



RENOUVELLEMENT DE L'AUTORISATION DES DRAGAGES-IMMERSIONS DU GPMNSN

ETUDE HYDRO-SEDIMENTOLOGIQUE

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

ARTELIA Eau & Environnement
Branche MARITIME

6 rue de Lorraine
38130 - Echirrolles
Tel. : +33 (0) 4 76 33 40 00
Fax : +33 (0) 4 76 33 43 33



Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

N° 8 71 6311 R1 – annexe 3 – Dragages-immersion du GPMNSN

Version	Description	Rédaction	Vérifié	Approuvé	Date
V5	Prise en compte des remarques du GPMNSN du 21/04/2021 – 3 ^e relecture	FMN	LHM	LHM	21/04/2021
V4	Prise en compte des remarques du GPMNSN du 19/04/2021 – 2 ^e relecture	FMN/LHM	LHM	LHM	19/04/2021
V3	Prise en compte des remarques du GPMNSN du 16/04/2021	LHM	LHM	LHM	16/04/2021
V2	Prise en compte des remarques GPMNSN du 13/04/2021	FMN	LHM	SLX/ LHM	15/04/2021
V1	Actualisation 2021	FMN	LHM	SLX/ LHM	02/04/2021

SOMMAIRE

1. LA DYNAMIQUE HYDROSEDIMENTAIRE DU SYSTEME ESTUARIEEN	5
1.1. DESCRIPTION DES PHENOMENES	5
1.2. L'HYDROLOGIE DE LA LOIRE	6
1.2.1. APPORTS LIQUIDES : LES TENDANCES PASSEES A LONG-TERME	6
1.2.2. EVOLUTION DES DEBITS MENSUELS	7
1.2.3. EVOLUTION DES DEBITS JOURNALIERS MAXIMAUX	8
1.2.4. APPORTS LIQUIDES : EVOLUTIONS RECENTES DEPUIS 2010	9
1.2.5. APPORTS LIQUIDES : LES EVOLUTIONS FUTURES	10
1.2.6. EVOLUTION DES APPORTS SOLIDES	11
1.2.7. APPORTS SOLIDES : EVOLUTIONS RECENTES DEPUIS 2010	12
1.3. LE RESEAU DE MESURES SYVEL	13
1.3.1. GENERALITES	13
1.3.2. SUIVI DE L'EVOLUTION DE LA SALINITE PAR LE RESEAU SYVEL	13
1.3.3. SUIVI DE L'EVOLUTION DES MES PAR LE RESEAU SYVEL	16
1.3.4. LE BOUCHON VASEUX	18
1.3.5. DETAILS SUR LES ETES 2019 ET 2020	19
1.4. LE SUIVI DE LA CREME DE VASE	20
1.5. BILAN SEDIMENTAIRE EN MES	21
2. INCIDENCES DES DRAGAGES SUR LES MATIERES EN SUSPENSION (MES) ET LE BOUCHON VASEUX	25
2.1. SUIVI DES OPERATIONS DE DRAGAGE PAR INJECTION D'EAU	25
2.1.1. PRINCIPE DE LA DIE ET DE SES EFFETS GENERAUX	25
2.1.2. RAPPEL DES SUIVIS ENVIRONNEMENTAUX ENTRE 2006 ET 2011	25
2.1.3. DEVENIR A COURT-TERME : COURANT DE DENSITE	27
2.1.4. DEVENIR A COURT-TERME : REMISES EN SUSPENSION	27
2.1.5. DEVENIR A MOYEN TERME	27
2.2. MODELISATION NUMERIQUE D'UN DRAGAGE PAR DAS ET DIE	28
2.2.1. DESCRIPTION DU MODELE	28
2.2.2. LES SCENARIOS MODELISES	30
2.2.3. PRESENTATION DES RESULTATS	33
2.2.4. DEVENIR DES MATERIAUX DRAGUES A L'AVAL	33
2.2.5. DEVENIR DES MATERIAUX DRAGUES A L'AMONT	41
2.3. INCIDENCES DES DRAGAGES SUR LES MES ET LE BOUCHON VASEUX	44
2.3.1. RAPPEL SUR LES MESURES DU RESEAU SYVEL	44

2.3.2. IMPACT D'UN DRAGAGE PAR DAS ET DIE A L'AVAL (DONGES) SUR LE BOUCHON VASEUX	45
2.3.3. IMPACT D'UN DRAGAGE DAS ET DIE A L'AMONT (TRENTEMOUT) SUR LE BOUCHON VASEUX	49
2.3.4. SYNTHESE DES RESULTATS	51
2.3.5. IMPACT GLOBAL DES DRAGAGES SUR LA MASSE TURBIDE DE L'ESTUAIRE	51
2.4. SEDIMENTATION LATERALE ET LIEN AVEC LES DRAGAGES	53
2.4.1. CONTEXTE	53
2.4.2. BILAN DE L'ETUDE SUR LA SEDIMENTATION LATERALE	53
2.4.3. CONCLUSION	58

BIBLIOGRAPHIE	59
----------------------	-----------

TABLEAUX

Tableau 1.1. Evolution du module moyen sur 10 ans de la Loire à Montjean	9
Tableau 1.2. Evolutions futures possibles du module annuel (en m ³ /s) de la Loire à Montjean-sur-Loire	10
Tableau 1.3. Evolution du débit solide moyen sur 10 ans de la Loire à Montjean-sur-Loire	12
Tableau 1.4. Estimations de la masse de crème de vase pour 4 situations (en Mt)	21
Tableau 2.1. Evolution des protocoles de suivi du dragage à injection d'eau depuis 2006	26
Tableau 2.2. Rappel des scénarios modélisés	32
Tableau 2.3. Donges 6 : Récapitulatif des maximums ponctuels calculés et des temps de passage sous le seuil de 20 mg/l	35
Tableau 2.4. Donges 6 : Récapitulatif des temps de dépassement sur 15 jours à différents seuils de concentration	38
Tableau 2.5. ZE Trentemoult : Récapitulatif des maximums ponctuels calculés et des temps de passage sous le seuil de 20 mg/l	42
Tableau 2.6. ZE Trentemoult : Récapitulatif des temps de dépassement sur 15 jours à différents seuils de concentration	43
Tableau 2.7. Donges 6 : comparaison, pour différents débits, des impacts DAS et DIE modélisés aux extensions de panache du bouchon vaseux et de la crème de vase	46
Tableau 2.8. Donges 6 : Comparaison des temps de dépassement du seuil de 0,1g/l entre le milieu naturel, un dragage par DAS et un dragage par DIE à l'aval	49
Tableau 2.9. ZE Trentemoult : comparaison des impacts DAS et DIE aux extensions de panache du bouchon vaseux et de crème de vase	50
Tableau 2.10. Trentemoult : comparaison des temps de dépassement du seuil de 0,1g/l entre le milieu naturel, un dragage par DAS et un dragage par DIE	51

FIGURES

Figure 1.1. Schéma de fonctionnement du bouchon vaseux (GIP Loire Estuaire, 2018)	5
Figure 1.2. Définition de différentes classes de concentration de la masse turbide (GIP Loire Estuaire, 2014).....	6
Figure 1.3. Hydraulicité annuelle de la Loire depuis 1900	7
Figure 1.4. Variations mensuelles du débit de la Loire à la station de référence de Montjean-sur-Loire entre 2008 et 2020 (ARTELIA, 2021)	7
Figure 1.5. Années des débits extrêmes mensuels à Montjean-sur-Loire entre 1863 et 2019 (GIP LE, 2020)	8
Figure 1.6. Débit journalier maximal à Montjean-sur-Loire entre 1863 et 2019 (GIP LE, 2020).....	9
Figure 1.7. Evolution future des débits classés pour différents scénarios de changement climatique (ICC – Hydroqual, 2008))	10
Figure 1.8. Série de mesures en nature et relations empiriques entre les apports de MES et le débit de la Loire (Artelia, 2010)	11
Figure 1.9. Série chronologique des débits liquides et des apports en MES de la Loire à Montjean-sur-Loire (ARTELIA, 2021)	12
Figure 1.10. Carte de présentation du réseau SYVEL (GIP Loire Estuaire, 2017)	13
Figure 1.11. Distribution journalière de la salinité par an et par station sur 2007-2016 (GIP Loire Estuaire, 2017).....	14
Figure 1.12. Suivi de la salinité en pourcentage du temps cumulé entre 2007 et 2019 (GIP Loire Estuaire, 2017).....	15
Figure 1.13. Distribution journalière des concentrations en MES, par an et par station, sur la période 2011-2016 (GIP Loire Estuaire, 2017)	16
Figure 1.14. Suivi de la concentration en MES en pourcentage de temps cumulé le long de l'estuaire, pour chaque station sur la période 2007-2019 (GIP Loire Estuaire, 2020)	17
Figure 1.15. Localisation la plus fréquente du bouchon vaseux en surface en fonction du débit et du coefficient de marée (GIP Loire Estuaire, 2018).....	18
Figure 1.16. Emprise maximale du bouchon vaseux sur la période 2007-2012, suivant le débit, en excluant les apports de crue (source : GIP Loire estuaire, 2015)	19
Figure 1.17. Débit moyen du mois de juillet à la station de Montjean-sur-Loire depuis 1900 (source : GIP LOIRE estuaire, 2019).....	20
Figure 1.18. Relevé des épaisseurs de crème de vase. Situation du 1er août 2007 : CVL en jaune, CVSS en orange, CVC en brun (source : GIP LOIRE estuaire)	21
Figure 1.19. Forçages en niveau à l'aval et débits liquides de Loire en amont pour la simulation de l'état actuel (Artelia, 2009)	22
Figure 1.20. Simulation bilan sédimentaire Phase 1 : crue à décrue (d'après Artelia, 2011)	22
Figure 1.21. Simulation bilan sédimentaire Phase 2 : décrue à bas débits (d'après Artelia, 2011).....	23
Figure 1.22. Simulation bilan sédimentaire Phase 3 : étiage à bas débits (d'après Artelia, 2011).....	23
Figure 1.23. Simulation bilan sédimentaire Phase 4 : bas débits à petite crue (d'après Artelia, 2011)	23
Figure 1.24. Simulation bilan sédimentaire total (d'après Artelia, 2011).....	24
Figure 2.1. Emprise et bathymétrie du modèle hydrosédimentaire 3D	28
Figure 2.2. Visualisation du maillage.....	29
Figure 2.3. Maillage vertical du modèle hydrosédimentaire 3D	29
Figure 2.4. Position Z des points de remise en suspension par DAS au poste 6	30
Figure 2.5. Position XY du point de remise en suspension par DIE et DAS au poste 6	31
Figure 2.6. Position XY du point de remise en suspension par DIE au niveau de la ZE de Trentemoult	31
Figure 2.7. Position XY du point de remise en suspension par DAS au niveau de la ZE de Trentemoult	32

Figure 2.8. Localisation la plus fréquente du bouchon vaseux en surface en fonction du débit (GIP Loire Estuaire, 2014)	44
Figure 2.9. Pourcentages de mesures par gamme de concentration pour différentes classes de débit (GIP Loire estuaire, 2014).....	45
Figure 2.10. Comparaison de profils verticaux en MES sur l'opération de dragage simulée au poste de Donges 6, à l'aval, en morte-eau, à l'étiage.....	52
Figure 2.11. Exemple de mise en place d'un suivi de la topographie des vasières - site de Mouton et de Pipy (Geotransfert, 2011)	54
Figure 2.12. Suivis du risque de sédimentation latérale et des opérations de dragage sur l'année 2012 (étude ACRI-HE, 2014).....	56
Figure 2.13. Suivis du risque de sédimentation latérale et des opérations de dragage sur l'année 2013 (étude ACRI-HE, 2014).....	57
Figure 2.14. Carte de synthèse sur la sédimentation latérale en estuaire de Loire	58

1. LA DYNAMIQUE HYDROSEDIMENTAIRE DU SYSTEME ESTUARIEN

1.1. DESCRIPTION DES PHENOMENES

Les installations portuaires du GPMNSN sont situées dans une zone estuarienne, lieu de rencontre entre les eaux douces du fleuve et les eaux marines de l'océan, soumise à une dynamique hydrosédimentaire complexe et changeante à différentes échelles :

- côté océan, la marée semi-diurne induit une variation oscillatoire des niveaux d'eau deux fois par jour qui génère des courants de marée alternatifs et un volume d'eau oscillant important qui remonte au-delà de Nantes. L'intensité de la marée varie : à l'échelle du mois lunaire avec une alternance de marées de vive-eau et de morte-eau ; à l'échelle des saisons avec la succession des équinoxes et des solstices et enfin à l'échelle pluriannuelle avec le cycle du Saros, de 18 ans 2/3, qui régit les variations des plus fortes marées annuelles, dont les plus importantes reviennent tous les 4 à 5 ans ;
- côté fleuve, les apports d'eau douce suivent un rythme saisonnier avec une période d'étiage en été et une période de crue en hiver. Ce régime hydrologique est également soumis à un cycle pluriannuel climatique de l'ordre de 7 années qui fait se succéder années de forte et de faible hydraulité.

La rencontre des eaux douces et salées crée alors un coin salé, les eaux marines plus denses avançant dans l'estuaire près du fond alors que l'eau douce, moins dense, coule plutôt en surface. Un mélange s'effectue également à l'interface, générant un mélange d'eau saumâtre plus ou moins prononcé selon les volumes mis en jeu de part et d'autre.

Par ailleurs, les apports solides du fleuve se retrouvent piégés à l'interface, créant une accumulation de matière en suspension (MES) dénommée bouchon vaseux. Issues de l'érosion des sols du bassin versant, les particules de vases apportées par le fleuve se regroupent entre elles au contact de l'eau salée. Plus les particules s'agglomèrent, plus leur poids augmente, favorisant leur décantation. Les sédiments déposés, mêlés de matières organiques, forment sur le fond un tapis de vase, appelé crème de vase. Sous l'action des courants de marée ou de crue, ces sédiments sont remis en suspension dans la colonne d'eau. Le dragage remet également localement des sédiments en suspension.

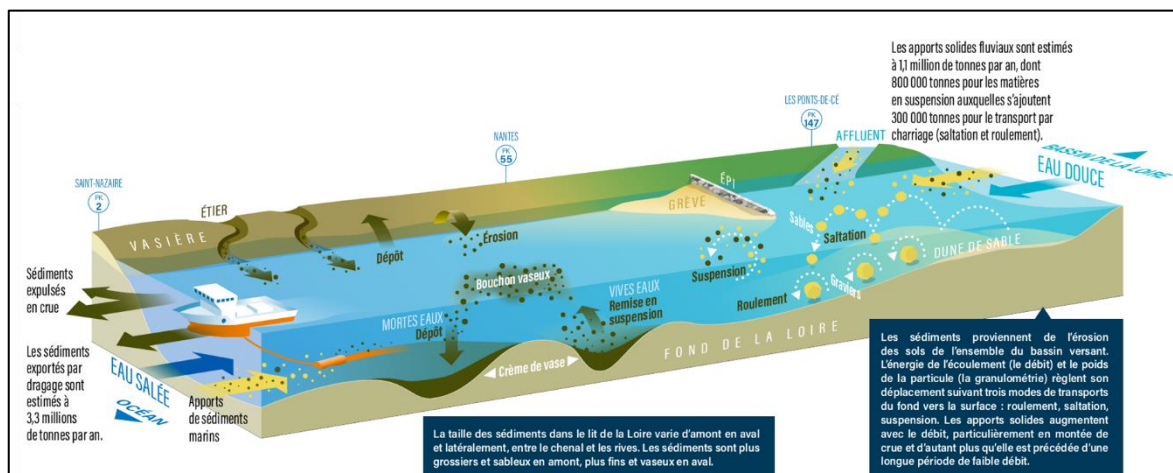


Figure 1.1. Schéma de fonctionnement du bouchon vaseux (GIP Loire Estuaire, 2018)

Le bouchon vaseux et la crème de vase forment donc les deux phases d'un même système turbide naturel propre aux estuaires :

- le bouchon vaseux correspond à la phase des matières en suspension (MES) dans la colonne d'eau,
- la crème de vase correspond à la phase déposée sur le fond de l'estuaire sous une forme néanmoins mobile et facilement 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.

		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
		Bouchon vaseux dense	$10 \leq < 30$	suspension
	Crème de vase	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

Figure 1.2. Définition de différentes classes de concentration de la masse turbide (GIP Loire Estuaire, 2014)

Les concentrations du bouchon vaseux sont susceptibles d'influer sur la qualité des eaux et notamment sur le taux d'oxygène dissous qui peut, en été, descendre sous le seuil critique de l'hypoxie (< 3mg/L) ou de l'anoxie (< 1 mg/L) qui est un seuil létal pour les poissons. Ce sont donc ces concentrations en MES qui doivent faire l'objet d'une surveillance particulière.

1.2. L'HYDROLOGIE DE LA LOIRE

Le GIP Loire Estuaire a publié, en 2020, une synthèse des tendances à long-terme de l'hydraulicité de la Loire à la station de référence de Montjean-sur-Loire, entre 1863 et 2019. Les conclusions de cette étude sont décrites ci-après.

