L1
E2

Les mouvements

Les sédiments

La dynamique du bouchon vaseux

CAHIER INDICATEURS N° 1 • avril 2014

GIP Loire Estuaire

La dynamique du bouchon vaseux

Résumé

Le bouchon vaseux est un phénomène naturel des estuaires macrotidaux. Il se compose de sédiments fins en suspension mêlés de matière organique, qui s'accumulent dans la zone de rencontre des eaux douces du fleuve et salées de l'océan. La localisation du bouchon vaseux et sa densité dépendent des conditions hydrologiques : débit de la Loire et coefficient de marée. Il s'étend de quelques kilomètres à près de 60 km entre Mauves-sur-Loire et Saint-Nazaire.

Sur les sept années de suivi du réseau SYVEL, de 2007 à 2013, le bouchon vaseux est principalement détecté entre Le Pellerin et Paimbœuf. Il est toujours présent à Paimbœuf et Donges, à un moment de la marée, en vives eaux moyennes. Seul un suivi long terme rend possible l'analyse d'évolutions, dans la mesure où la dynamique du bouchon vaseux est largement dominée par l'hydrologie fluctuante du fleuve.

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. A ces apports s'ajoutent ceux de l'océan entraînés par la marée et les apports latéraux liés au ruissellement. La transition eaux douces/eaux salées, ainsi que les courants de marée montante piègent ces particules dans l'estuaire, créant une zone de turbidité maximale. Ces particules en suspension dans l'eau constituent le bouchon vaseux.

Quand l'agitation due aux courants diminue, les particules décantent, la concentration en matières en suspension (MES) augmente près du fond. Les dépôts forment la crème de vase. Elle se présente initialement comme une couche fluide, puis, si les sédiments ne sont pas remis en suspension, cette couche se tasse en évacuant une partie de son eau interstitielle, sa concentration augmente. 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. Au-delà, les sédiments ne sont plus considérés en suspension, mais déposés sous la forme de crème de vase. 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 ≤ < 0,5	suspension
	Bouchon vaseux faiblement concentré	0,5 ≤ < 1	suspension
	Bouchon vaseux *stricto sensu*	1 ≤ < 10	suspension
	Bouchon vaseux dense	10 ≤ < 30	suspension
Masse turbide > Crème de vase	Crème de vase liquide	30 ≤ < 100	dépôt
	Crème de vase *stricto sensu*	100 ≤ < 300	dépôt
	Crème de vase consolidée	300 ≤ < 500	dépôt

Source : 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 (immergées ou exondées au rythme des marées), 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 contraintes, tant sur les écosystèmes que sur les usages (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.).

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 2013. 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. Les mesures SYVEL sont réalisées environ 1 mètre sous la surface de l'eau ; la station située à Donges est équipée d'un second point à 4 mètres de profondeur.

