jour de ce suivi sur la période 2007 – 2021.



Objectif définition

Issues de l'érosion des sols du bassin versant du fleuve, les particules de vase - sédiments fins argileux mêlés de matière organique (MO) - arrivent dans l'estuaire essentiellement lors des crues. À ces apports s'ajoutent ceux de l'océan entraînés par la marée et les apports latéraux liés au ruissellement. Les sédiments sont piégés dans l'estuaire par les courants de marée montante. Lorsque la concentration de matières en suspension (MES) devient importante, la turbidité augmente et le bouchon vaseux apparaît.

Quand l'agitation due aux courants diminue, les particules décantent, la concentration en matières

en suspension augmente près du fond. Les dépôts forment la crème de vase. Si les sédiments ne sont pas remis en suspension, cette couche se tasse en évacuant une partie de son eau interstitielle. Plus la crème de vase est tassée, moins elle est remobilisable.

Différents seuils de concentration caractérisent la masse turbide. Le bouchon vaseux correspond à des concentrations comprises entre 0,5 g/l et 30 g/l. Dans l'estuaire, l'eau est définie comme turbide à partir de 0,1 g/l, cependant la Loire se teinte dès les premiers milligrammes par litre.

TABLEAU L1 E2 - 1

Définition des différentes classes de concentration de la masse turbide

		Dénomination	Concentration (g/l)	Forme
Masse turbide	Bouchon vaseux	Panache du bouchon vaseux (hors apports de crue)	$0,1 \leq < 0,5$	suspension
		Bouchon vaseux faiblement concentré	$0,5 \leq < 1$	suspension
		Bouchon vaseux <i>stricto sensu</i>	$1 \leq < 10$	suspension
	Crème de vase	Bouchon vaseux dense	$10 \leq < 30$	suspension
		Crème de vase liquide	$30 \leq < 100$	dépôt
		Crème de vase <i>stricto sensu</i>	$100 \leq < 300$	dépôt
	Crème de vase consolidée	$300 \leq < 500$	dépôt	

Sources : GIP Loire Estuaire

Le bouchon vaseux est un phénomène naturel des estuaires macrotidaux (soumis à une marée de grande amplitude). Il permet l'existence et le maintien de vasières intertidales, habitat favorable au benthos, source de nourriture pour de nombreuses espèces de poissons et d'oiseaux. Cependant, une très grande quantité de vase en suspension et la décomposition de la MO peuvent entraîner des nuisances, tant sur les écosystèmes que sur les usages (colmatage des ouïes des poissons, colmatage de prises d'eau, désoxygénation des eaux, usure des pales d'hélice des navires, etc.). Dans la masse turbide, se produisent également de nombreuses réactions chimiques (oxydation de la MO, dénitrification, etc.).

Au cours d'une année moyenne, la masse de vase

en suspension dans l'estuaire est minimale en période de hautes eaux et mortes eaux - estimée à quelques milliers de tonnes, et atteint son maximum, près de 1 million de tonnes (Mt), lors des premières vives eaux en sortie d'étiage. La crème de vase est, quant à elle, minimale en crue et vives eaux (1,5 Mt) et maximale en fin d'étiage et mortes eaux (8 Mt).

L'objectif de cet indicateur est de caractériser la dynamique du bouchon vaseux, en déterminant les facteurs qui la conditionnent. Le suivi porte sur l'évolution des concentrations en MES, de 2007 à 2021. L'analyse est essentiellement basée sur les mesures haute fréquence du réseau SYVEL (SYstème de Veille dans l'Estuaire de la Loire), complétée par des campagnes ponctuelles et les données des réseaux de surveillance.