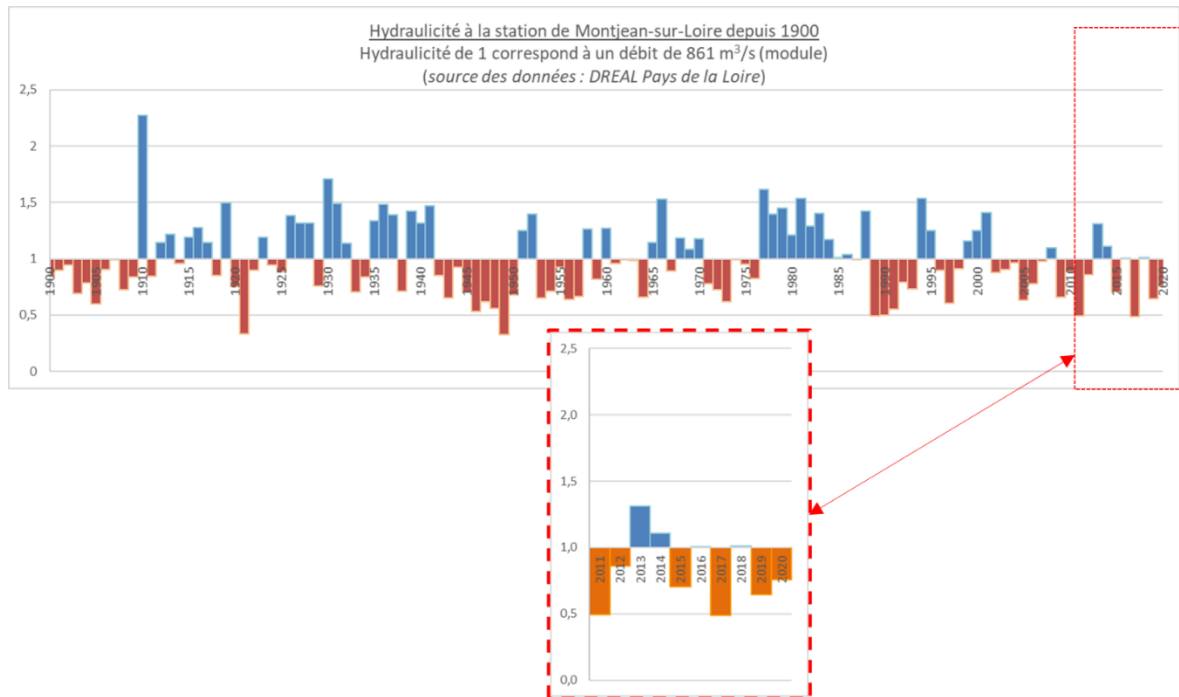
1.2.1. Apports liquides : les tendances passées à long-terme

Le suivi de l'hydraulicité sur plus de 150 ans ne met pas en évidence de tendance significative. Toutefois, de fortes variations interannuelles, marquées par l'alternance de cycles d'années sèches et d'années humides, sont observées (Figure 1.3).

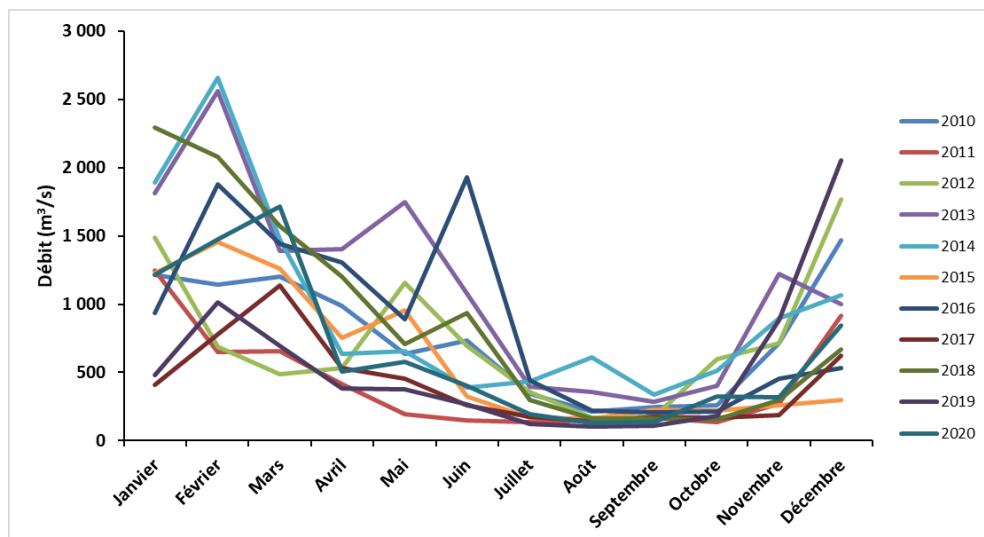
Depuis une trentaine d'années, la période est plutôt sèche, avec un déficit d'apport d'eau moyen et une plus grande fréquence des faibles débits. Le pourcentage de temps cumulé passé en étiage est plus important que depuis 1900, et le temps passé en hautes eaux ou petite crue moins important.

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE**Figure 1.3. Hydraulicité annuelle de la Loire depuis 1900****1.2.2. Evolution des débits mensuels**

Conformément aux variations saisonnières attendues, les débits sont plus élevés en hiver (crue) et au plus bas en été (étiage). Notons, toutefois, des crues relativement tardives (juin), en 2014 et 2016 (Figure 1.4).

**Figure 1.4. Variations mensuelles du débit de la Loire à la station de référence de Montjean-sur-Loire entre 2008 et 2020 (ARTELIA, 2021)**

La plupart des records les plus secs sont observés avant 1950. Les années 1949 et 1921 sont les années les plus sèches de la chronique : elles concentrent à elles seules la moitié des extrêmes de déficit mensuel. A l'inverse, 1910, 1977 et 1983 enregistrent chacune 2 records d'excédents mensuels (Figure 1.5).

L'exceptionnelle précocité de l'étiage 2011 ressort là aussi, c'est le mois de juin le plus sec depuis 1863. Le plus humide a été observé en 2016, en lien avec la crue à plus de 3700 m³/s mesurée en début de mois.

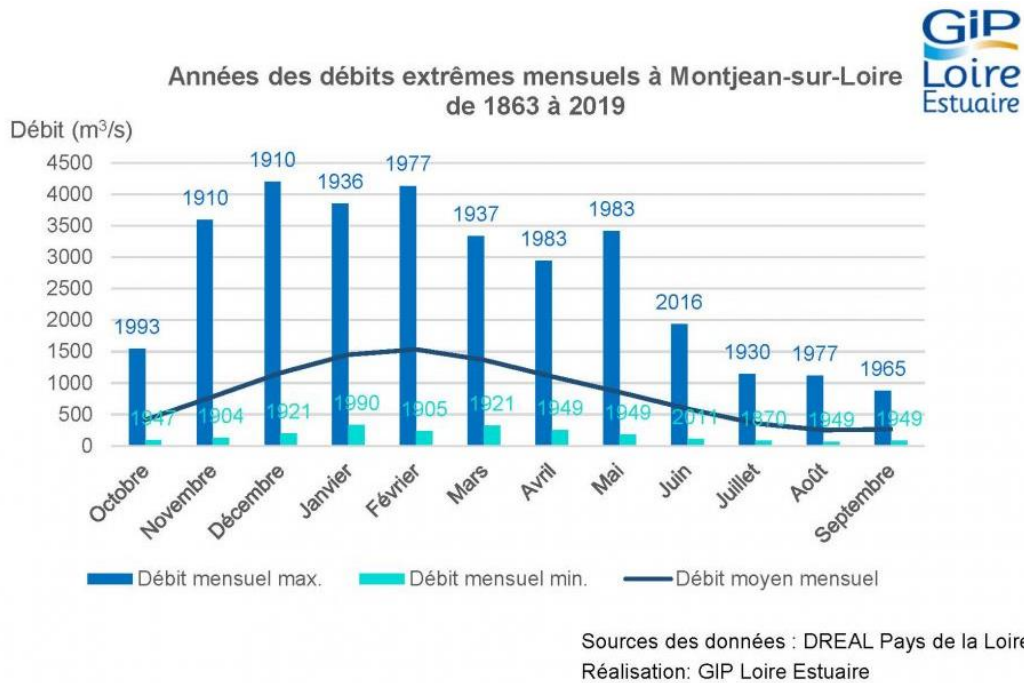


Figure 1.5. Années des débits extrêmes mensuels à Montjean-sur-Loire entre 1863 et 2019 (GIP LE, 2020)

1.2.3. Evolution des débits journaliers maximaux

Aucune tendance significative n'est mesurée sur la période 1900-2019 mais les débits journaliers maximaux annuels semblent néanmoins en baisse depuis le milieu des années 1990, ce qui correspond à la période plus sèche observée depuis une trentaine d'années (Figure 1.6).

Le débit de crue quinquennale n'a pas été atteint depuis 2004 et est mesuré seulement 2 fois ces 20 dernières années. La crue décennale n'a elle pas été mesurée depuis 1995.

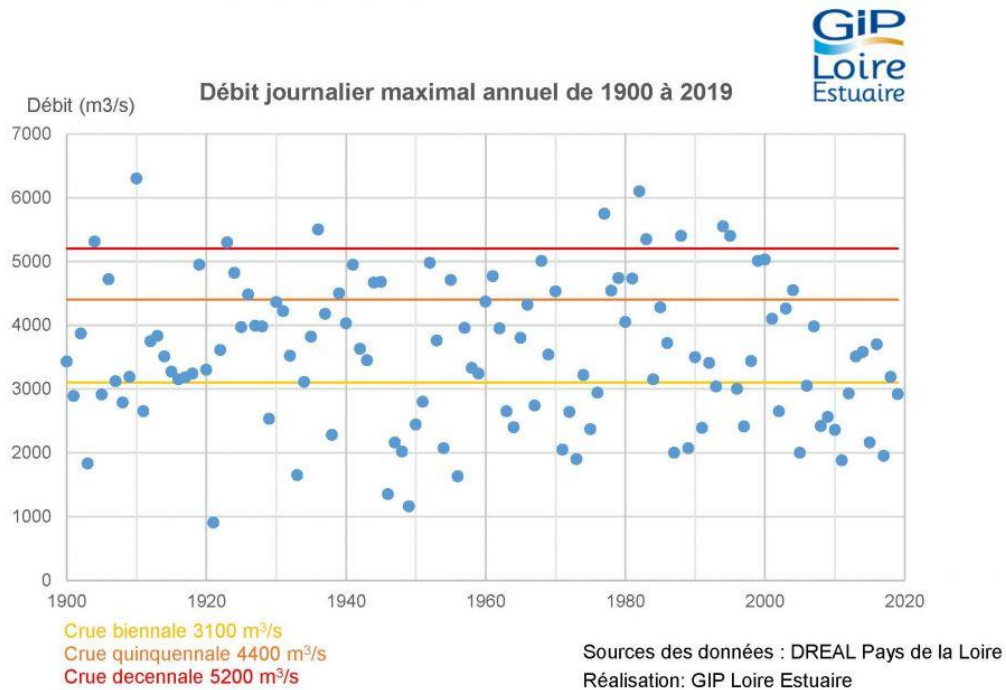


Figure 1.6. Débit journalier maximal à Montjean-sur-Loire entre 1863 et 2019 (GIP LE, 2020)

1.2.4. Apports liquides : évolutions récentes depuis 2010

Le GIP LE (2020) note qu'en 2019, le nombre de jours d'étiage sévère est parmi les plus élevés de la chronique 1863-2019. Depuis 1900, l'occurrence des débits journaliers inférieurs à 150 m³/s ne dépasse 100 jours que 6 fois : en 1904, 1906, 1947, 1949, 1950 et 2019 (GIP LE, 2020). De plus, des débits inférieurs à 100 m³/s ont été mesurés à plusieurs reprises entre le 25 août et le 04 septembre, ce qui ne s'était pas produit depuis 1991.

Plus généralement, on remarque que, depuis l'état initial du dossier de renouvellement de l'autorisation (2010), la majorité des années ont été plutôt sèches, inférieures ou égales au module (861 m³/s), surtout en 2012, 2017, 2019 et 2020 associées à des débits faibles et à l'absence de crue majeure. (Figure 1.3).

En moyenne, on observe une diminution continue du module moyen sur 10 ans depuis 1991, date à laquelle ce module est passé sous la moyenne annuelle de 861 m³/s.

Tableau 1.1. Evolution du module moyen sur 10 ans de la Loire à Montjean

Période	Module moyen (m ³ /s)
1971-1980	908
1981-1990	935
1991-2000	833
2001-2010	791
2011-2020	721

A noter cependant que le début de l'année 2021 a été marqué par une crue à plus de 4000 m³/s, débit qui n'avait pas été mesuré depuis janvier 2004. Le maximum a été mesuré le 6 février avec une moyenne journalière de 4200 m³/s. Avec un débit moyen de 2700 m³/s, le mois de février 2021 est largement au-dessus de la moyenne des mois de février depuis 1900, et comparable au mois de février 2014.

1.2.5. Apports liquides : les évolutions futures

Les études réalisées par Sogreah, en 2010, pour simuler l'évolution hydrosédimentaire de l'estuaire à moyen-terme (scénario tendanciel du GIP Loire estuaire) ont analysé les données prospectives issues du projet ICC-Hydroqual pour définir les débits classés futurs de la Loire à l'horizon 2040.

La [Figure 1.7](#) fournit différentes courbes de débits classés sur la situation future et le [Tableau 1.2](#) fournit quelques éléments statistiques.

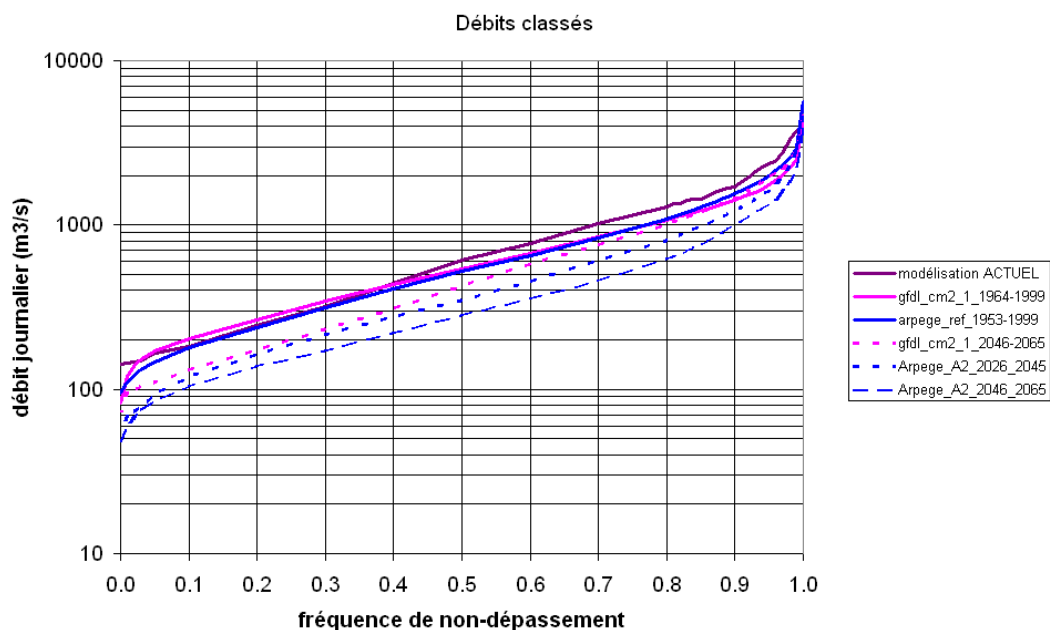


Figure 1.7. Evolution future des débits classés pour différents scénarios de changement climatique (ICC - Hydroqual, 2008)

Tableau 1.2. Evolutions futures possibles du module annuel (en m³/s) de la Loire à Montjean-sur-Loire

	Modélisation 2008 Sogreah	gfdl_cm2_1 _2046-2065	Arpège_A2_ 2046_2065	Arpège_A2_ 2026_2045
moyenne	840	640	432	549
écart-type	761	598	438	553
min	142	74	48	55
max	3980	4503	3834	4495

Le scénario fournissant les débits les plus faibles sur la période milieu de siècle (2046-2065) est le scénario Arpège A2. Cette échéance est sans doute un peu lointaine pour ce dossier de renouvellement. Le scénario Arpège sur la période 2026-2045 paraît plus approprié. A noter qu'il ne tient pas compte des opérations de soutien d'étiage qui devraient être maintenues.

1.2.6. Evolution des apports solides

L'apport d'eau douce par la Loire s'accompagne également d'apports de matières en suspension (MES) issues de l'érosion des sols du bassin versant. Les études menées par le GIP Loire Estuaire, entre 2008 et 2010, ont permis de ré-estimer les apports solides en fonction des débits liquides quotidiens de la Loire mesurés à Montjean-sur-Loire (Artelia, 2010).

Les formules suivantes, calées sur des mesures en nature, ont été finalement retenues :

- limite inférieure : 10 mg/l pour un débit inférieur à 500 m³/s ;
- crue ($Q_j > Q_{\text{moyen des 5j précédents}} + 100$) : $MES \text{ (g/l)} = 180/2000 * (Q_j - 500) + 10$;
- décrue ($Q_j < Q_{\text{moyen des 5j précédents}} - 100$) : $MES \text{ (g/l)} = 80/5000 * (Q_j - 500) + 10$;
- état intermédiaire : $MES \text{ (g/l)} = 120/3000 * (Q_j - 500) + 10$;
- limite supérieure pour les débits au-dessus de 2000 m³/s : $MES \text{ (g/l)} = -70/3500 * (Q_j - 2000) + 180$.

Le graphe ci-dessous compare ces relations avec les mesures en nature disponibles.