Interprétation

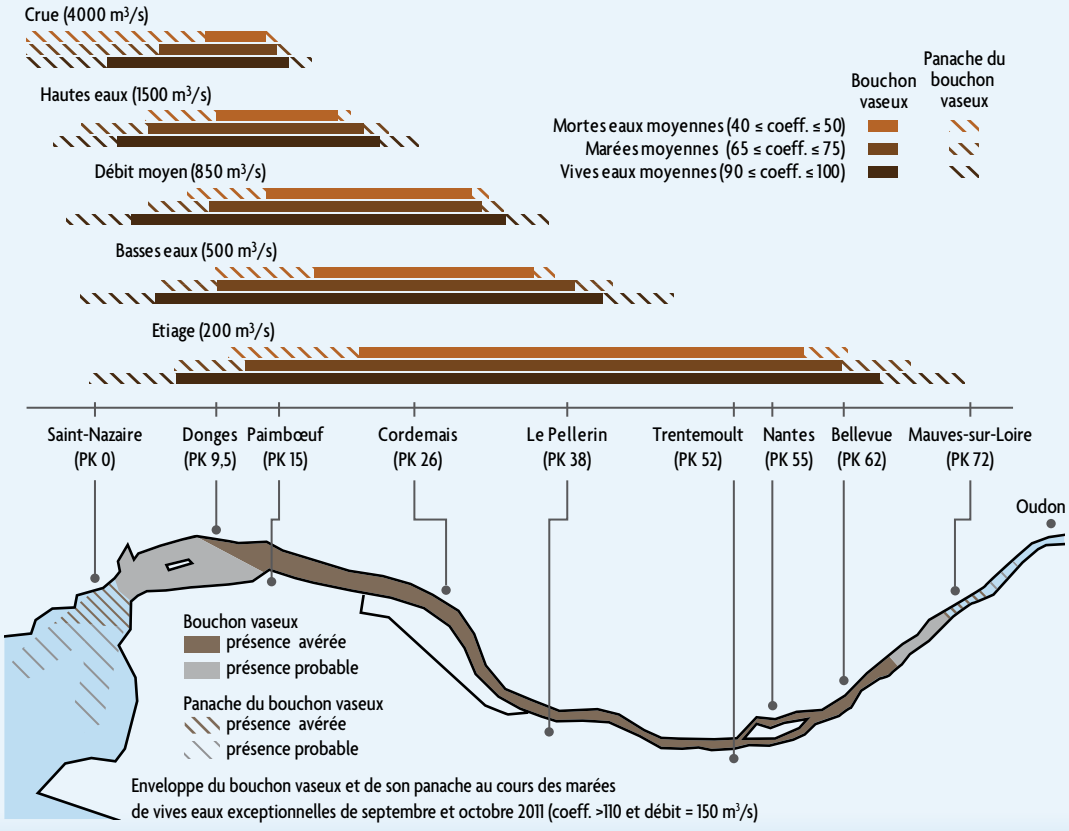
Une localisation conditionnée par le débit du fleuve

Le bouchon vaseux connaît des oscillations saisonnières importantes, liées au débit du fleuve. La morphologie de l'estuaire entre Nantes et Paimbœuf - un chenal unique convergent - entraîne un déséquilibre entre les vitesses de flot - orientées vers l'amont - et les vitesses de jusant - orientées vers l'aval. Plus le débit du fleuve 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 débit moyen, le bouchon vaseux est essentiellement situé entre Cordemais et Paimbœuf. Lorsque le fleuve est en crue, 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. Ainsi, après la décrue, le bouchon vaseux est reconstitué dès les premières vives eaux. **En étiage, le bouchon vaseux est centré sur Le Pellerin et s'étale.**

FIGURE L1 E2 - 1

Localisation la plus fréquente du bouchon vaseux en 2007-2013, en surface, en fonction du débit à Montjean-sur-Loire et du coefficient de marée à Saint-Nazaire



Sources : ARS 44/Département de Loire-Atlantique/DREAL Pays de la Loire (Banque hydro)/DDTM 44/SHOM/GIP Loire Estuaire

De plus, pour un même débit, **plus le coefficient de marée est élevé, plus la vase se retrouve en suspension et se disperse**. 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. Le bouchon vaseux est alors détecté de Sainte-Luce-sur-Loire (Bellevue) à Donges, soit sur une distance d'au moins 55 km, et son panache est mesuré à Mauves-sur-Loire, comme en aval de Saint-Nazaire.

L'approfondissement du chenal de Donges, la poldérisation de l'estuaire au cours des XIX[e] et XX[e] siècles entre Nantes et Paimbœuf, le creusement du bassin à marée entre Nantes et Oudon, augmentent la capacité de piégeage de l'estuaire et la remontée du bouchon vaseux. Pour un étiage de 200 m³/s et en vives eaux moyennes, dans les années 1960-70, la limite amont du bouchon vaseux n'atteint pas Sainte-Luce-sur-Loire, alors que ces dix dernières années, elle remonte au-delà, sans parvenir à Mauves-sur-Loire.