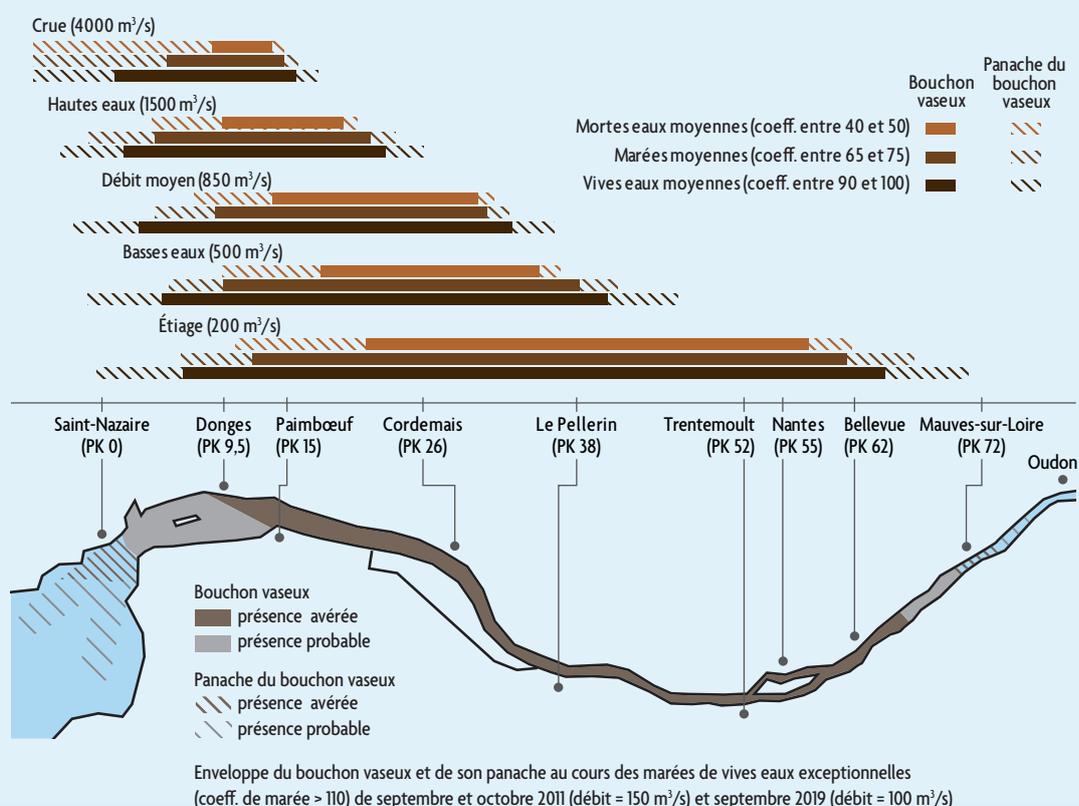
Une localisation déterminée par les conditions hydrologiques

La concentration du bouchon vaseux varie avec les conditions hydrologiques. **Le bouchon vaseux connaît des oscillations saisonnières importantes, liées au débit du fleuve.** Plus le débit est faible, plus les courants de flot s'opposent à l'évacuation des sédiments, et favorisent leur remontée dans l'estuaire où ils s'accumulent. **En étiage, le bouchon vaseux est centré sur le Pellerin** et peut s'étaler de Donges à l'amont de Nantes, lors de situations hydrologiques exceptionnelles. **En débit moyen, le bouchon vaseux**

est essentiellement situé entre Paimbœuf et Cordemais. Pour un débit supérieur à 500 m³/s, le bouchon vaseux est toujours situé à l'aval du Pellerin. Lorsque le fleuve est **en crue** – débit supérieur à 4000 m³/s – **une partie des sédiments est repoussée en estuaire externe**, voire en zone côtière ; le reste se retrouve piégé dans les grandes profondeurs en aval de Donges. Après la décrue, la remobilisation partielle des sédiments lors des vives eaux entraîne une augmentation des concentrations en MES.

FIGURE L1 E2 - 1

Localisation la plus fréquente du bouchon vaseux, en surface, en fonction du débit à Montjean-sur-Loire et du coefficient de marée à Saint-Nazaire



Sources : ARS 44/DREAL Pays de la Loire (Hydroportail)/DDTM 44/SHOM/GIP Loire Estuaire

Pour toutes les stations du réseau SYVEL, à un même débit, **plus le coefficient de marée est élevé, plus la vase se retrouve en suspension et se disperse, plus les concentrations en MES sont élevées.**

À débit et coefficient de marée équivalents, la concentration est plus forte en déchet (période de coefficient de marée décroissant) qu'en revif (période de coefficient de marée croissant), la crème de vase ayant été déconsolidée au cours des marées précédentes.