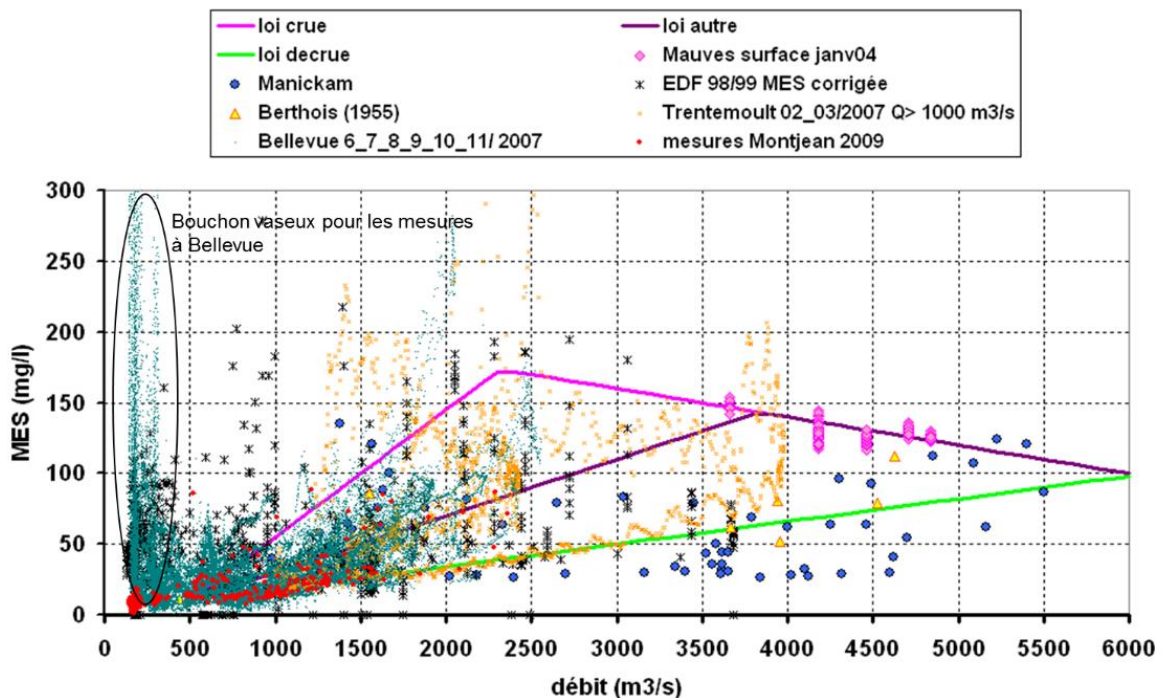


Figure 1.8. Série de mesures en nature et relations empiriques entre les apports de MES et le débit de la Loire (Artelia, 2010)

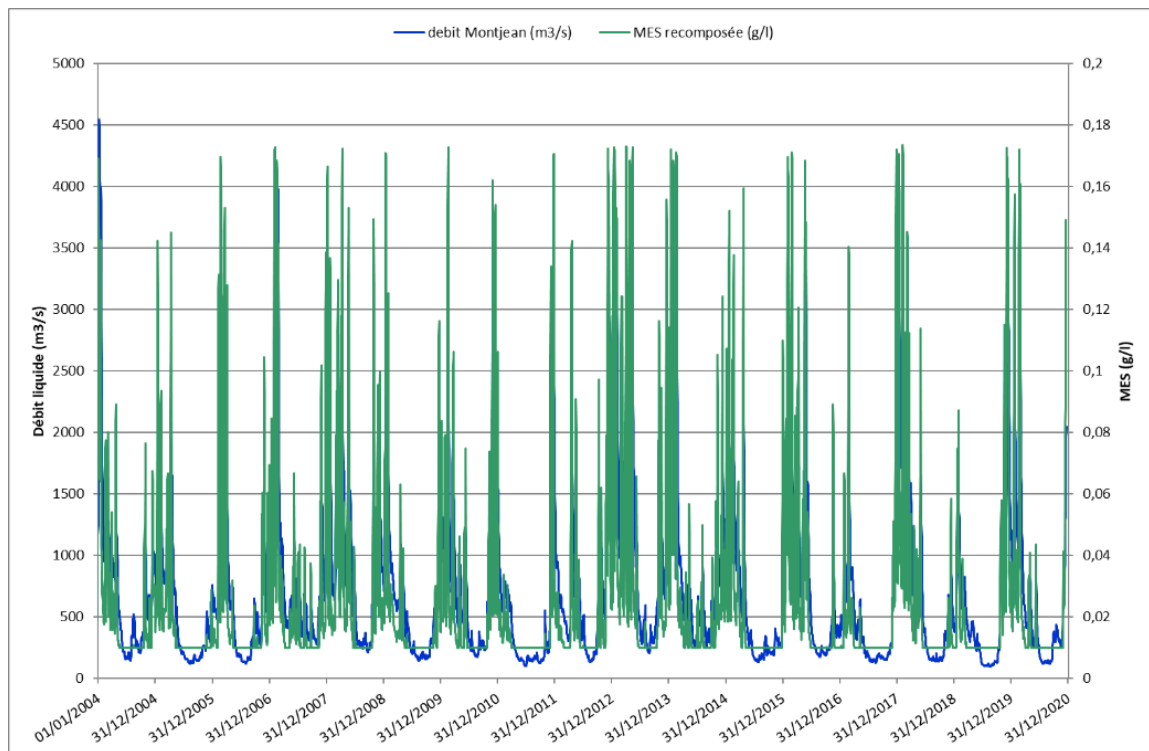


Figure 1.9. Série chronologique des débits liquides et des apports en MES de la Loire à Montjean-sur-Loire (ARTELIA, 2021)

Nous avons recalculé, les apports annuels solides à partir des chroniques de débit journalier à l'aide des relations précédentes (Figure 1.9). Ils sont en moyenne de 1,2 millions de tonnes/an. Ils varient entre 0,5 – 0,7 millions de tonnes les années sèches (2005, 2009, 2011, 2017) et entre 1,5 et 2,5 millions de tonnes les années humides (2008, 2013, 2014, 2016, 2018).

1.2.7. Apports solides : évolutions récentes depuis 2010

Les débits solides évoluent en cohérence avec les débits liquides. Ainsi, on remarque que, depuis 1991, en parallèle des débits liquides, les débits solides moyens diminuent pour atteindre des valeurs relativement faibles (3 354 t/jour sur la période 2011-2020).

Tableau 1.3. Evolution du débit solide moyen sur 10 ans de la Loire à Montjean-sur-Loire

Période	Débit solide moyen (tonne/jour)	Apport annuel moyen (million de t)
1971-1980	4 752	1,7
1981-1990	5 160	1,9
1991-2000	4 259	1,5
2001-2010	3 702	1,3
2011-2020	3 354	1,2

1.3. LE RESEAU DE MESURES SYVEL

1.3.1. Généralités

Le front de salinité et le bouchon vaseux connaissent des oscillations saisonnières importantes, liées au débit du fleuve, et des déplacements alternatifs plus réduits, à l'échelle d'une marée, qui sont suivis précisément depuis 2007 grâce au réseau de mesure SYVEL (SYstème de Veille dans l'Estuaire de la Loire), géré par le GIP Loire Estuaire.

Ce réseau est composé de 6 stations.

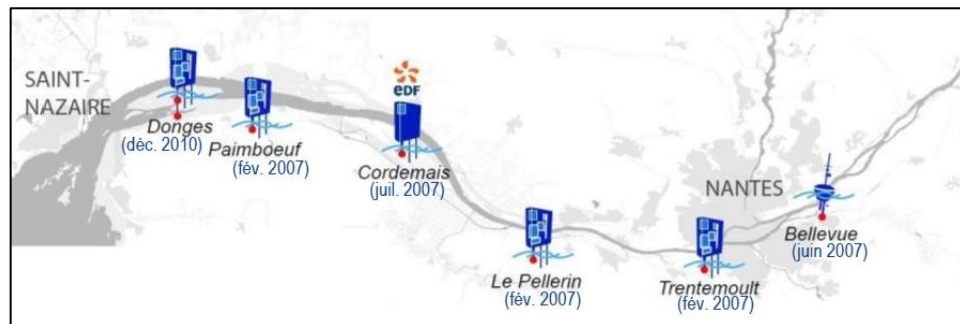


Figure 1.10. Carte de présentation du réseau SYVEL (GIP Loire Estuaire, 2017)

Chacune des stations mesure, toutes les 10 minutes à toutes les heures, la turbidité (MES), la conductivité (salinité), la concentration en oxygène dissous et la température.

Le rapport SYVEL de janvier 2020 synthétise l'ensemble des données acquises depuis 2007. Nous en re prenons ici les principales conclusions pour la salinité et la MES.

1.3.2. Suivi de l'évolution de la salinité par le réseau SYVEL

La dynamique de salinité dans l'estuaire est liée à l'équilibre mer-fleuve.

En effet, l'évolution de la salinité au cours de la période 2007-2020 est dominée par les conditions hydrologiques. Par exemple, lors des années très sèches, avec des étiages prolongés (2011, 2015, 2017, 2019), des concentrations en sel supérieures à 1 g/l (limite de salure des eaux), sont observées plus de la moitié du temps à Cordemais. Pour des années humides (2013), ce pourcentage est moitié moindre, et de 29% à Cordemais.

La période 2007-2020 est marquée par un événement météorologique majeur avec, en 2010, la tempête Xynthia qui a entraîné, avec force, l'océan dans le fleuve provoquant un pic de salinité dans l'estuaire, le 28 février. La valeur de 5,9 g/l est mesurée à la station de Cordemais, alors qu'une valeur maximale de 1 g/l était attendue dans la continuité des observations faites les heures précédant l'événement.

Des salinités importantes sont mesurées entre juillet et septembre 2019 sur les stations SYVEL. Les moyennes journalières sur les stations amont (Bellevue, Trentemoult et Le Pellerin) dépassent les records estivaux précédents, observés en 2011. En 2019, les salinités journalières maximales sur ces stations sont respectivement de 0,27 ; 0,85 et 3,69 g/l. En 2011, ces valeurs étaient de 0,24 ; 0,73 et 3,67 g/l. A Bellevue, le seuil de 0,5 g/l (correspondant au front de salinité) a été dépassé à plusieurs reprises entre le 31 août et le 03 septembre 2019, pendant des durées maximales de 40 minutes. La salinité maximale instantanée atteint 0,64 g/l le 31 août 2019.

Sur les stations aval, les records journaliers sont mesurés en 2009 (23,05 g/l) à Paimboeuf et en 2016 (25,98 g/l) à Donges.

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

Les fortes salinités observées sont systématiques corrélées aux faibles débits mesurés à Montjean-sur-Loire,

Sur la période récente 2010-2020, des valeurs de salinité plus élevées ont été observées en lien avec les années globalement plus sèches (débits faibles) et plus chaudes (température élevées).

Il n'est pas observé depuis 2007 et la mise en place du réseau SYVEL, de progression du front de salinité (0,5 g/L) vers l'amont. Ce front de salinité n'a jamais atteint la station de Bellevue, hormis lors de l'été 2019 (année exceptionnellement chaude et sèche, cf. paragraphe 1.3.5)

Les évolutions temporelles de la salinité sur 2007-2016 sont fournies sur les figures suivantes :

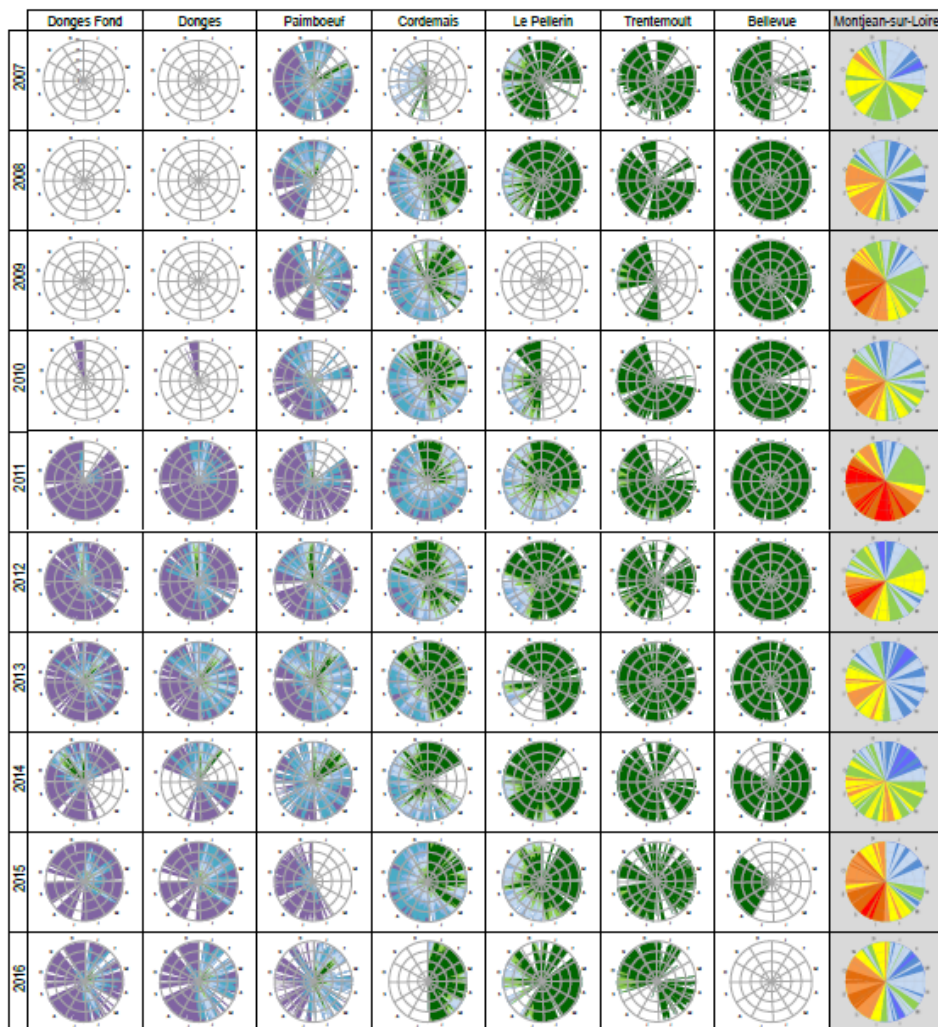


Figure 16 : Distribution journalière de la salinité par an et par station (sources des données : GIP Loire Estuaire, EDF) et débit à Montjean-sur-Loire (source des données : DREAL Pays de la Loire) – (réalisation : GIP Loire Estuaire)



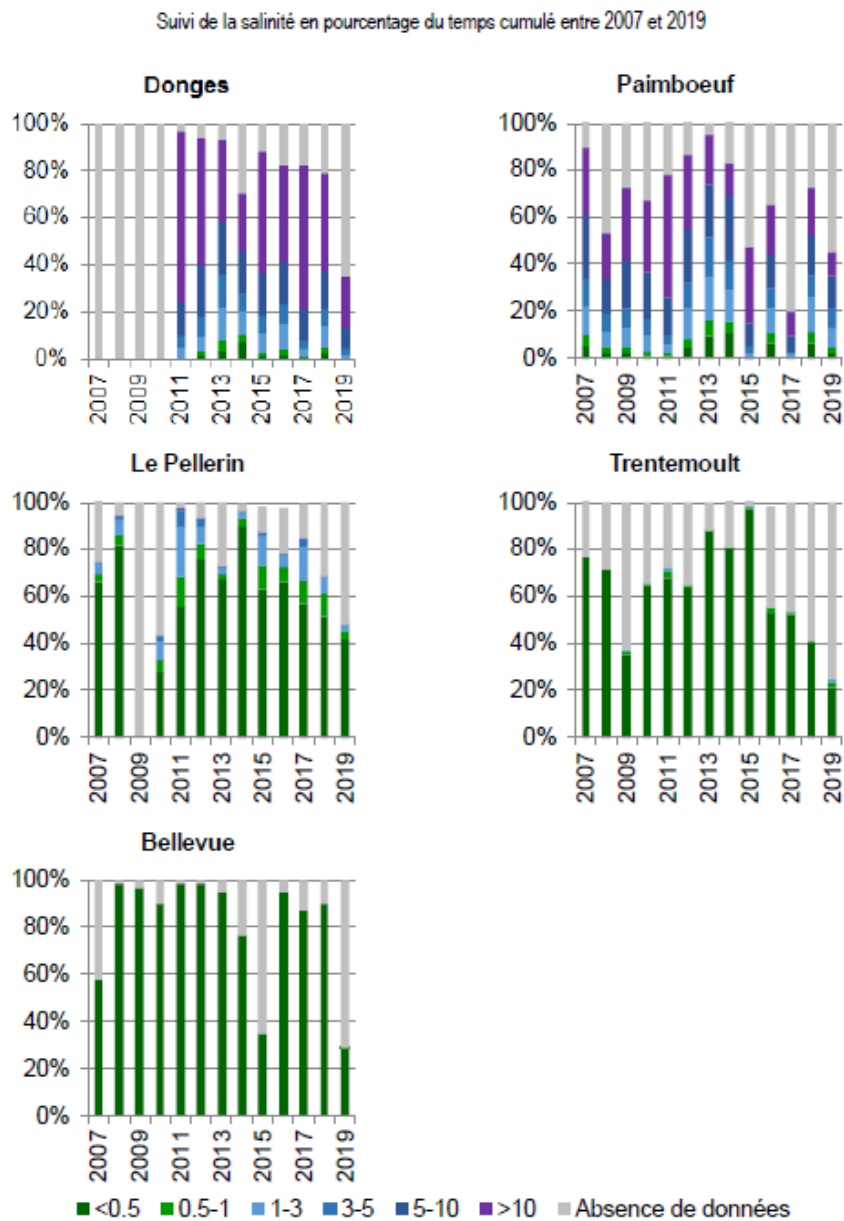
Figure 1.11. Distribution journalière de la salinité par an et par station sur 2007-2016 (GIP Loire Estuaire, 2017)

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

Le suivi de la salinité entre 2007 et 2019 est fournie sur les graphiques suivants



Source des données : GIP Loire Estuaire

Figure 1.12. Suivi de la salinité en pourcentage du temps cumulé entre 2007 et 2019 (GIP Loire Estuaire, 2017)

1.3.3. Suivi de l'évolution des MES par le réseau SYVEL

Les variations en matières en suspension (MES) sont principalement liées à la position du bouchon vaseux conditionnée par les apports en eau du fleuve et les coefficients de marée.