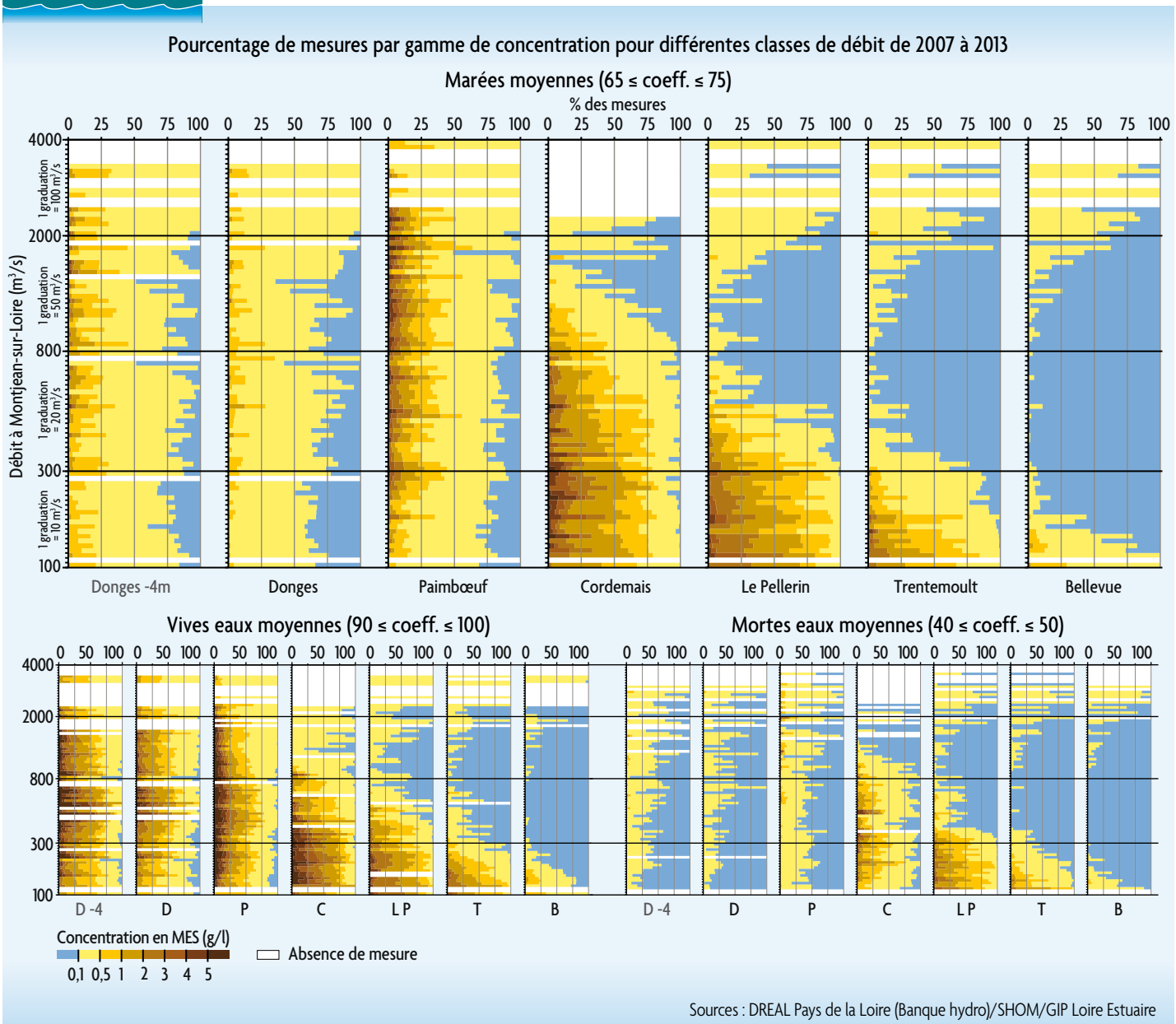
D'autres phénomènes météorologiques influent sur la localisation de la zone de turbidité maximale. Ainsi, les forts vents d'ouest, lorsqu'ils sont concomitants à la marée montante, augmentent la propagation des eaux océaniques dans l'estuaire et favorisent la remontée temporaire du bouchon vaseux.

La concentration différemment influencée dans l'estuaire

La concentration du bouchon vaseux varie avec le débit du fleuve et le coefficient de marée. Pour toutes les stations du réseau SYVEL, à un même débit, la concentration augmente généralement avec le coefficient de marée. Cependant, à débit et coefficient de marée équivalents, la concentration est plus élevée 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**.

FIGURE L1 E2 - 2



Sources : DREAL Pays de la Loire (Banque hydro)/SHOM/GIP Loire Estuaire

Quel que soit le coefficient de marée, le bouchon vaseux est toujours présent à un moment de la marée à Trentemoult et au Pellerin quand le débit est respectivement inférieur à 148 m³/s et à 174 m³/s. Dans ces conditions, l'eau reste turbide en permanence, y compris en période de mortes eaux. En vives eaux moyennes, ces seuils de débits passent à 220 et 350 m³/s. Par contre, les concentrations dépassent rarement les 3 g/l.