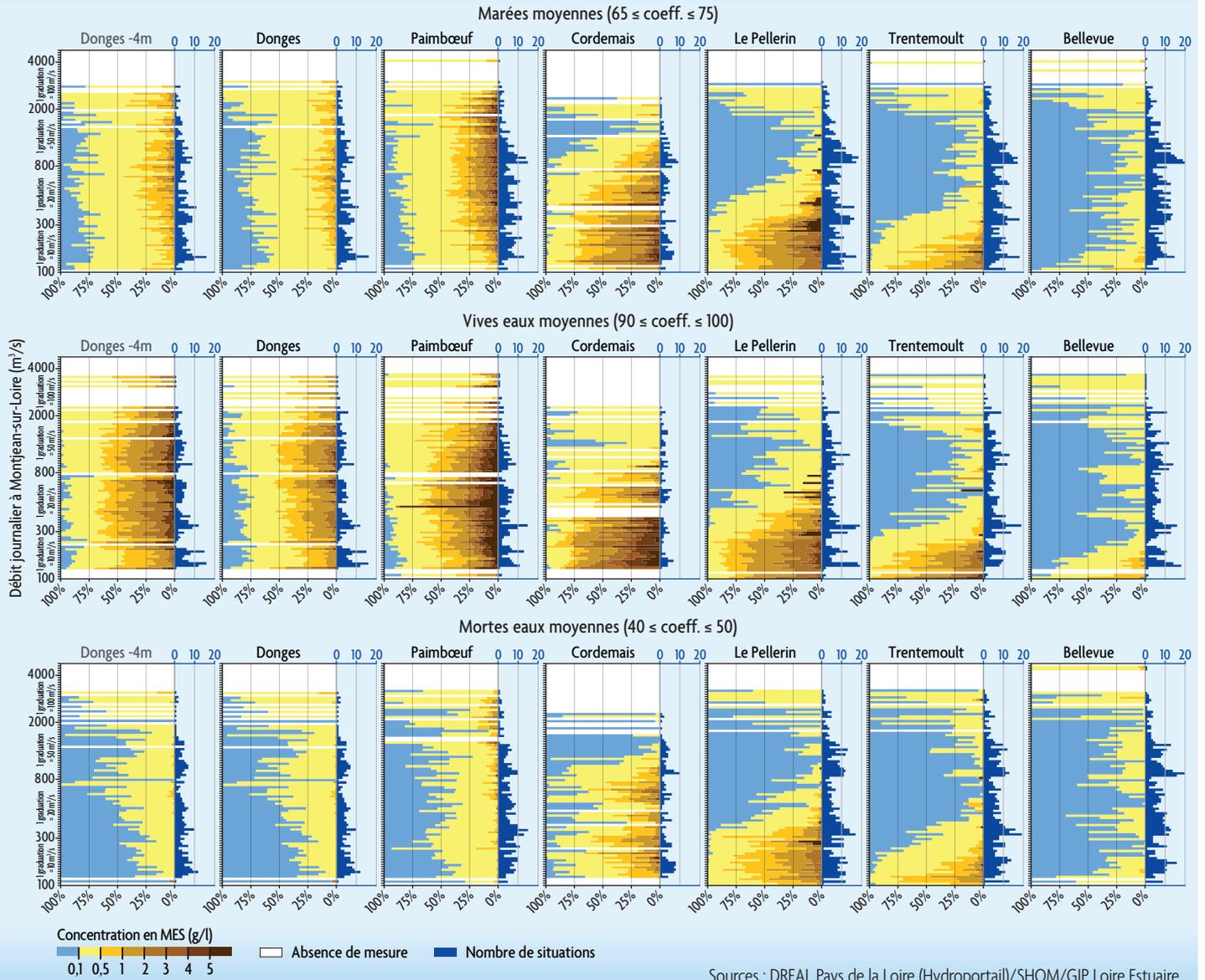
De Paimbœuf à Nantes, la largeur de l'estuaire diminue progressivement, le volume d'eau, moindre, limite la dilution, et l'influence de la marée s'atténue. **La concentration du bouchon**

vaseux est davantage liée au débit en amont de Cordemais, alors qu'en aval, elle est essentiellement conditionnée par la marée.

L'extension du bouchon vaseux est donc maximale pour des étiages sévères (débit durablement inférieur à 150 m³/s) et vives eaux exceptionnelles (coefficient de marée supérieur à 110), comme au cours des mois de septembre et octobre 2011 et 2019. Le bouchon vaseux est alors détecté de Donges à Sainte-Luce-sur-Loire, soit sur une distance d'au moins 55 km, et son panache est mesuré à Saint-Nazaire comme à Mauves-sur-Loire.