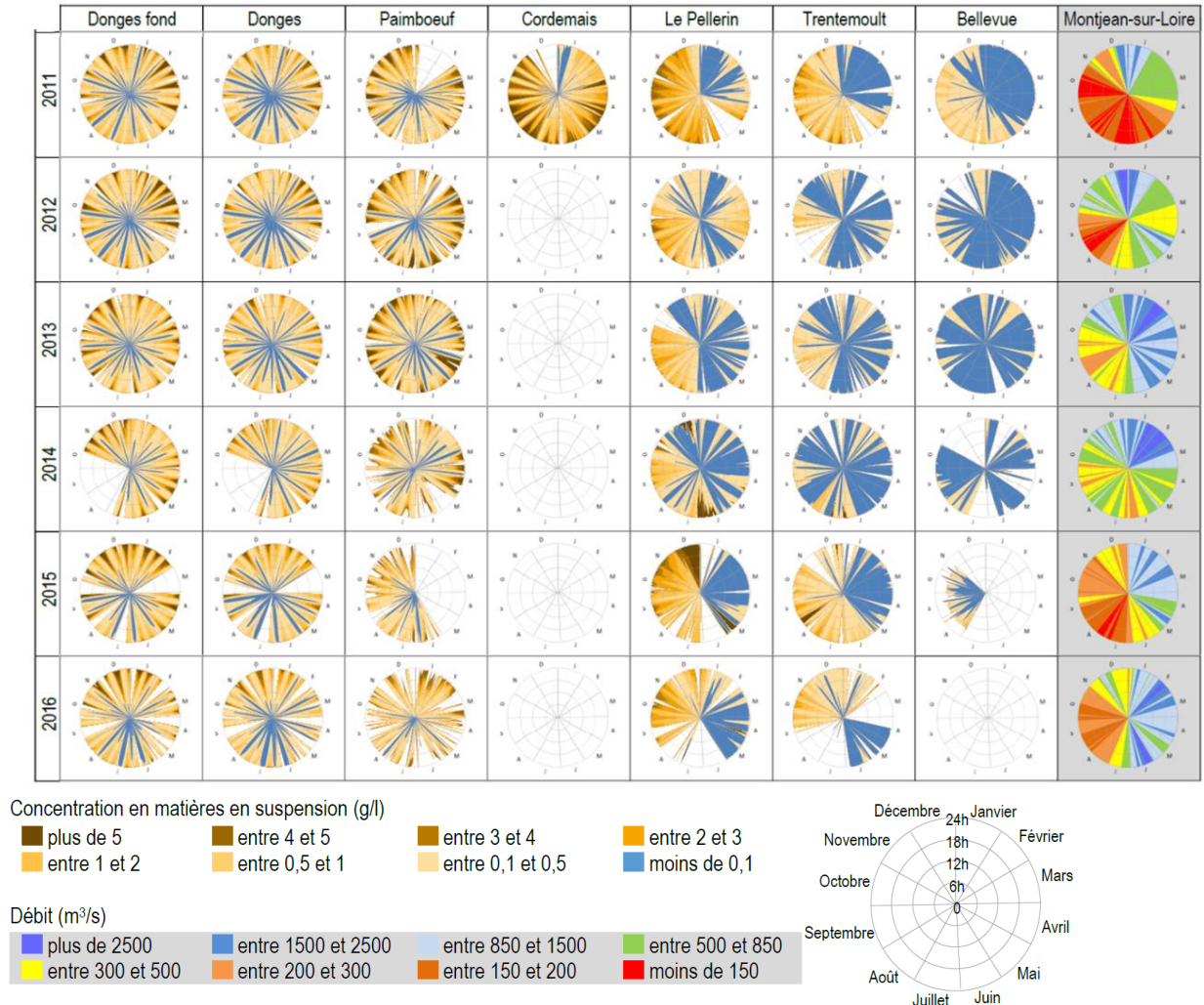


Figure 1.13. Distribution journalière des concentrations en MES, par an et par station, sur la période 2011-2016 (GIP Loire Estuaire, 2017)

L'analyse par le GIP LE de ces données conduit aux conclusions suivantes :

En débit moyen (850 m³/s), le bouchon vaseux est essentiellement situé entre Cordemais et Paimboeuf, pour des coefficients de marée moyens (65-75). Lorsque le fleuve est en crue (à partir de 1 500 m³/s), une partie des sédiments est repoussée vers l'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 (200 m³/s), le bouchon vaseux est centré sur Le Pellerin et s'étale.

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 des 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

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

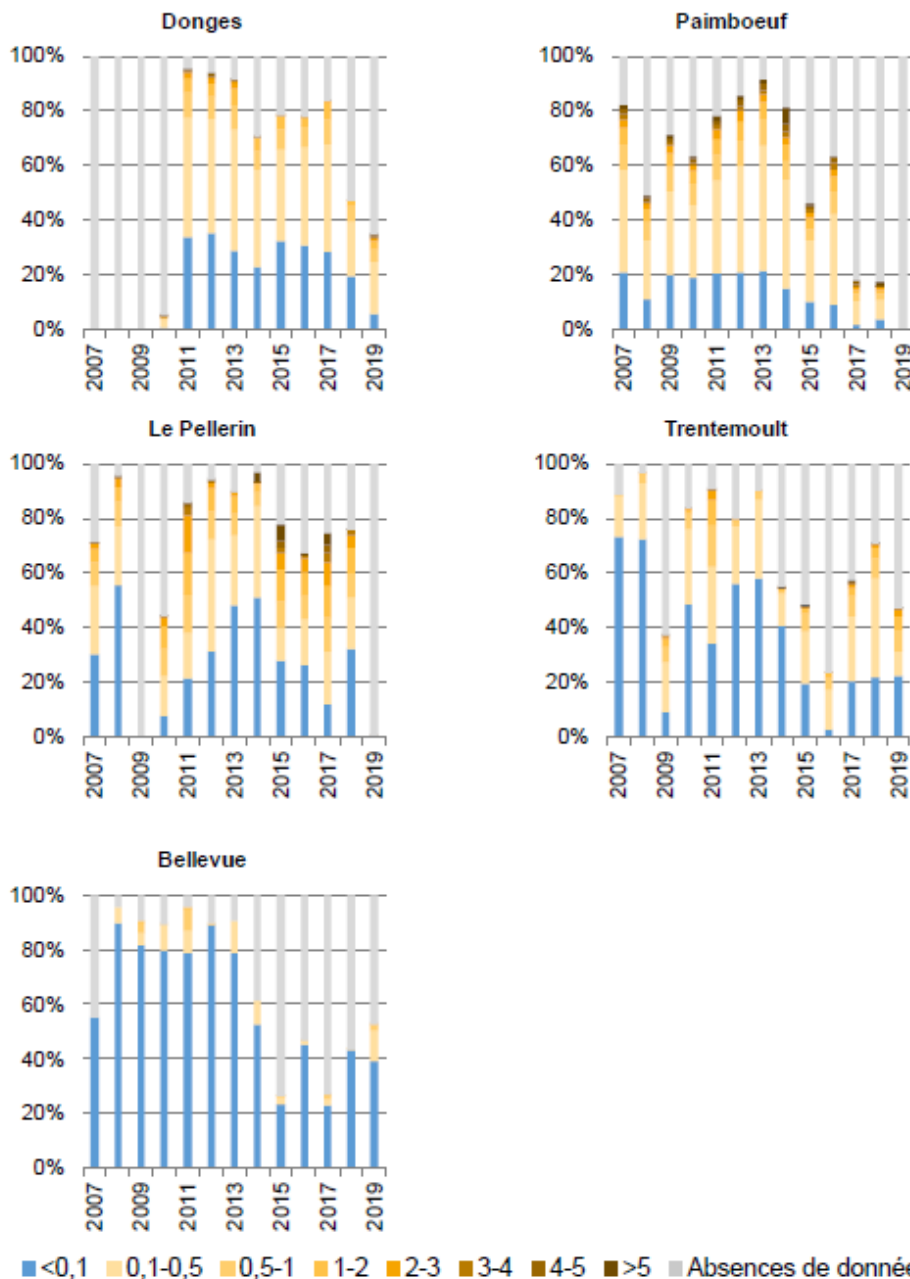
Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

Ainsi, lors des années très sèches, avec des étiages prolongés (2011, 2015, 2017, 2019), des concentrations en matières en suspension supérieures à 0,5 g/l sont observées plus d'un tiers du temps, entre 40% 50% au Pellerin, voire jusqu'à près de 80% en 2019. Pour des années humides (2013), ce pourcentage est moindre et atteint 16 % au Pellerin.

Il n'est pas observé d'évolution significative sur les années récentes (2010-2020), la teneur en MES étant toujours conditionnée par la position du bouchon vaseux. On rappellera que l'on a affaire sur cette période à des années globalement sèches et donc à des débits plus faibles ce qui a décalé le bouchon vaseux vers en partie amont de l'estuaire.

Suivi de la concentration en matières en suspension en pourcentage du temps cumulé entre 2007 et 2019



Source des données : GIP Loire Estuaire

Figure 1.14. Suivi de la concentration en MES en pourcentage de temps cumulé le long de l'estuaire, pour chaque station sur la période 2007-2019 (GIP Loire Estuaire, 2020)

1.3.4. Le bouchon vaseux

A partir des mesures de MES, le GIP LE a défini le bouchon vaseux comme étant la zone où les concentrations sont supérieures à 1 g/l. Des graphes établissant une relation entre débit du fleuve et position du bouchon vaseux a été établie par le GIP Loire-Estuaire pour les conditions de vives-eaux et de mortes-eaux.

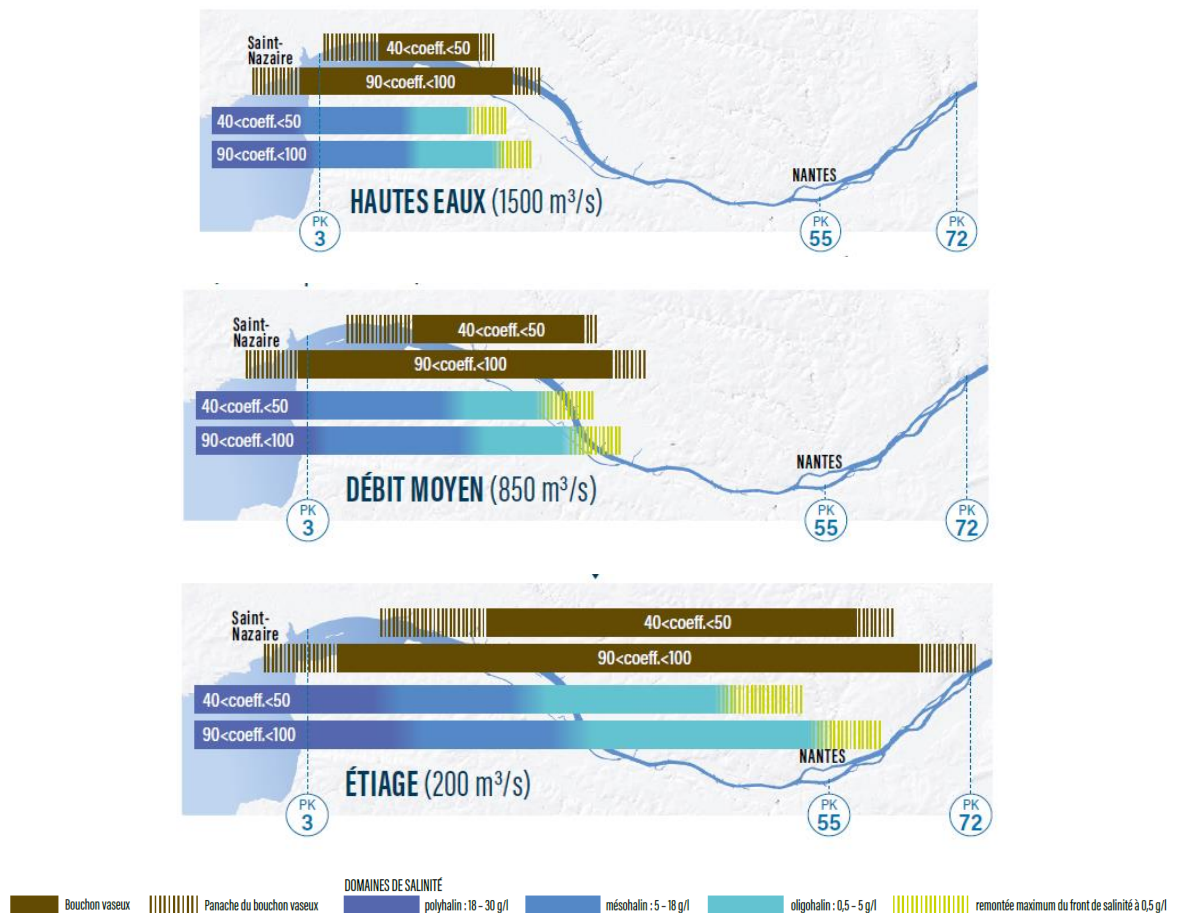


Figure 1.15. Localisation la plus fréquente du bouchon vaseux en surface en fonction du débit et du coefficient de marée (GIP Loire Estuaire, 2018)

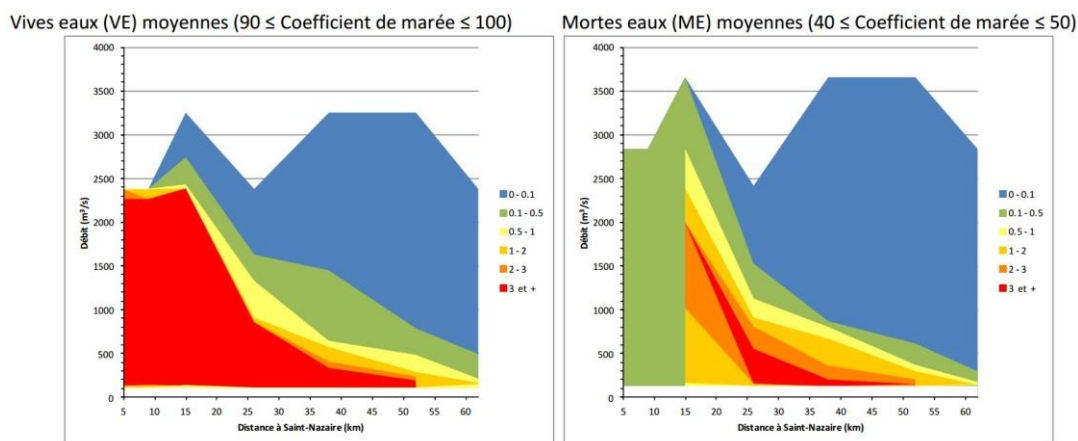


Figure 1.16. Emprise maximale du bouchon vaseux sur la période 2007-2012, suivant le débit, en excluant les apports de crue (source : GIP Loire estuaire, 2015)

Au final, l'analyse des mesures du réseau SYVEL indique qu'au cours d'une année moyenne, la masse de vase en suspension dans l'estuaire est minimale en période de hautes eaux combinée à des mortes-eaux et estimée à quelques dizaines de milliers de tonnes ; elle atteint son maximum, près de 1 million de tonnes (Mt), lors des premières vives eaux en débit d'étiage. **Entre 2007 et 2017, aucune tendance à l'augmentation ou à la diminution du bouchon vaseux ne se dessine (GIPLE, 2018).** La variabilité interannuelle des débits fluviaux est le principal paramètre qui explique les différentes localisations du bouchon vaseux et son temps de présence.

1.3.5. Détails sur les étés 2019 et 2020

Un épisode de canicule a été observé fin juin 2019 sur le territoire, marqué par des apports d'eau très faibles - plus de 2 fois inférieurs à la moyenne depuis 1900 sur la même période (janvier à août), jusqu'à atteindre des valeurs exceptionnelles. En conséquence, l'étiage a été marqué par :

- sa durée : les mois de juillet, août et septembre sont parmi les plus secs depuis 1900. Les débits journaliers sont restés inférieurs à 130 m³/s pendant près de 3 mois consécutifs ;
- son intensité : le seuil des 100 m³/s (débit journalier) n'a pas été franchi pendant 6 jours (entre le 26/08 et le 5/09).

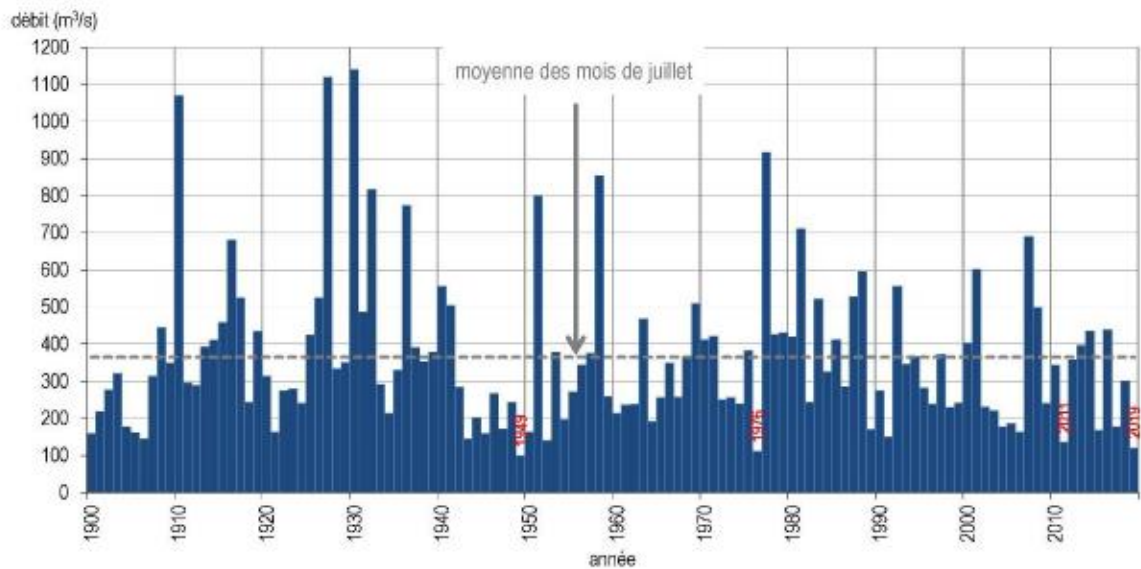
Il faut remonter aux années 1990 – 1991 pour retrouver des conditions similaires. Depuis 1900, les mois de juillet et août 2019 sont les plus secs avec les années 1976, 1990, 1991 2011 et 2019.