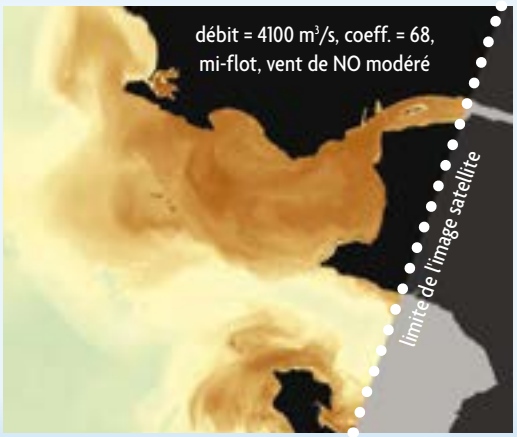
A Paimbœuf et Donges, en vives eaux moyennes, les pics de concentrations en MES sont élevés et l**e bouchon vaseux est toujours présent à un moment de la marée, quel que soit le débit**. Par contre, lors des mortes eaux, la turbidité reste très faible. Le bouchon vaseux est systématiquement absent à Donges pour un coefficient de marée inférieur à 40 en surface - inférieur à 35 à 4 mètres de profondeur - et à Paimbœuf en dessous d'un coefficient de marée de 30.

En dehors des périodes de crue, la concentration en MES est généralement plus élevée proche du fond (donc de la source) qu'en surface. Ainsi, le bouchon vaseux dit "dense" est toujours situé en profondeur, à l'interface avec la crème de vase liquide.

En estuaire externe et sur la façade océanique, les eaux de Loire sont diluées par les eaux marines. La concentration du panache turbide de la Loire en mer excède rarement 0,2 g/l en surface. Son expansion et sa répartition dépendent du débit du fleuve, du moment de la marée, ainsi que de la force et de l'orientation du vent.

FIGURE L1 E2 - 3

Expulsion du bouchon vaseux en crue



Sources : scène SPOT du 5 janvier 2000/GIP Loire Estuaire

2007-2013 : le bouchon vaseux principalement à Cordemais

Seule la mesure en continu, à l'instar du réseau SYVEL, garantit un suivi pertinent d'un phénomène tel que le bouchon vaseux dans un milieu aussi dynamique que l'estuaire. Bien que le réseau soit performant, les interruptions de fonctionnement des stations influent sur les résultats présentés. Les temps de présence cumulés (pourcentages) sont calculés *a minima* ; le bouchon vaseux peut être présent alors que les données ne sont pas enregistrées.

En surface, de 2007 à 2013, le bouchon vaseux est détecté majoritairement au niveau de la station de Cordemais (32 % de la période), puis au niveau de celle du Pellerin (24 %) et de Paimbœuf (22 %). Cette répartition est similaire pour le bouchon vaseux *stricto sensu*, par contre les plus fortes concentrations (≥ 5 g/l) sont davantage mesurées à la station de Paimbœuf.

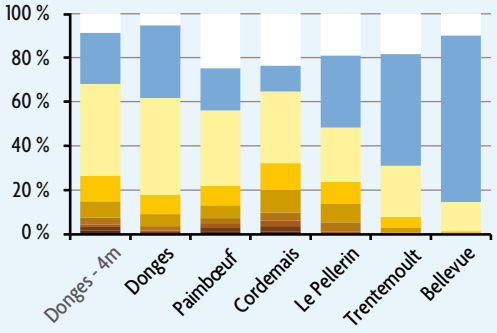
Sur les sept années du suivi, aucune tendance, augmentation ou diminution du bouchon vaseux, ne se dessine. La variabilité interannuelle des débits fluviaux explique les différentes localisations du bouchon vaseux et son temps de présence au niveau des stations SYVEL.