Depuis 2007, les limites d'extension maximale du bouchon vaseux n'ont pas évolué.

Pourcentages de mesures par gamme de concentration en MES pour différentes classes de débit de 2007 à 2021



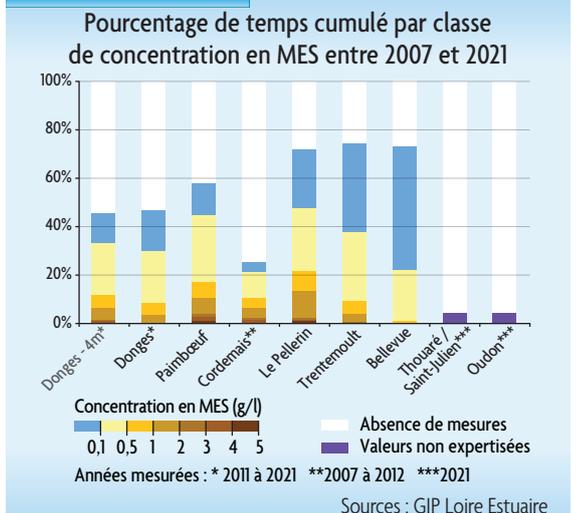
2007 – 2021 : le bouchon vaseux centré autour de Cordemais

En surface, le bouchon vaseux est observé majoritairement entre les stations de Paimbœuf (17% du temps entre 2007 et 2021) et du Pellerin (22%). La répartition est identique pour le bouchon vaseux stricto sensu. Les plus fortes concentrations sont néanmoins observées à Paimbœuf.

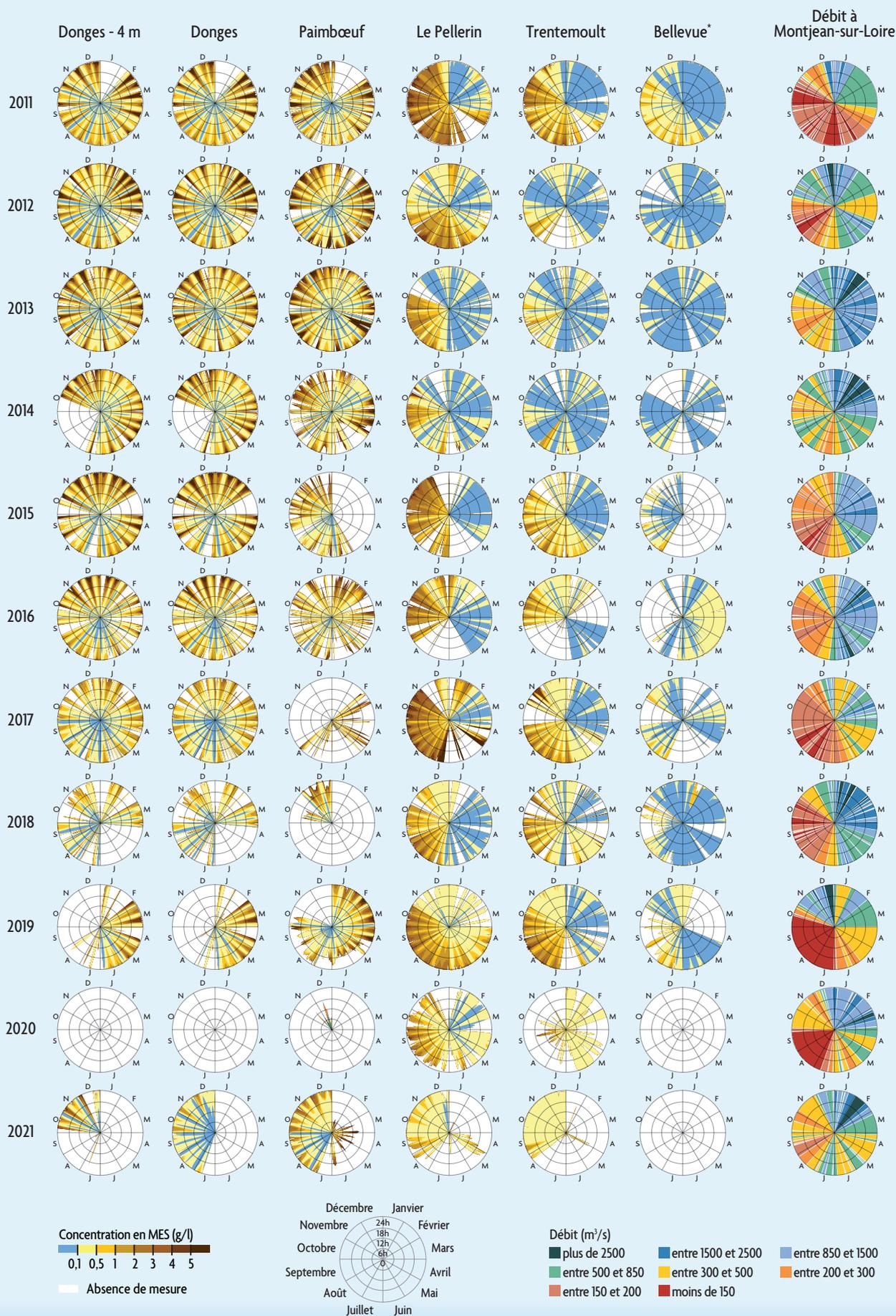
La variabilité annuelle de la présence du bouchon vaseux est plus élevée au niveau de la station du Pellerin, avec des pourcentages de présence oscillant entre 15 et 50% de l'année. À Paimbœuf, le bouchon vaseux est présent entre 15 et 25% du temps.