Associées à ces faibles débits, des salinités importantes sont mesurées entre juillet et septembre 2019 sur les stations SYVEL. Les moyennes journalières sur les stations amont (Bellevue, Trentemoult et Le Pellerin) dépassent les records estivaux précédents, observés en 2011.

Ces faibles débits ont également entraîné une remontée du bouchon vaseux sur l'amont du réseau. À Bellevue et Trentemoult, les concentrations moyennes journalières en MES sont proches des records de 2011 (respectivement 0,6 et 1,9 g/l), à plusieurs reprises entre mi-juillet et début septembre.

Par ailleurs, les fortes chaleurs ont entraîné l'augmentation des températures de l'eau, atteignant des valeurs entre 27 et 31°C. Des records sont mesurés sur les stations amont, avec à Bellevue une température maximale instantanée mesurée de plus de 31°C.

Avec un débit moyen de 655 m³/s et une hydraulité de 0,8 l'année 2020 a également été plutôt sèche sans atteindre les records de 2019 (GIPLE, 2021). Les apports en eau ont été inférieurs à la moyenne depuis 1900 durant toute l'année, sauf en mars. Les déficits d'apport en eau ont été centrés sur la période d'avril à septembre. Août et septembre ont été les mois les plus secs ; Avec respectivement 133 et 135 m³/s, ils apportent deux fois moins d'eau que la moyenne de ces mois.



Avec un débit moyen de 121 m³/s, le mois de juillet 2019 est le 3^e mois de juillet le plus sec depuis 1900, après 1949 (100 m³/s) et 1976 (112 m³/s).

Document réalisé par le GIP Loire Estuaire, le 3/09/2019

Figure 1.17. Débit moyen du mois de juillet à la station de Montjean-sur-Loire depuis 1900 (source : GIP LOIRE estuaire, 2019)

1.4. LE SUIVI DE LA CREME DE VASE

Le suivi de la crème de vase est effectué régulièrement par le service en charge des dragages du GPMNSN au moyen, d'une part de levés du profil en long du chenal à l'aide d'un écho-sondeur bifréquence et, d'autre part, de sondages gamma-densimétriques sur la verticale dans les zones portuaires les plus envasées.

Une étude spécifique a été réalisée en 2008, à l'initiative du GIP Loire Estuaire, pour analyser les données disponibles à partir notamment de 130 sondages bi-fréquence levés, par le GPMNSN, entre 1997 et 2007 (Hocer, 2009). Leur analyse détaillée a permis de définir les trois classes de concentration de la crème de vase : liquide (30 à 100 g/l) ; stricto sensu (100 à 300 g/l) et consolidée (300 à 500 g/l). Des estimations d'épaisseur de couche et de masse en sédiments secs ont ensuite été fournies pour 30 cas représentatifs.

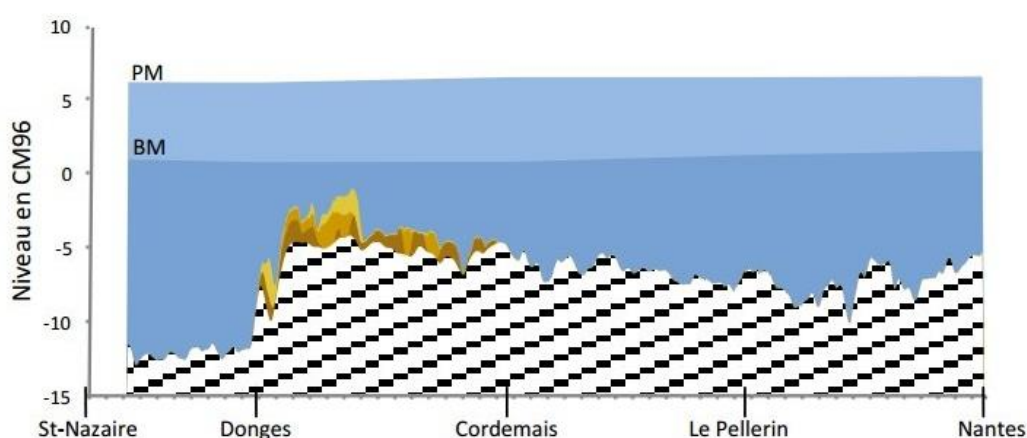
On peut tirer de ces résultats les ordres de grandeur suivants :

- **la couche de crème de vase liquide** a fréquemment une épaisseur de l'ordre de 2 à 3 m et peut atteindre 4 à 5 m. La masse de sédiments secs peut atteindre 0,4-0,5 Mt. Cette couche de faible densité n'est pas un obstacle pour la navigation ;
- **la couche de crème de vase stricto sensu** occupe une épaisseur moyenne de 1 à 2 m (jusqu'à 3,5 m) avec des masses plus conséquentes pouvant atteindre 0,6 à 1,0 Mt ;
- enfin, **la couche consolidée**, comprise entre 0,5 et 2 m, concentre une grosse partie de la masse des sédiments qui peut aller de 0,7 à 1,8 Mt. C'est cette couche qui doit faire l'objet de l'essentiel des travaux de dragage d'entretien.

Le tableau suivant fournit le détail des quatre relevés pour lesquels la masse totale de crème de vase dépasse un million de tonnes.

Tableau 1.4. Estimations de la masse de crème de vase pour 4 situations (en Mt)

	9 juin 2004	9 mai 2007	1 ^{er} août 2007	24 octobre 2007
Crème de vase liquide (CVL)	0,26	0,10	0,17	0,01
Crème de vase stricto sensu (CVSS)	0,38	0,95	0,58	0,29
Crème de vase consolidée (CVC)	1,04	0,02	0,67	1,79
Total	1,68	1,07	1,42	2,09

**Figure 1.18. Relevé des épaisseurs de crème de vase. Situation du 1^{er} août 2007 : CVL en jaune, CVSS en orange, CVC en brun (source : GIP LOIRE estuaire)**

Par ailleurs, HOCER (2009) a estimé la masse en crème de vase fluide et stricto sensu à partir de 120 points de mesures à la sonde densimétrique relevés en mars 2000, en morte-eau. Les calculs conduisent à une fourchette de 0,9-2,3 Mt avec une valeur vraisemblable de 1,2 Mt. Cette valeur recoupe l'estimation précédente faite le 9 mai 2007.

1.5. BILAN SEDIMENTAIRE EN MES

Le bilan sédimentaire en MES dans l'estuaire en 2011 a été établi au moyen d'une modélisation numérique hydrosédimentaire 3D de l'estuaire, réalisée à l'initiative du GIP Loire –estuaire en 2008-2011, qui a permis d'estimer ces apports pour une année hydrologique composite représentative, construite à partir de la crue de 2007 et de l'étiage 2009.

Le modèle est construit sur une topo-bathymétrie 2008-2010. Une procédure simplifiée de dragage des sections aval 1 à 6 a été mise en place dans le modèle. Elle consiste à maintenir quotidiennement une cote objectif uniforme de -12,4 m CM dans le chenal. Les quantités draguées sont alors clapées sur le site d'immersion de la Lambarde (Artelia, 2011).

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

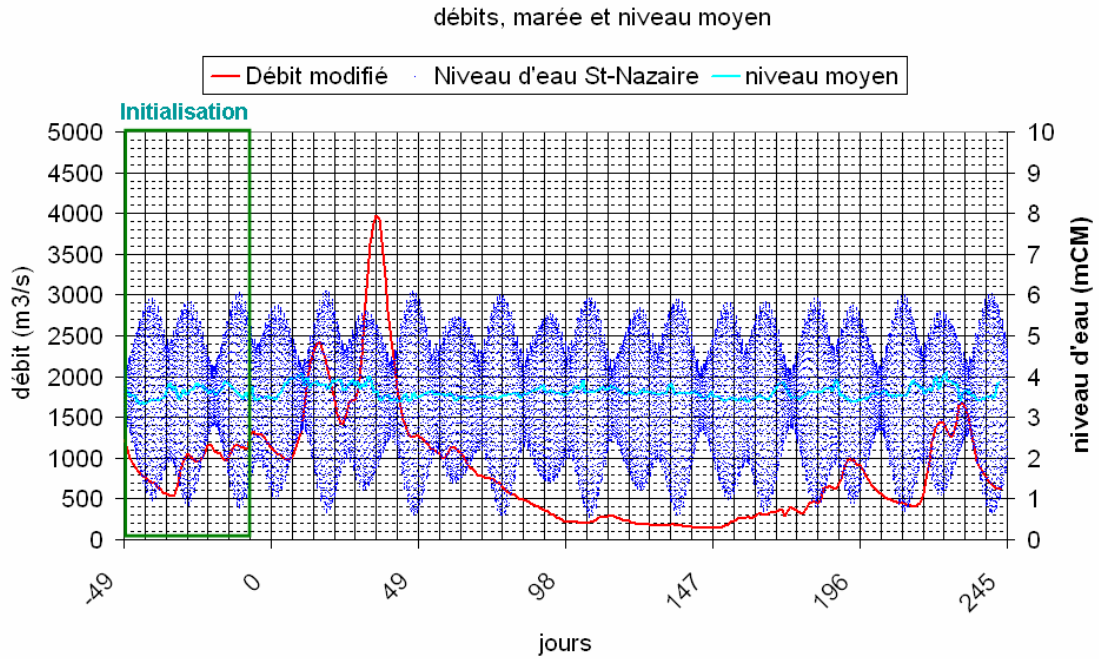


Figure 1.19. Forçages en niveau à l'aval et débits liquides de Loire en amont pour la simulation de l'état actuel (Artelia, 2009)

La période d'analyse des calculs (après la période d'initialisation) a été divisée en quatre séquences et un bilan sédimentaire a été établi pour chacune d'elles.

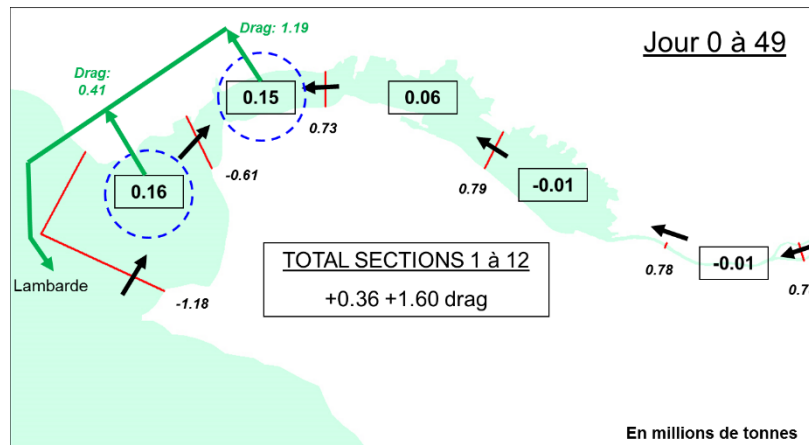


Figure 1.20. Simulation bilan sédimentaire Phase 1 : crue à décrue (d'après Artelia, 2011)

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

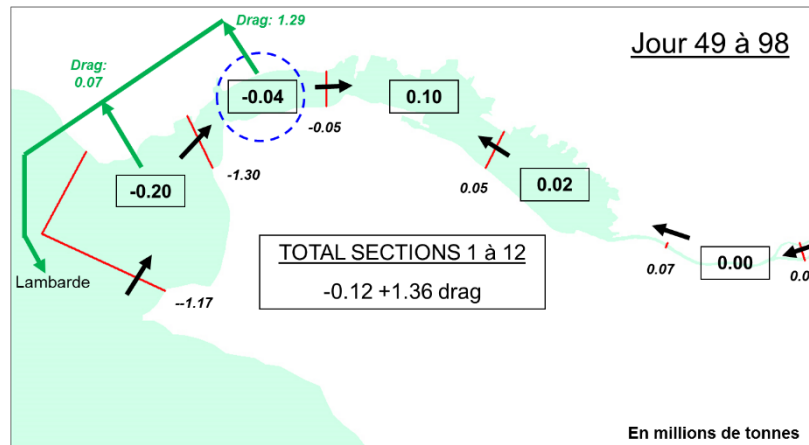


Figure 1.21. Simulation bilan sédimentaire Phase 2 : décrue à bas débits (d'après Artelia, 2011)

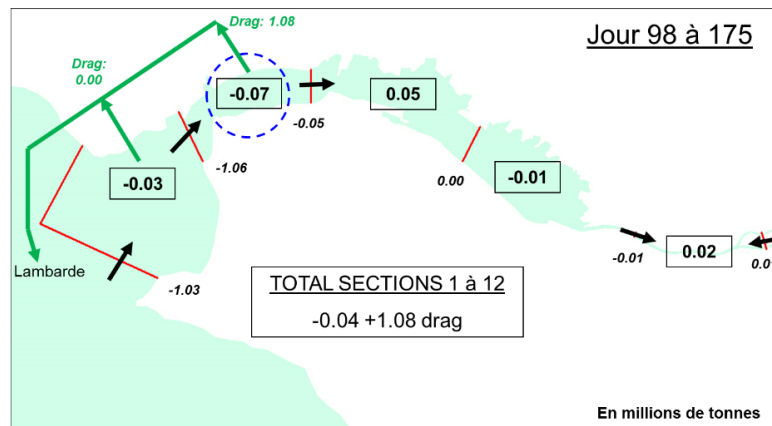


Figure 1.22. Simulation bilan sédimentaire Phase 3 : étiage à bas débits (d'après Artelia, 2011)

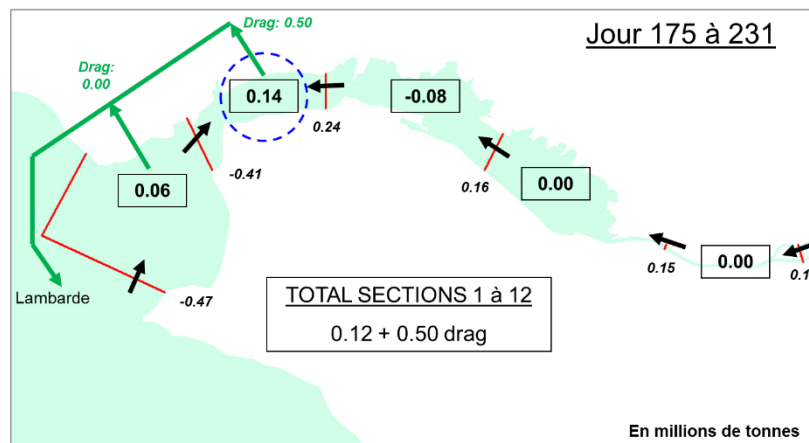


Figure 1.23. Simulation bilan sédimentaire Phase 4 : bas débits à petite crue (d'après Artelia, 2011)

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

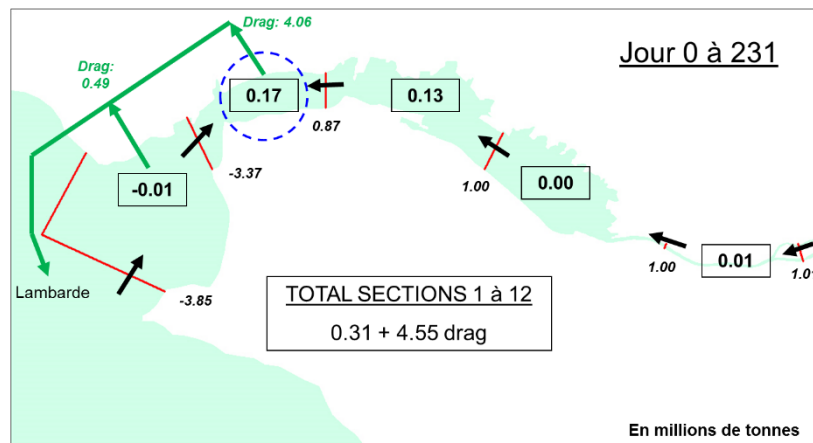
R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

Figure 1.24. Simulation bilan sédimentaire total (d'après Artelia, 2011)

Au total, il s'est déposé 4,86 millions de tonnes entre les sections 1 et 12 du chenal dont 1,01 Mt d'apport amont et 3,85 Mt d'apport aval, ce qui confirme la prédominance des apports aval. La prédominance des apports en sections 4, 5 et 6, observée en nature, se retrouve bien dans la simulation. Les apports en crue de la Loire pendant les phases 1 et 4 sont également bien visibles dans les résultats.

Les dragages obtenus par simulation sont légèrement plus importants qu'en réalité (4,55 Mt contre 4,1 Mt dans le scénario de référence utilisé dans le dossier de renouvellement de 2012) car la programmation des dragages dans le modèle visait à maintenir quotidiennement la cote du chenal sans limitation des moyens disponibles en pratique.

La masse maximale du bouchon vaseux obtenue en vives-eaux est de 0,9 million de tonnes, en cohérence avec les observations nature.