L'hydraulicité des années 2007 à 2012 est inférieure à la moyenne pour les périodes de hautes eaux. Seules quatre crues - débit supérieur à 2500 m³/s - sont recensées, toutes très fugaces. L'année 2013 est, au contraire, une année humide. Les étiages - débit inférieur à

GRAPHIQUE L1 E2 - 1

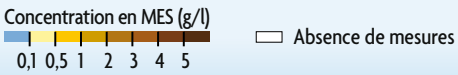
Pourcentage de temps cumulé* par classe de concentration en MES entre 2007 et 2013

**Les années sans mesure ne sont pas prises en compte (2009 pour Le Pellerin, 2012-2013 pour Cordemais et 2007-2010 pour Donges).*



Pourcentage de temps au-dessus des seuils de concentration

	D -4	D	P	C	L P	T	B
≥ 0,1	68	62	56	65	48	31	15
≥ 0,5	26	18	22	32	24	7,9	1,4
≥ 1	15	9,2	13	20	14	3,0	0,1
≥ 2	7,6	3,7	7,4	9,9	5,5	0,8	-
≥ 3	4,5	1,7	4,8	6,2	1,3	0,2	-
≥ 4	3,4	1,1	3,2	3,7	0,5	0,0	-
≥ 5	1,8	0,3	1,4	1,2	0,0	-	-



Source : GIP Loire Estuaire

300 m³/s - sont de durée très variable, entre 11 jours (en 2007) et 222 jours (en 2011).

Une faible hydraulicité implique, par rapport à une année moyenne :

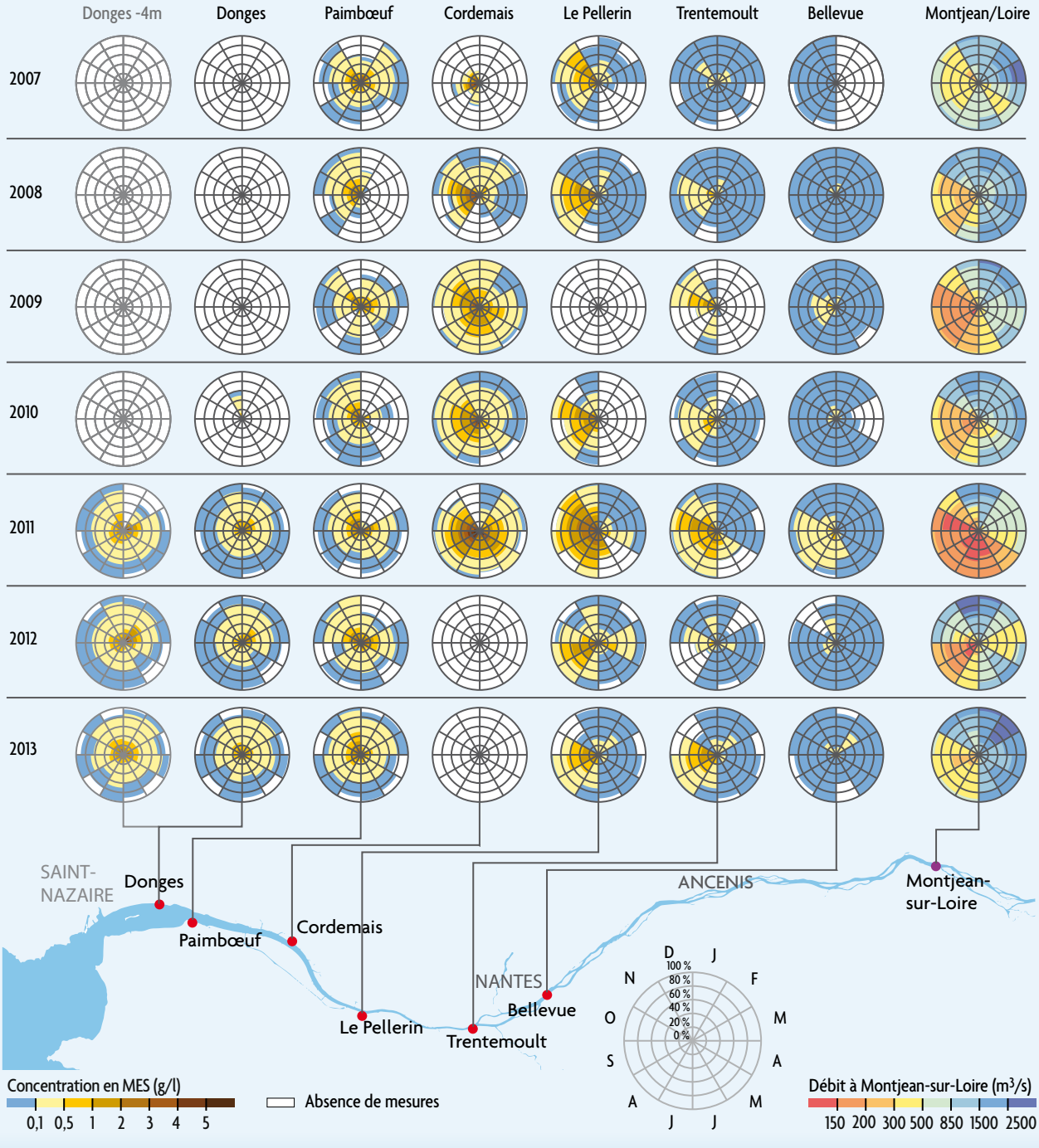
- des apports fluviaux en MES moindres ;
- une augmentation des apports marins ;
- peu d'expulsion du bouchon vaseux en mer, donc conservation de la masse turbide (hors exports par dragages) ;
- un bouchon vaseux plus amont, pour les années à long étiage.