Entre 2007 et 2021, aucune tendance, augmentation ou diminution du bouchon vaseux, ne se dessine. La variabilité interannuelle du débit fluvial explique les différentes localisations du bouchon vaseux et son temps de présence au niveau des stations SYVEL.

GRAPHIQUE L1 E2 - 1



Distribution journalière de la concentration en MES au niveau des stations SYVEL et du débit à Montjean-sur-Loire, de 2011 à 2021



* Loi turbidité-MES en cours de calage à partir de 2020

Le bouchon vaseux influencé par le contexte hydrologique passé

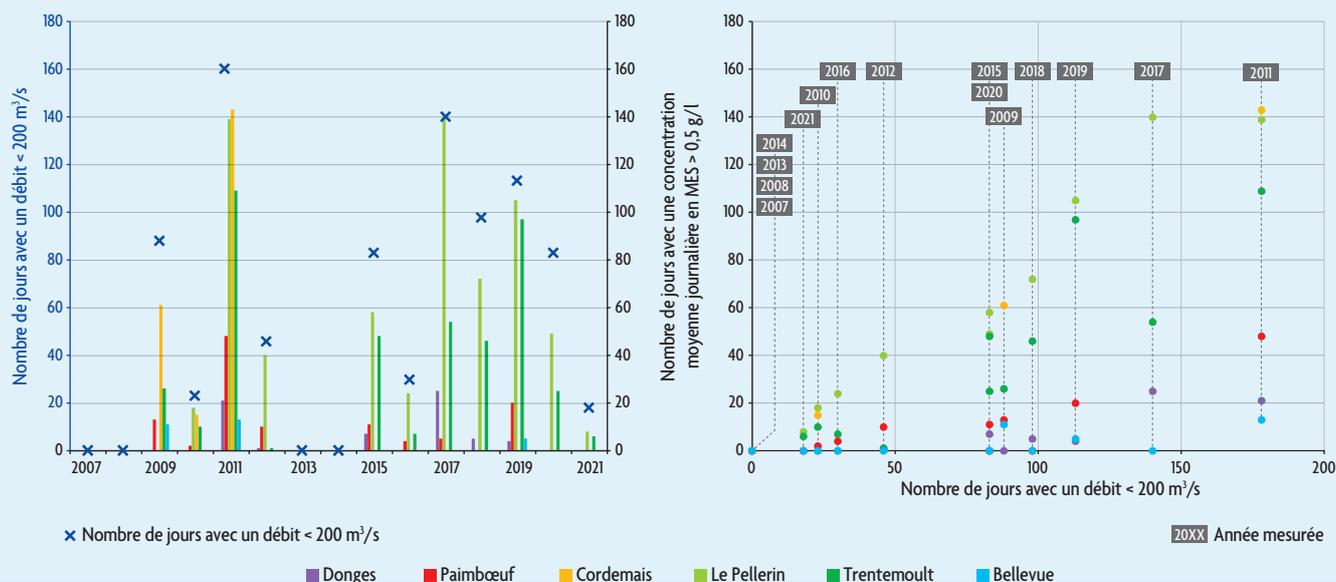
La présence du bouchon vaseux est fortement liée aux conditions hydrologiques de l'année, mais également des années précédentes. Une faible hydraulicité implique des apports fluviaux en MES moindres et une augmentation des apports océaniques. L'expulsion du

bouchon vaseux est alors limitée, la masse turbide est conservée dans l'estuaire et les concentrations en MES augmentent.