Ce bilan sera prochainement mis à jour en 2021-2022 grâce à la nouvelle modélisation 3D hydrosédimentaire de l'estuaire que met actuellement en place le GIP Loire estuaire.

2. INCIDENCES DES DRAGAGES SUR LES MATIERES EN SUSPENSION (MES) ET LE BOUCHON VASEUX

2.1. SUIVI DES OPERATIONS DE DRAGAGE PAR INJECTION D'EAU

Les pratiques de dragage par Drague Aspiratrice Stationnaires (DAS) et Drague par Injection d'Eau (DIE) et les volumes associés ont évolué ces dernières années. Ainsi, depuis l'arrêté interpréfectoral d'autorisation de dragage et d'immersion du 24/04/2013, le GPMNSN pratique régulièrement le dragage par DIE dans la section amont de l'estuaire, le chenal de Nantes, et surtout dans le chenal et les souilles de Montoir-Donges. Ces dernières années, l'utilisation de la DIE a augmenté alors que celle de la DAS a diminué.

Ce changement a été précédé par d'importantes campagnes de suivi pour évaluer l'impact de cette nouvelle pratique sur le bouchon vaseux et les teneurs en matières en suspension (MES) dans l'estuaire.

2.1.1. Principe de la DIE et de ses effets généraux

L'action d'une drague à injection d'eau dans la couche de sédiments se décompose en trois phases :

- injection d'eau à basse pression dans la couche de sédiments,
- génération du courant de densité,
- déplacement des sédiments.

L'injection d'eau à basse pression, pompée en surface et injectée dans la couche de sédiments, a deux actions :

- désolidarisation ou décohésion des sédiments,
- remise en mobilité des sédiments.

La mixture ainsi créée présente une densité supérieure à celle du milieu. Un courant de densité se forme donc, entretenu par l'action de la drague, les courants locaux sur le fond et la morphologie du site (pentes).

Le principe du dragage à injection repose sur trois éléments fondamentaux, desquels découlent l'ensemble des incidences potentielles :

- modification des fonds,
- génération d'un courant de densité (principe de la technique),
- génération de MES.

Ces trois effets directs du dragage à injection d'eau peuvent avoir un impact sur la qualité de l'eau (turbidité, contaminants...).

2.1.2. Rappel des suivis environnementaux entre 2006 et 2011

Dans l'estuaire de la Loire, un suivi environnemental des dragages par injection d'eau a été réalisé annuellement, entre 2006 et 2011.

D'année en année, le protocole de suivi a été adapté en fonction des résultats de chaque campagne, de façon à optimiser les méthodes et moyens mis en œuvre. En 2006, le service de la Police de l'Eau a fourni des recommandations en termes de suivi et, entre 2007 et 2011, le GIP Loire Estuaire a été associé à la définition du suivi et à l'examen de ses résultats. L'évolution du protocole de suivi est synthétisée dans le tableau suivant.

Tableau 2.1. Evolution des protocoles de suivi du dragage à injection d'eau depuis 2006

<p>Protocole 2006 (Créocéen)</p> <p>Nantes. Etiage (135m³/s). Suivi en morte-eau, au jusant, avant et pendant le dragage.</p> <p>Zone suivie jusqu'à 600 m vers l'aval.</p> <p>Prélèvement d'eau + mesures sonde (turbidité, oxygène dissous) près du fond et à mi-profondeur</p>
<p>Protocole 2007 (Créocéen)</p> <p>Extension du suivi vers l'aval et l'amont.</p> <p>Suivis en flot et jusant, avant et après le dragage.</p> <p>Suivi en morte-eau et en vive-eau.</p> <p>Situation de dragage à l'aval (Montoir).</p>
<p>Protocole 2008 (Créocéen)</p> <p>Abandon du suivi à Montoir. Concentration des moyens à l'amont.</p> <p>Abandon du suivi mobile.</p> <p>Suivi continu à partir des sondes multi-paramètres (stations du réseau SYVEL + stations complémentaires), sur un linéaire de 26 km, pendant 7 semaines.</p>
<p>Protocole 2009 (Créocéen)</p> <p>Retour au suivi mobile + couplage avec le suivi en des stations fixes (réseau SYVEL + stations supplémentaires).</p> <p>Mesures à mi-profondeur privilégiées (peu d'impact en surface, saturation au fond).</p> <p>Mesures en continu de juillet à septembre.</p>
<p>Protocole 2010 (Hocer)</p> <p>Poursuite du suivi aux stations fixes (mesures en continu de début juillet à début octobre).</p> <p>Exploitation des bandes de sondes du GPMNSN pour localiser et quantifier la quantité de crème de vase – Suivi des épaisseurs de crème de vase le long de l'estuaire.</p>
<p>Protocole 2011 (Hocer)</p> <p>Poursuite du suivi en continu aux stations fixes.</p> <p>Suivi du courant de densité sur le fond : profils transversaux entre La Madeleine (Nantes) et Cordemais (mesures ADCP¹ + mesures au sondeur bi-fréquence).</p>

La synthèse des connaissances issues de ces suivis est rappelée succinctement ci-après.

¹ Acoustic Doppler Current Profiler

2.1.3. Devenir à court-terme : courant de densité

Le dragage à injection d'eau génère un courant de densité pour déplacer les sédiments fluidifiés. Ce courant se déplace sur le fond marin, sur une épaisseur de 1 à 3 m suivant les cas. Le courant de densité est généralement généré dans le même sens que les courants locaux (par exemple au jusant, vers l'aval) pour profiter de leur force pour le rendre plus efficace.

D'une manière générale, le courant de densité est établi de manière temporaire, uniquement pendant la durée de fonctionnement de la drague. Il peut se propager, suivant la nature des sédiments, la morphologie du site, et l'hydrodynamique locale, à une distance allant de quelques dizaines de mètres (50m, estuaire de la Weser) à quelques centaines de mètres (200m dans l'estuaire du Medway, 300m dans l'estuaire de la Gironde) d'après la bibliographie.

L'effet du dragage à injection d'eau est de fluidifier, remettre en mobilité les sédiments. En Loire, cet effet a été identifié soit sous forme d'une réduction de l'épaisseur de la crème de vase, soit sous forme d'une couche de vase très peu dense, non assimilable à de la crème de vase.

Cependant, l'effet du dragage est peu différenciable des évolutions naturelles de la crème de vase qui sont caractérisées par : interfaces en voie de consolidation, interfaces mobiles et évolutives dans le temps avec déconsolidation sous forme de crème de vase liquide et de couche fluide peu dense. S'il est évident que le dragage favorise la déconsolidation des sédiments, il semble très difficile de dissocier son impact de celui des variations tidales, quand bien même il est réalisé en situation de mortes-eaux, **du fait qu'il est difficile de définir s'il s'agit de l'effet du dragage ou de processus naturels, l'extension et la durée n'ayant pas pu être quantifiées.**

2.1.4. Devenir à court-terme : remises en suspension

Le procédé d'injection d'eau, ainsi que le courant de densité associé, peuvent générer une augmentation de la concentration en MES à proximité du site dragué.

En période de vives-eaux, l'effet du dragage à injection d'eau est négligeable puisque le bruit de fond naturel est élevé et que les courants participent à une dispersion rapide des sédiments.

En période de mortes-eaux, le dragage à injection d'eau tend à augmenter la charge particulaire sur le fond (10 fois supérieure au bruit de fond) et dans la colonne d'eau (jusqu'à 5 fois supérieure au bruit de fond). L'augmentation s'effectue de manière progressive, à l'avancement du dragage. Lorsque les conditions sont peu dispersives, l'augmentation de la turbidité sur le fond peut persister pendant la première moitié du flot.

Ces remises en suspension sont donc de courte durée ; elles se concentrent principalement sur le fond. Elles semblent être perceptibles, en mortes-eaux, jusqu'à 2 km en aval de la zone draguée.

D'une manière plus générale, les remises en suspension liées au dragage par injection d'eau sont faibles par rapport à celles résultant des processus naturels tels que les remises en suspension en vives-eaux, et faibles par rapport au bruit de fond en présence du bouchon vaseux (autour de 1 g/l à Trentemoult en étiage et jusqu'à 2 g/l).

2.1.5. Devenir à moyen terme

A moyen terme, les sédiments remis en mobilité sur le fond sont susceptibles de contribuer à augmenter localement le stock de crème de vase liquide ou le stock de vases fluides et de participer à la dynamique sédimentaire liée aux courants de marée, avec une alternance entre processus de dépôt et d'érosion.

Les suivis réalisés par HOCER en 2010 et 2011 n'ont pas permis d'estimer l'augmentation des volumes et de l'épaisseur de la crème de vase due au dragage par injection d'eau.

Contrairement au refoulement par conduite en surface, le dragage par injection d'eau ne contribue pas directement à alimenter le bouchon vaseux puisque le courant de densité généré est concentré sur le fond. Il ne fait qu'augmenter les stocks pouvant, sous l'effet des conditions hydrodynamiques naturelles, être remis en suspension.

La remobilisation des matériaux se fait sur le court terme. Elle est ensuite soumise aux processus naturels (consolidation ou remise en suspension).

A moyen terme, l'augmentation locale du stock de crème de vase liquide ou du stock de vases fluides peut être plus ou moins marquée par la dynamique d'alternance naturelle entre les processus de dépôts en mortes-eaux (alimentation de la crème de vase), les processus d'érosion (remises en suspension dans la colonne d'eau et alimentation du bouchon vaseux) et par la dynamique du bouchon vaseux (remontée vers l'amont en étiage et redescente vers l'aval lorsque les débits remontent).

2.2. MODELISATION NUMERIQUE D'UN DRAGAGE PAR DAS ET DIE

2.2.1. Description du modèle

Le modèle hydrosédimentaire 3D « vase » opérationnel, élaboré par Artelia pour le compte du GIP Loire Estuaire dans le but de tester des scénarios de restauration de l'estuaire à grande échelle a été mis en œuvre. Il permet de décrire, à une échelle globale, les écoulements et les transferts particuliers. Il est basé sur le logiciel Telemac3D développé par EDF-DRD. L'emprise modélisée s'étend d'Ancenis (point kilométrique 90 en partant de Saint-Nazaire) à 40 km des côtes au large. Il tient notamment compte des zones submersibles latérales à l'aval du Pellerin.

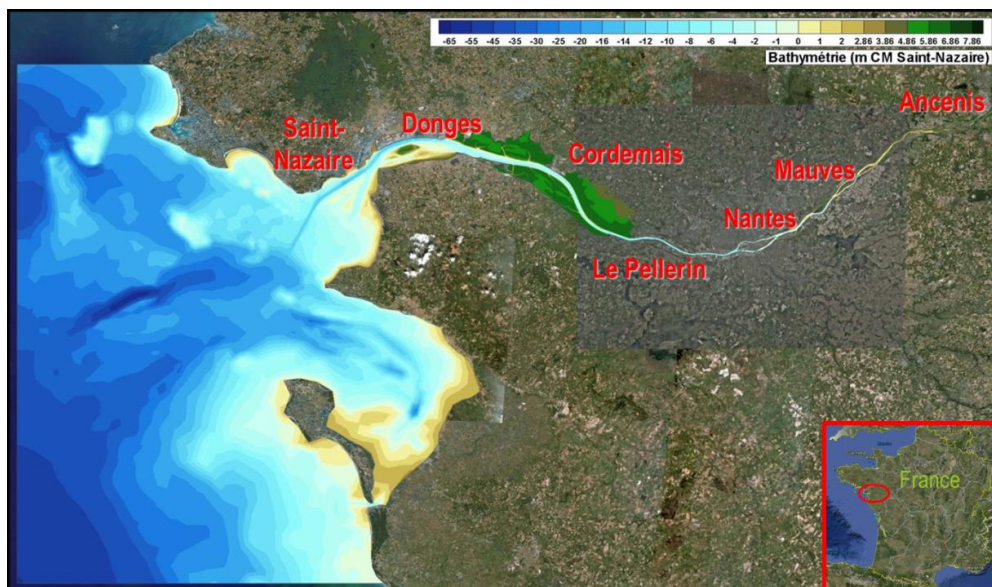
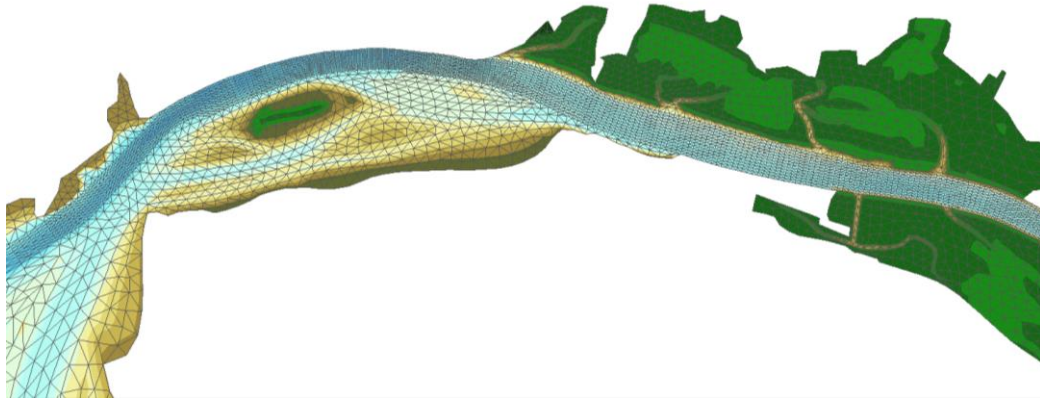
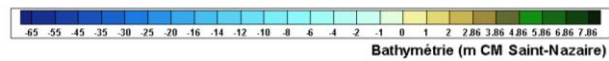


Figure 2.1. Emprise et bathymétrie du modèle hydrosédimentaire 3D

Le maillage horizontal est composé de mailles de taille variable allant de 2,5 km au large à 200 et 50 m dans la Loire.

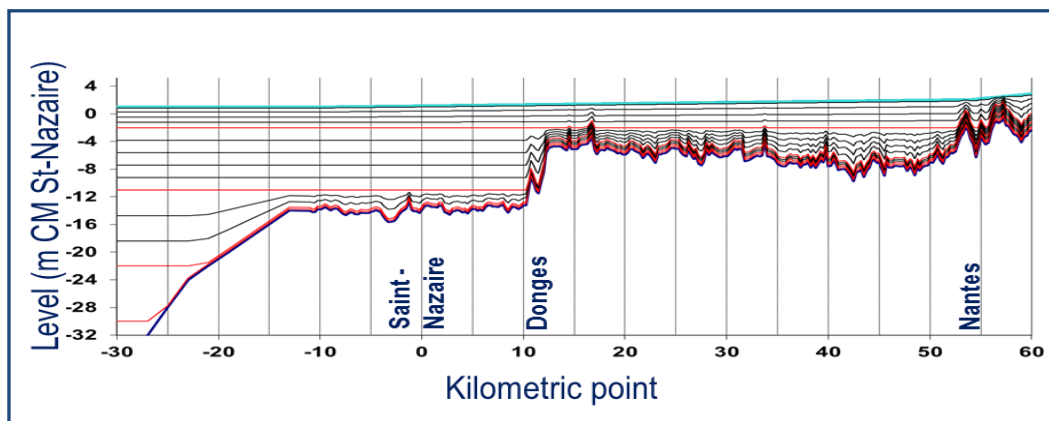
Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE**Figure 2.2. Visualisation du maillage**

Afin de représenter correctement la dispersion et le dépôt des sédiments lors des phases de dragage – rejet, le modèle de base a été raffiné localement dans le chenal de navigation entre le pk -1 et le pk 63 avec une taille de maille de 30 à 100 m sur l'ensemble de cette zone.

Le maillage vertical (*Figure 2.3*) est composé de 16 plans avec un affinement plus important près du fond (2 à 5 plans ayant une taille de 0,25 m pour capter les gradients de courant, de salinité et de MES) et près de la surface pour intégrer proprement les effets du vent.

**Figure 2.3. Maillage vertical du modèle hydrosédimentaire 3D**

Le modèle reproduit les variations du débit de la Loire, du niveau de marée astronomique, des niveaux moyens due aux conditions météorologiques, les conditions de vagues et de vent. Il a été calibré et validé dans l'estuaire interne en niveaux, courants, salinité et sédimentologie vaseuse (turbidité et morphologie). Ce modèle inclut également les lois d'érosion et de consolidation, l'effet du glissement pour les vases liquides, un modèle de longueur de mélange multicouche pour le calcul de la turbulence en milieu stratifié et le couplage de la rugosité du fond avec la crème de vase.

Il est capable de reproduire une année complète de dynamique de bouchon vaseux, en incluant l'expulsion de celui-ci par une forte crue et la recombinaison d'un bouchon vaseux dans l'estuaire interne par la suite.

Par ailleurs, le modèle fonctionne ici en eau claire. Cela signifie que le remplissage de vase initial qui permet de créer le bouchon vaseux ainsi que les apports amont ne sont pas appliqués dans ce modèle. Ainsi, seules les remises en suspension de vases dues aux dragages sont simulées. Les concentrations de MES et les épaisseurs de dépôt de vase calculées représentent donc directement l'impact dû au dragage.

2.2.2. Les scénarios modélisés

Ce modèle a permis d'évaluer l'impact d'une pratique de dragage par DIE par rapport à une pratique par DAS sur deux chantiers, à l'aval (Donges 6) et à l'amont (zone d'évitage de Trentemoult) de l'estuaire, en prenant en compte la variabilité des conditions hydrométéorologiques.

Le rejet a été simulé à 0,5 m au-dessus du fond dans le cas d'un dragage par DIE.

Dans le cas d'un dragage par DAS, le rejet est situé sur les 40% du fond de la colonne d'eau, qui est donc variable selon le moment de la marée (cf. figure ci-dessous pour exemple).