Sur la période de suivi, le bouchon vaseux est principalement mesuré :

- en février - mars à Donges, période de hautes eaux et vives eaux exceptionnelles (grandes marées) ;
- en novembre - décembre à Paimbœuf, période de moyennes eaux, cependant la station est souvent en arrêt lors des forts coefficients de marée hivernaux ;
- en août - septembre - octobre à Cordemais, Le Pellerin, Trentemoult et Bellevue, période de basses eaux et grandes marées.

FIGURE L1 E2 - 4

Distribution mensuelle de la concentration en MES au niveau des stations SYVEL et du débit à Montjean-sur-Loire, de 2007 à 2013



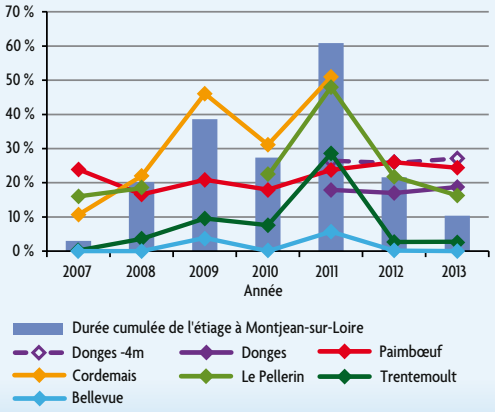
Sources : DREAL Pays de la Loire (Banque hydro)/GIP Loire Estuaire

Quelle que soit l'année, le bouchon vaseux est détecté en moyenne deux jours sur trois à Paimbœuf. L'augmentation du pourcentage de temps cumulé où le bouchon vaseux est présent à cette station, est essentiellement due à une amélioration du fonctionnement de la station. A Donges, le bouchon vaseux est détecté un jour sur deux, mais pendant peu de temps à chaque fois, soit seulement 20 % de l'année en cumulé.

Pour les stations les plus amont, le temps de présence du bouchon vaseux dépend essentiellement de la durée de l'étiage. Ainsi, il est davantage détecté les années 2009 et 2011, dont les étiages sont les plus longs (respectivement 141 et 222 jours) et les plus sévères. Ces mêmes années, le bouchon est présent près de 300 jours à Cordemais à un moment de la journée, et le temps de présence cumulé atteint 50 %.

GRAPHIQUE L1 E2 - 2

Pourcentage de temps cumulé de présence du bouchon vaseux aux stations SYVEL



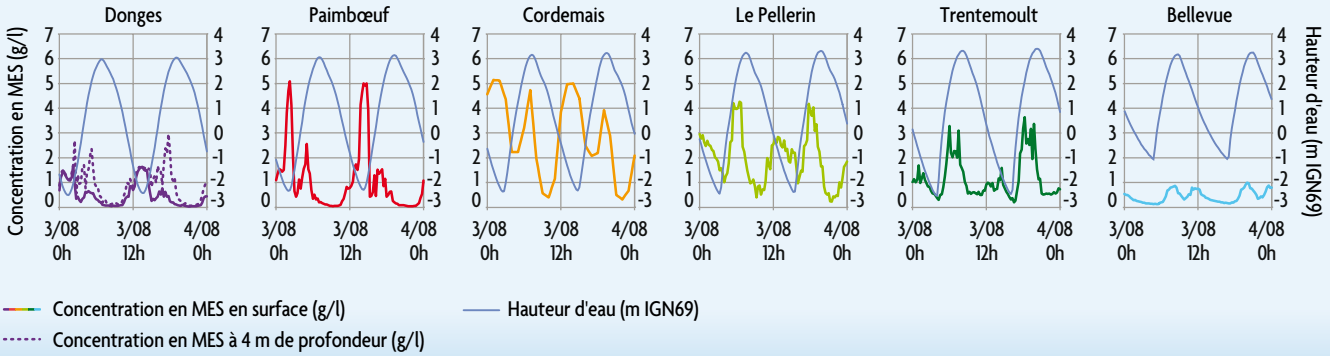
Sources : DREAL Pays de la Loire (Banque hydro)/GIP Loire Estuaire