La succession d'étiages et de crues influence la position et la concentration du bouchon vaseux.

GRAPHIQUE LI E2 - 2

Présence du bouchon vaseux et durée de l'étiage (débit $\leq 200 \text{ m}^3/\text{s}$)



Sources : DREAL Pays de la Loire (Hydroportail)/GIP Loire Estuaire

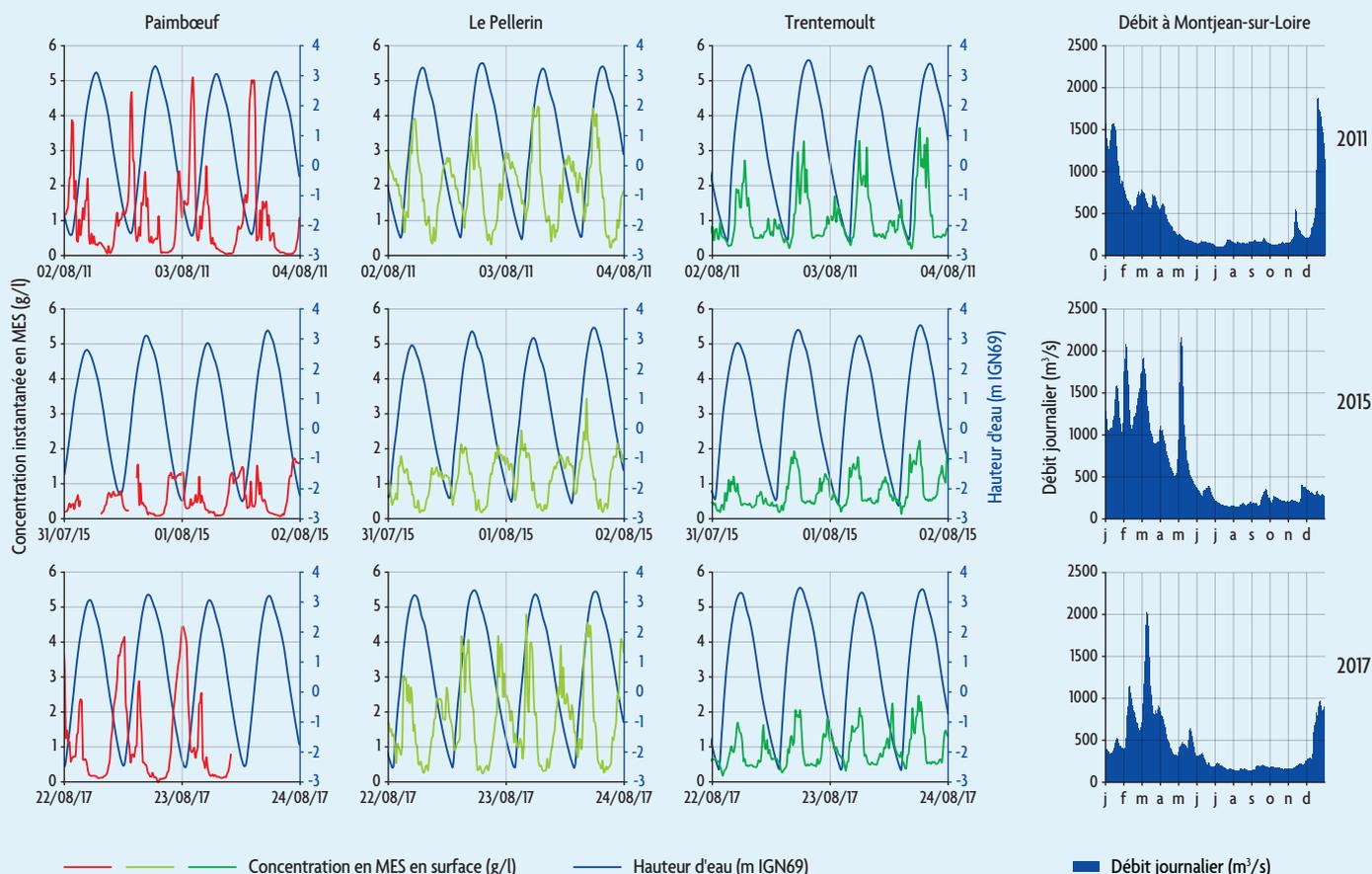
Dans l'estuaire, la durée de présence du bouchon vaseux est liée au nombre de jours avec un débit inférieur à $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Sur les stations de Donges au Pellerin, lors des étiages les plus longs (2011, 2017 et 2019), le temps de présence du bouchon vaseux augmente très fortement. En 2011, le bouchon vaseux est présent près de 300 jours à Cordemais, à un moment de la journée. Le temps de présence cumulé atteint près de 50 % de l'année. Sur les stations amont de Trentemoult et Bellevue, la tendance est identique. La survenue d'une crue printanière en juin 2016 ($3690 \text{ m}^3/\text{s}$) entraîne une diminution des concentrations sur ces stations, et donc une présence plus limitée du bouchon vaseux lors de l'étiage de 2017.