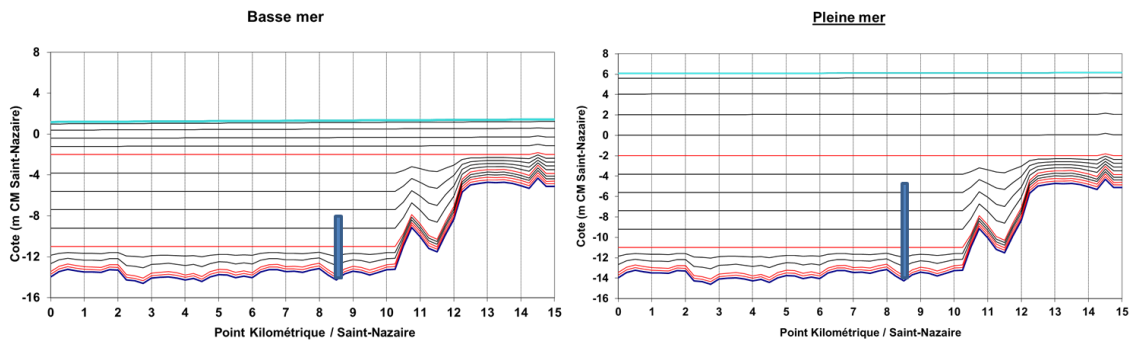


Figure 2.4. Position Z des points de remise en suspension par DAS au poste 6

L'épaisseur de la couche de mixture de 40% de la colonne d'eau a été déterminée à partir d'une modélisation numérique locale simplifiée via le logiciel CORMIX. En effet, il avait été observé que l'épaisseur de la couche de mixture en sortie de champ proche représente entre 23 et 46 % de la hauteur d'eau suivant la hauteur d'eau et les vitesses de courant ambiant. Dans le modèle 3D, il a été choisi de rejeter la mixture sur environ 40% de la colonne d'eau, les cas où les pourcentages sont plus faibles correspondant à des vitesses de courant faibles pour lesquelles le modèle 3D simulera du dépôt sous forme de crème de vase liquide, dès la sortie du rejet.

Les figures suivantes présentent la localisation des points de rejets pour la DAS et la DIE sur les deux zones étudiées (Donges poste pétrolier n°6 et zone d'évitage de Trentemoult) :

- Donges poste 6 :
 - DAS : le rejet est effectué à travers une colonne de refoulement longue de quelques dizaines de mètres) afin de rejeter les sédiments en bord de chenal ;
 - DIE : le rejet est effectué en milieu de souille ;

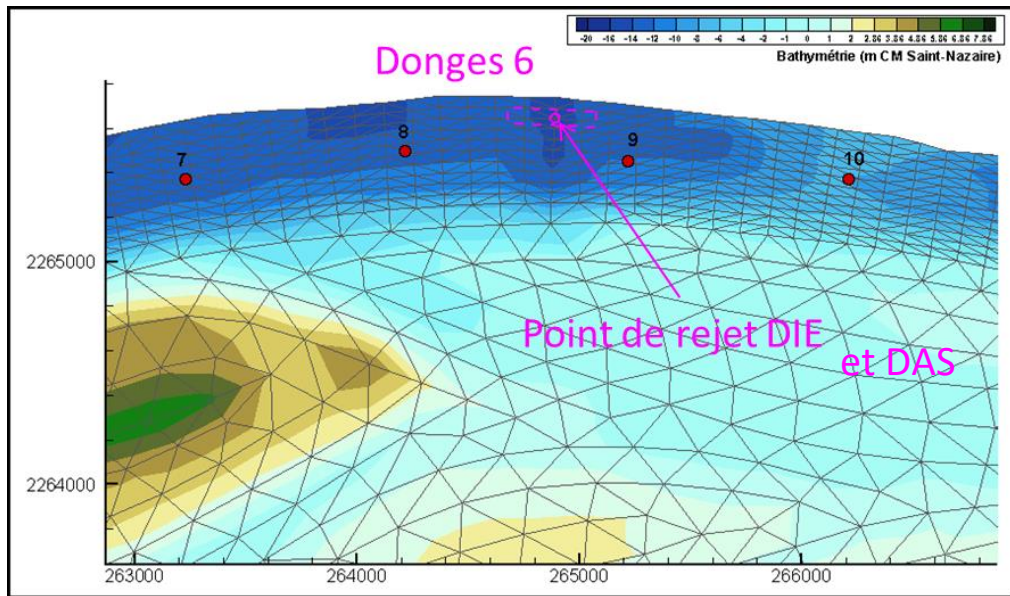


Figure 2.5. Position XY du point de remise en suspension par DIE et DAS au poste 6

- zone d'évitage de Trentemoult :
 - DIE : Le point de rejet représentatif au niveau de la zone d'évitage de Trentemoult est pris sur un point de maillage au centre de la zone ;

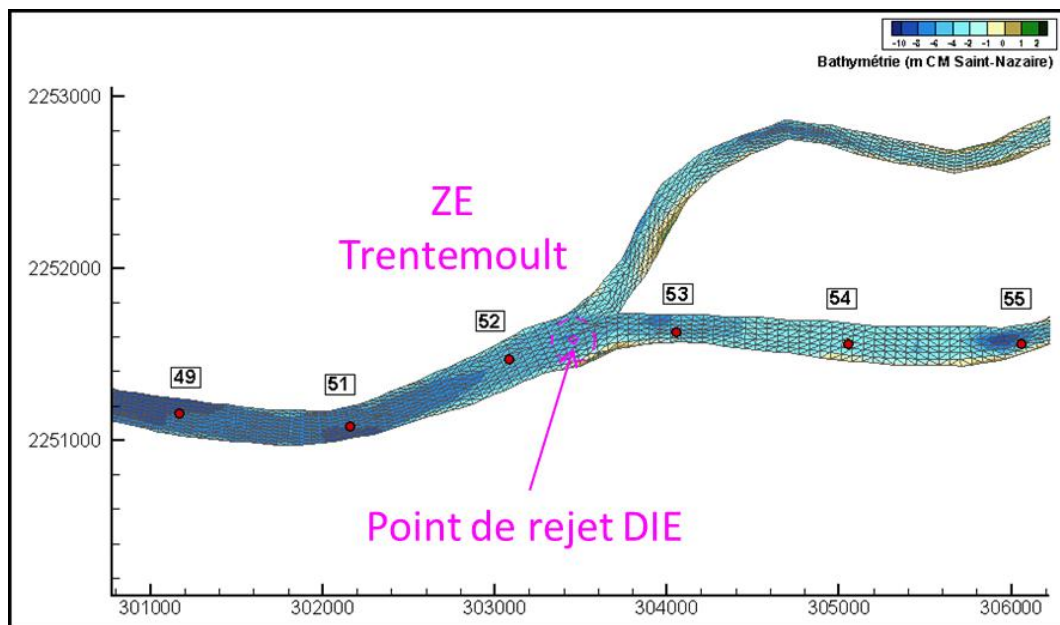


Figure 2.6. Position XY du point de remise en suspension par DIE au niveau de la ZE de Trentemoult

- DAS, le rejet est effectué à travers une colonne de refoulement longue de 400 mètres et rejetant à l'aval de la zone.

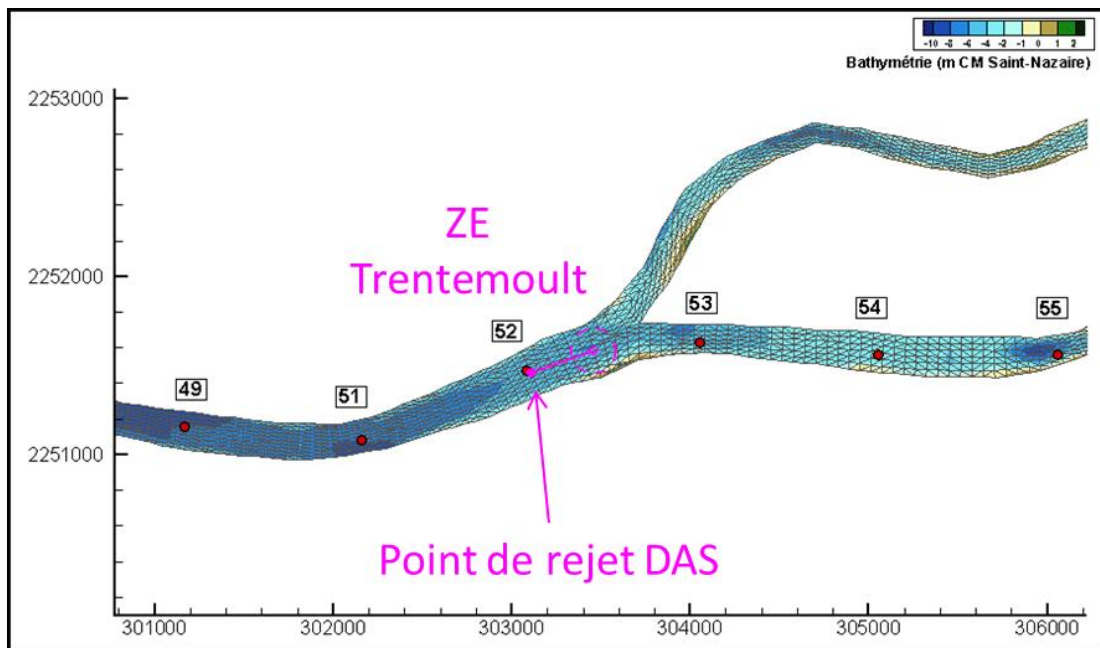


Figure 2.7. Position XY du point de remise en suspension par DAS au niveau de la ZE de Trentemoult

Les paramètres de ces différents scénarios ont été définis suite à l'analyse quantitative des pratiques actuelles.

Quatre scénarios de dragage ont ensuite été élaborés en reprenant les conclusions de l'analyse quantitative des pratiques.

Tableau 2.2. Rappel des scénarios modélisés

Secteur	Pratique	Masse de vase rejetée	Débit solide du rejet	Nb heures de chantier (h)
Donges Poste 6	DIE	31 266 t	2605 t/h	12h
Donges Poste 6	DAS	34 680 t	581 t/h	96 h (dont 60h effective)
ZE Trentemoult	DIE	26 128 t	2605 t/h	10h
ZE Trentemoult	DAS	34 680 t	581 t/h	96 h (dont 60h effective)

Un des objectifs des simulations était de mieux appréhender l'effet du coefficient de marée et du débit de la Loire sur l'impact des opérations de dragage. Pour cela, nous avons retenu pour l'aval deux situations de marée (vive-eau et morte-eau) contrastées, combinées à trois débits du fleuve (300, 800 et 2000 m³/s), soit un total de 6 scénarios hydrométéorologiques. A l'amont, les opérations d'entretien s'effectuent uniquement en étiage lorsque le bouchon vaseux est présent. Deux scénarios seulement ont donc été simulés (vive-eau et morte-eau) pour un seul débit de la Loire de 300 m³/s.

Tous les autres paramètres hydrométéorologiques ont été fixés constants dans le temps, quel que soit le scénario :

- niveau moyen : +3,57 m CM ;
- pas de vent ;
- houle: Hs: 0,75m, Tp: 9s, Dir² : N° 270.

La période d'équinoxe allant du 6 octobre au 11 novembre 2011 a été sélectionnée pour forcer le modèle afin d'effectuer les simulations d'opérations de dragage avec des coefficients de marée très contrastés entre morte-eau (coefficient 38) et vive eau (coefficient 111) :

- dragage en morte-eau (ME) : simulation du 18 octobre au 2 novembre ;
- dragage en vive-eau (VE) : simulation du 25 octobre au 11 novembre.

Pour chaque simulation, la date de démarrage du dragage est la même (le 18/10 pour la simulation en ME et le 25/10 pour la simulation en VE), par contre la durée de l'opération est variable : une journée pour la DIE et 8 jours pour la DAS (une journée s'étalant entre 7h et 19h) comme indiqué dans le tableau 2.2.

Nota : les simulations n'ont pas été uniquement menées sur la période de jusant, contrairement à la pratique actuelle de l'utilisation de la DIE, mais sur une plus grande période de marée afin de maximiser les effets.

2.2.3. Présentation des résultats

Pour chacune des simulations ont été produits et étudiés :

- les cartes donnant la valeur maximale de concentration en MES en surface, au fond et en moyenne sur la verticale sur les 15 jours simulés : maximas des valeurs instantanées ;
- les courbes temporelles de concentration en surface, au fond et en moyenne sur la verticale pour 7 points : au point d'injection, puis à +1, +2 et +5 km à l'amont de ce point et à -1, -2 et -5 km à l'aval. Ces graphiques permettent de montrer la durée que mettent les panaches à se disperser et les reprises possibles des dépôts non dispersés ;
- les graphiques représentant les temps de dépassement de 7 seuils de concentration sur les 15 jours à chaque point kilométrique. Ils permettent d'intégrer à la fois le temps et les seuils de concentration sur le chenal principal.

2.2.4. Devenir des matériaux dragués à l'aval

En morte-eau, les impacts des dragages par DIE ou DAS sont similaires. En effet, les forces hydrodynamiques étant peu importantes pour ces marées, les matériaux dragués vont se déposer en partie sous forme de crème de vase liquide dans le chenal de navigation au lieu de se disperser en suspension. Celle-ci sera reprise quelques jours plus tard par les conditions de vive-eau. Ainsi, les reprises et la dispersion se font sur un peu plus de 8 jours.

Le temps nécessaire pour que la concentration moyenne passe sous le seuil des 20 mg/l est d'environ 9,5 jours (228 heures) assez similaire quel que soit le débit du fleuve et le type de pratique. Le débit a donc peu d'importance sur le temps de dispersion.

² Hs = Hauteur significative : quantité statistique utilisée pour caractériser l'état de la mer qui représente la moyenne des hauteurs du tiers des plus fortes vagues ; Tp = période ; Dir = direction par rapport au Nord.

Par contre, l'extension spatiale des enveloppes de maximum de concentration diminue et se déplace de l'amont vers l'aval lorsque les débits augmentent. Ceci est cohérent avec la dynamique estuarienne qui a tendance à importer du sédiment vers l'amont par faible débit et à concentrer le sédiment vers l'aval (qui est le lieu de dragage étudié) par fort débit.

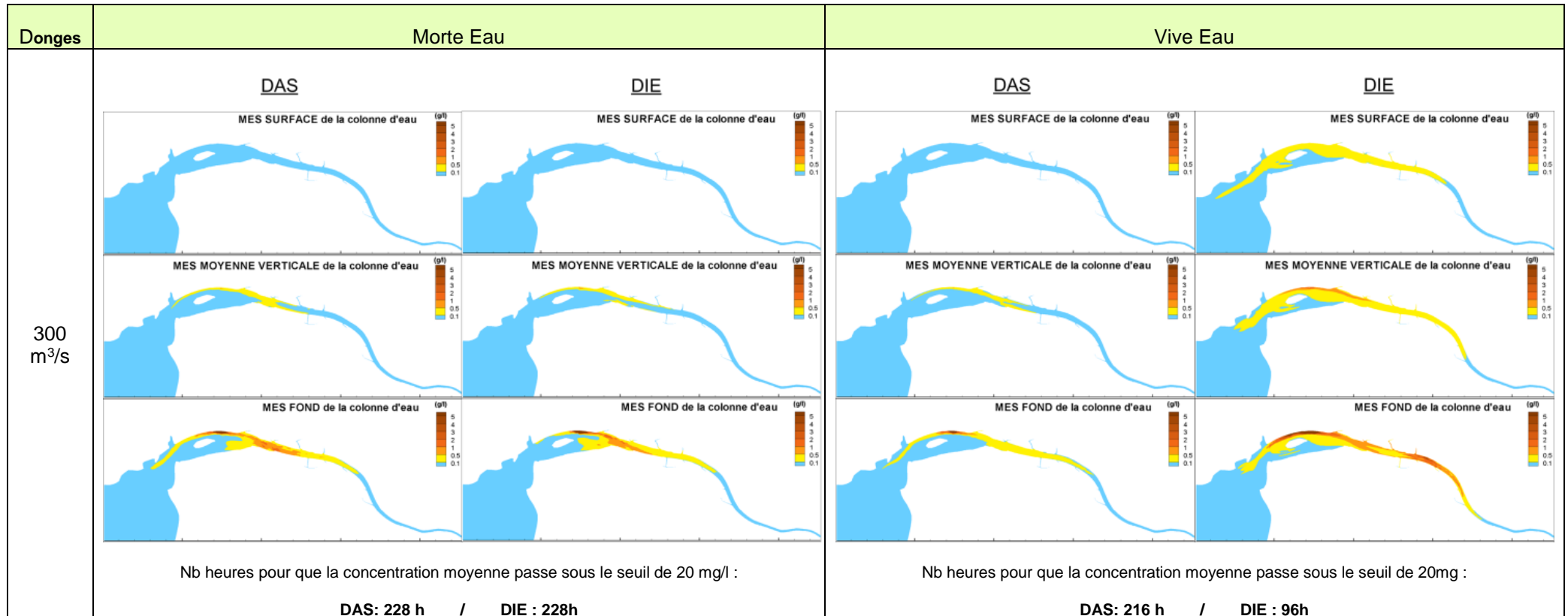
En vive-eau, la majeure partie du sédiment remobilisé en DIE peut être directement reprise en suspension par les conditions hydrodynamiques dans les premiers jours, ce qui fait que la concentration moyenne ne met que 3 à 4 jours (72h à 96h) pour passer sous le seuil de 20 mg/l au lieu de 9,5 jours (228h) en pratique DAS. En contrepartie, les enveloppes des concentrations maximales et les valeurs de concentrations maximales sont plus importantes avec le DIE.