Un bouchon vaseux épisodique

Lorsque les conditions hydrologiques positionnent le bouchon vaseux au niveau d'une station du réseau SYVEL, des pics de turbidité sont généralement présents à deux instants de la marée". Le moment de ces pics diffère entre les stations et les conditions hydrologiques.
Les pics de basse mer sont liés à de l'érosion locale, donc à la présence de crème de vase à proximité de la station.
Les courants de flot, supérieurs à ceux de jusant, ont plus de capacité à remobiliser et transporter des matériaux, expliquant la présence systématique d'un pic de turbidité de flot lorsque le bouchon vaseux est présent. Ce pic peut avoir lieu en début ou fin de flot, suivant la proximité de l'origine des sédiments.
Pour les stations amont, un second pic de turbidité est observé au jusant, lorsqu'une partie des sédiments transportés au flot est reprise après un dépôt temporaire.

GRAPHIQUE L1 E2 - 3

Evolution des concentrations en MES au cours des marées du 3 août 2011 (débit = 149 m³/s, coeff. 101-98)



Sources : DREAL Pays de la Loire/GPMNSN/GIP Loire Estuaire

Estimation des masses

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).

Sur la période 1996-2013, les flux sédimentaires d'entrée/sortie dans l'estuaire de la Loire sont approchés à partir de différentes méthodes :

- les apports fluviaux moyens, entre 0,3 et 2,4 Mt/an ;
- les apports marins, comme les exports en crue, sont difficilement quantifiables - la masse exportée par dragages représente de 0,5 à 7 fois celle apportée par le fleuve ;
- les exports par dragages (clapage à la Lambarde), entre 1,2 et 3,7 Mt/an.

Sources & Méthodes

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 6 stations. Chacune mesure, toutes les 10 minutes à toutes les heures suivant les stations et les périodes, la turbidité (matières en suspension), la conductivité (salinité), la concentration en oxygène dissous et la température. 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 berge, à proximité d'une vasière (essentiellement le cas de Paimbœuf 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 - apports fluviaux et remises en suspension de crème de vase résiduelle - 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 du GIP Loire Estuaire acquises entre 2000 et 2006, 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 ;
- les suivis du Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire (GPMNSN) dans le cadre de ses dragages par injection d'eau, en période estivale de 2007 à 2012.

Le débit journalier à Montjean-sur-Loire est fourni par la DREAL Pays de la Loire via la banque Hydro (www.hydro.eaufrance.fr) ; le coefficient de marée à Saint-Nazaire est une donnée du SHOM (www.shom.fr). 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, celles draguées sont fournies par le GPMNSN 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, UMR 5805, de l'université de Bordeaux), complétées par des données historiques.

Des références

Les données historiques sont issues de la thèse de B. Gallenne. "Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Etude 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 l'étude réalisée par J.-M. Froidefond pour le GIP Loire Estuaire "Acquisition et traitement d'images satellites" de juillet 2003, complété par un second volet publié en septembre 2004.

agence de l'eau Loire-Bretagne
Établissement public du ministère chargé du développement durable

Cette brochure est cofinancée par l'Union européenne. L'Europe s'engage en Pays de la Loire avec le Fonds européen de développement régional.

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 : Caféine, GIP Loire Estuaire • Crédit photo : GIP Loire Estuaire • ISSN : en cours. La mission "observation et communication" est cofinancée par les membres du GIP Loire Estuaire, l'Union européenne et l'Agence de l'eau Loire Bretagne.