L'analyse de trois situations dans des conditions hydrologiques similaires permet de mettre en avant le rôle des crues (avec un débit supérieur à $3000 \text{ m}^3/\text{s}$) et des étiages dans la concentration des MES. L'absence de crue significative entre 2008 et 2011 ne permet pas l'évacuation d'une partie du bouchon vaseux vers l'estuaire externe. Ainsi, lors de l'étiage long et précoce de 2011, les MES se concentrent et augmentent la masse du bouchon vaseux. Les crues de 2013 et 2014 ont repoussé une partie des MES.

Le bouchon vaseux, lors de l'étiage de 2015, est donc moins concentré, d'autant plus que le printemps est humide. L'année 2017, comparable hydrologiquement avec 2011, est marquée par un bouchon vaseux moins concentré sur les stations amont, suite au recul d'une partie des MES vers l'aval lors de la crue de juin 2016.



Évolution des concentrations en MES au cours des marées du 3 août 2011 (débit = 149 m³/s, coeff. 101-98), 1^{er} août 2015 (débit = 150 m³/s, coeff. 101) et du 23 août 2017 (débit = 146 m³/s, coeff. 100)



Sources : DREAL Pays de la Loire (Hydroportail)/GIP Loire Estuaire

Une stratification verticale en étiage et vives eaux

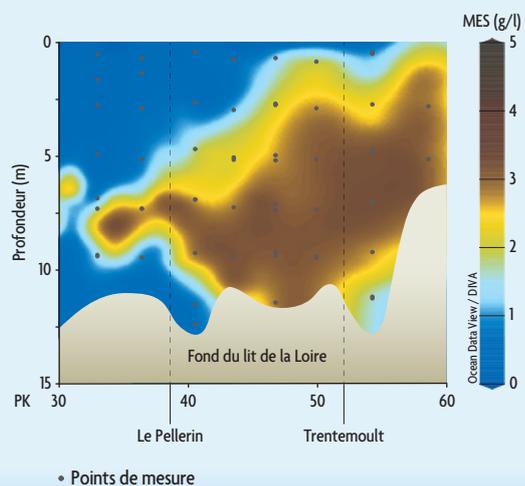
Lors d'un étiage, en condition de vives eaux, le bouchon vaseux est observé dans la colonne d'eau, quel que soit le moment de la marée, avec des concentrations plus fortes près du fond, jusqu'au centre.

En période de crue, le bouchon vaseux se déplace vers l'estuaire aval. Les MES sont évacuées au jusant, décantent lors de l'étape de basse mer et sont remobilisées au sein de la colonne d'eau au début du flot. À pleine mer, les MES s'étalent en profondeur et les concentrations restent faibles en surface.

Les fluctuations des coefficients de marée, et donc des vitesses des courants, contrôlent le dépôt des MES. Un faible débit fluvial diminue l'apport de MES mais à contrario augmente sa conservation dans l'estuaire. Un faible débit couplé à des mortes eaux entraîne la diminution de l'agitation des eaux : les MES décantent et se concentrent. La période de déchet jusqu'aux mortes eaux de fin février 2021 illustre le phénomène de reformation du bouchon vaseux au sein de l'estuaire, après une crue (4220 m³/s le 6 février).

FIGURE L1 E2 - 4

Profils hydrologiques lors de l'étiage de 2019 : profil longitudinal au jusant (débit = 98 m³/s, coeff. 102 - 96)



Sources : GIP Loire Estuaire

Le réseau de mesure SYVEL (SYstème de Veille dans l'Estuaire de la Loire), géré par le GIP Loire Estuaire depuis sa mise en service en 2007, est composé de 8 stations (au 1^{er} septembre 2022). Chacune mesure, toutes les 10 minutes (donnée horaire pour Cordemais), la turbidité (matières en suspension), la conductivité (salinité), la concentration en oxygène dissous et la température de l'eau en sub-surface (-1m). La station de

Donges est équipée d'un deuxième point de mesure à 4m sous la surface. Des lois sont établies, sur chaque station, pour convertir les mesures de turbidité en concentration en matières en suspension. Les lois des stations de Oudon et Thouaré/Saint-Julien doivent être consolidées. Les données journalières sont prises en compte dès lors qu'au moins 80% des mesures sont validées.

CARTE LI E2 - 1

Localisation des stations du réseau SYVEL et des partenaires



Sur les mesures du réseau SYVEL, les pics de turbidité à basse mer sont d'autant plus marqués pour les stations situées en bordure de berges, à proximité d'une vasière (essentiellement le cas de Paimboeuf et Cordemais). Les sondes de turbidité de SYVEL saturent pour des concentrations de l'ordre de 5,5 g/l. D'autres techniques de mesure sont employées pour suivre les concentrations plus importantes, incompatibles avec un enregistrement en continu haute fréquence.

Les apports de la Loire sont généralement inférieurs à 0,5 g/l et atteignent exceptionnellement 0,8 g/l. Suivre le seuil de concentration à 0,5 g/l est donc représentatif du bouchon vaseux.

Les analyses s'appuient également sur :

- des données ponctuelles du GIP Loire Estuaire acquises lors de campagnes de profils hydrologiques entre 2000 et 2021, avec des conditions hydrologiques variées ;

- les mesures des réseaux de surveillance de la DDTM 44, du Département de Loire-Atlantique, et de l'ARS - délégation territoriale de Loire-Atlantique.

Le débit journalier à Montjean-sur-Loire est fourni par la DREAL Pays de la Loire via l'Hydroportail ; le coefficient de marée à Saint-Nazaire est une donnée du SHOM. Les hauteurs d'eau sont mesurées en continu par le GPMNSN à l'aval de Nantes, et par la DREAL Pays de la Loire en amont.

Les estimations de masses de vase dans l'estuaire sont issues d'une modélisation hydrosédimentaire du GIP Loire Estuaire (2008-2012), et les apports du fleuve proviennent d'une extrapolation d'une campagne de mesures à Montjean-sur-Loire sur 2009-2012 (données du GIP Loire Estuaire et du laboratoire EPOC de l'université de Bordeaux), complétées par des données historiques.

Des références

Des données historiques sont traitées dans la thèse de B. Gallenne. « Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Étude de la crème de vase », soutenue en 1974 et du « Rapport de synthèse de l'APEEL 1984-1994 Tome I, Hydrosédimentaire » réalisé par C. Migniot et P. Le Hir en 1997.

Des éléments complémentaires sur l'expulsion du bouchon vaseux en crue sont détaillés dans le rapport d'étude du GIP Loire Estuaire « Acquisition et traitement d'images satellites » de juillet 2003, complété par un second volet publié en septembre 2004.

Cette fiche appartient au CAHIER 2002 INDICATEURS édité par le GIP Loire Estuaire • 22, rue de la Tour d'Auvergne 44200 NANTES • Tél. : 02 51 72 93 65 • Télécopie : 02 51 82 35 67 • E-mail : gip@loire-estuaire.org • Rédaction : GIP Loire Estuaire • Maquette : Jean-Luc Hubiche • Réalisation / illustrations : Com'caféine, GIP Loire Estuaire • Crédits photo : Ph. Grandorge, GERPHO - GIP Loire Estuaire • Impression : Offset 5 Edition • ISSN : en cours.