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

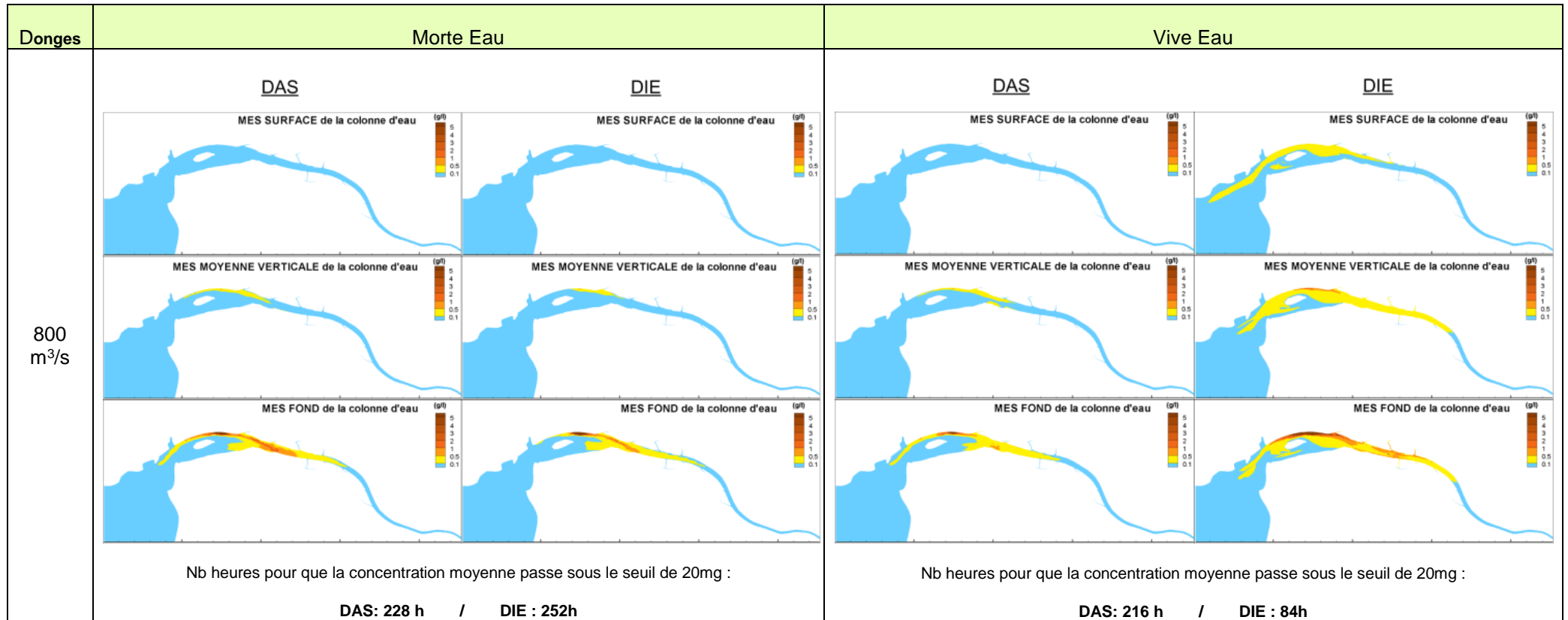
Tableau 2.3. Donges 6 : Récapitulatif des maximums ponctuels calculés et des temps de passage sous le seuil de 20 mg/l



Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

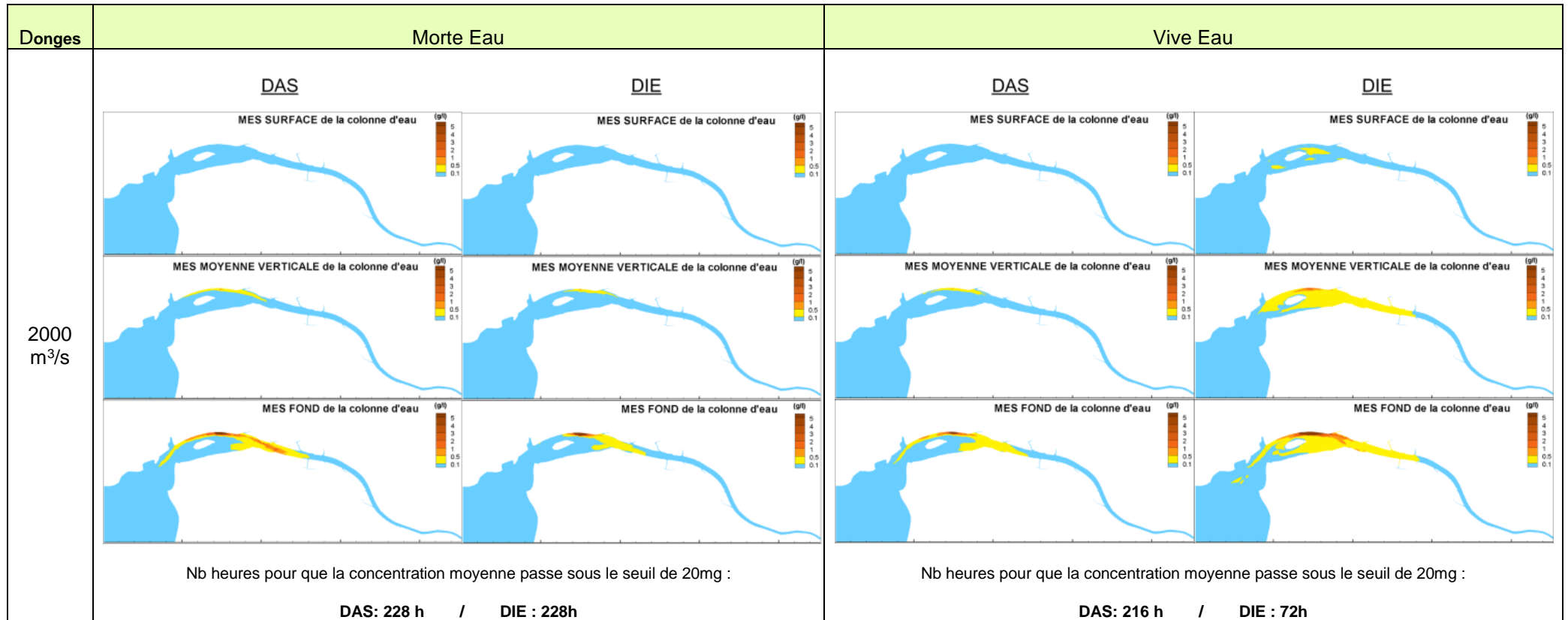
R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE



Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE



Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

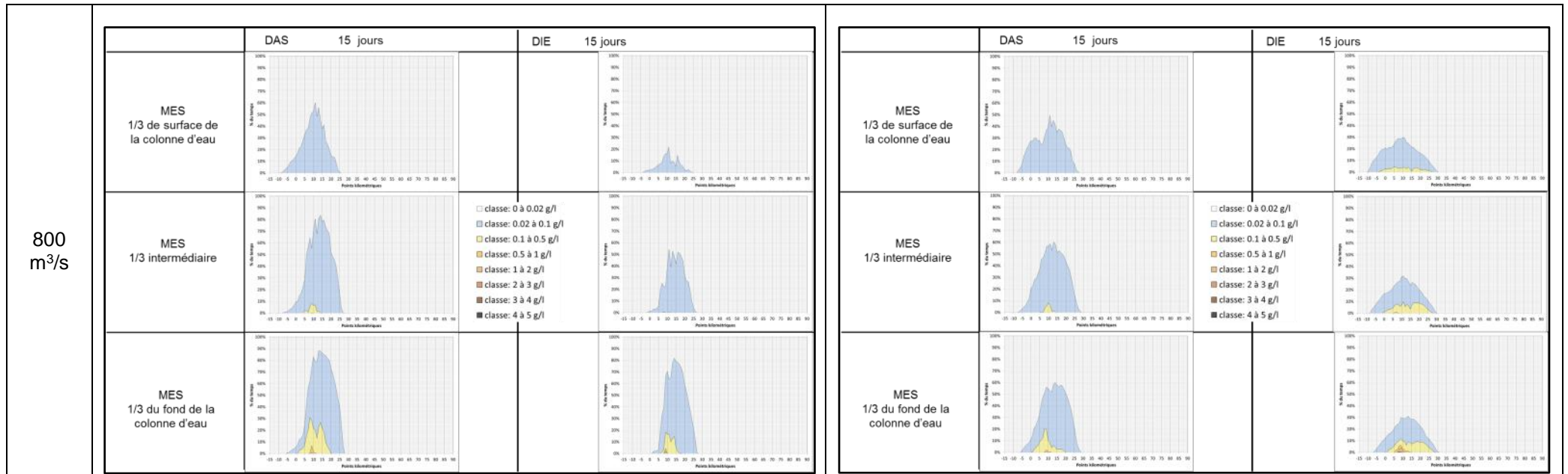
Tableau 2.4. Donges 6 : Récapitulatif des temps de dépassement sur 15 jours à différents seuils de concentration

Donges	Morte Eau				Vive Eau			
	DAS 15 jours		DIE 15 jours		DAS 15 jours		DIE 15 jours	
300 m ³ /s	MES 1/3 de surface de la colonne d'eau							
	MES 1/3 intermédiaire		<ul style="list-style-type: none"> □ classe: 0 à 0.02 g/l □ classe: 0.02 à 0.1 g/l □ classe: 0.1 à 0.5 g/l □ classe: 0.5 à 1 g/l □ classe: 1 à 2 g/l □ classe: 2 à 3 g/l □ classe: 3 à 4 g/l □ classe: 4 à 5 g/l 				<ul style="list-style-type: none"> □ classe: 0 à 0.02 g/l □ classe: 0.02 à 0.1 g/l □ classe: 0.1 à 0.5 g/l □ classe: 0.5 à 1 g/l □ classe: 1 à 2 g/l □ classe: 2 à 3 g/l □ classe: 3 à 4 g/l □ classe: 4 à 5 g/l 	
	MES 1/3 du fond de la colonne d'eau							

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

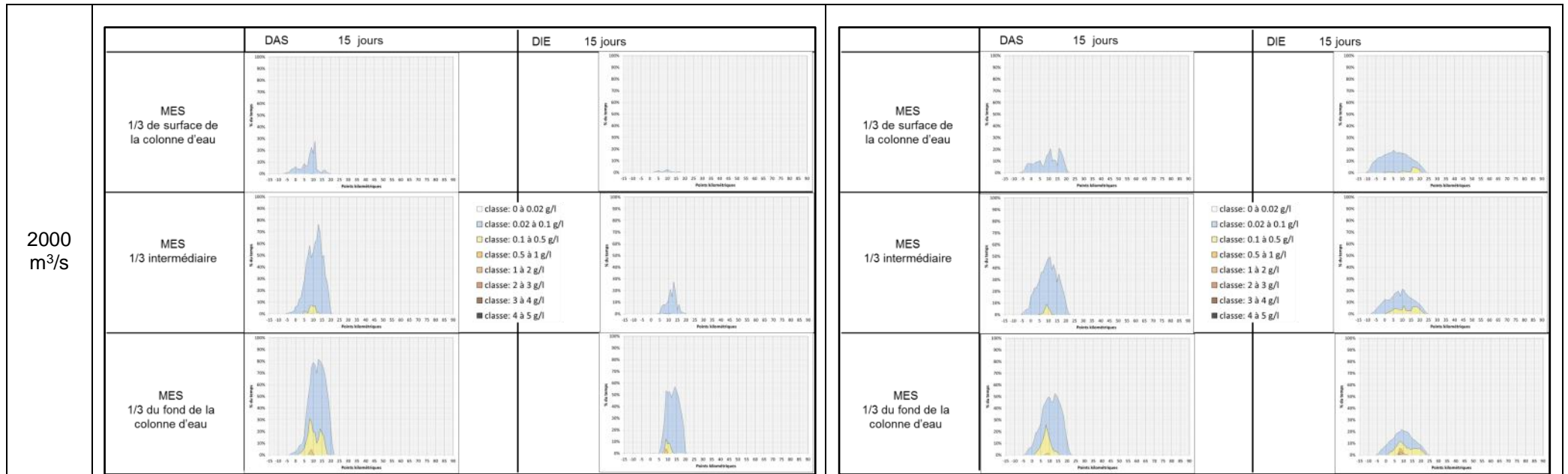
R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE



Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE



2.2.5. Devenir des matériaux dragués à l'amont

A l'amont, la marée a très peu d'influence sur l'impact de la pratique de la DAS. Les enveloppes des concentrations maximales sont assez similaires et les temps nécessaires pour que la concentration moyenne passe sous les 20 mg/l sont aussi très peu différents : 9,5 jours (228h) en morte-eau contre 9 jours (216 h) en vive- eau.

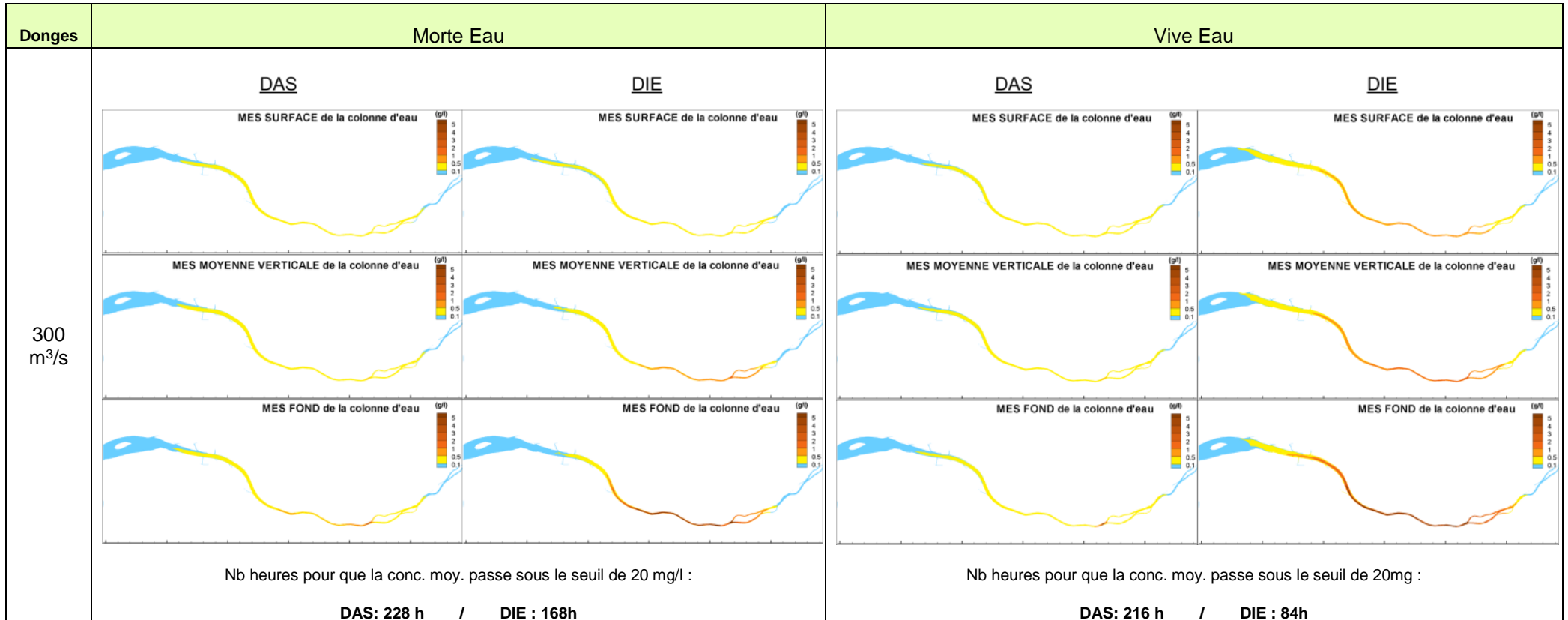
Effectuer une opération de dragage par DIE pendant une période de vive-eau conduit à disperser plus rapidement les rejets dans l'estuaire : 3,5 jours (84h) pour passer sous le seuil de 20 mg/l au lieu de 7 jours (168h) en morte-eau. En revanche, l'enveloppe des concentrations maximales et les concentrations maximales sont plus importantes en vive-eau.

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

Tableau 2.5. ZE Trentemoult : Récapitulatif des maximums ponctuels calculés et des temps de passage sous le seuil de 20 mg/l



Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

Tableau 2.6. ZE Trentemoult : Récapitulatif des temps de dépassement sur 15 jours à différents seuils de concentration

Donges	Morte Eau				Vive Eau				
	DAS 15 jours		DIE 15 jours		DAS 15 jours		DIE 15 jours		
300 m ³ /s	MES 1/3 de surface de la colonne d'eau								
	MES 1/3 intermédiaire		<ul style="list-style-type: none"> □ classe: 0 à 0.02 g/l □ classe: 0.02 à 0.1 g/l □ classe: 0.1 à 0.5 g/l □ classe: 0.5 à 1 g/l □ classe: 1 à 2 g/l □ classe: 2 à 3 g/l □ classe: 3 à 4 g/l □ classe: 4 à 5 g/l 				<ul style="list-style-type: none"> □ classe: 0 à 0.02 g/l □ classe: 0.02 à 0.1 g/l □ classe: 0.1 à 0.5 g/l □ classe: 0.5 à 1 g/l □ classe: 1 à 2 g/l □ classe: 2 à 3 g/l □ classe: 3 à 4 g/l □ classe: 4 à 5 g/l 		
	MES 1/3 du fond de la colonne d'eau								

2.3. INCIDENCES DES DRAGAGES SUR LES MES ET LE BOUCHON VASEUX

2.3.1. Rappel sur les mesures du réseau SYVEL

L'analyse, par le GIP Loire Estuaire, des mesures de turbidité 2007-2013 du réseau de mesure SYVEL a permis de tirer les deux principaux graphiques suivants. On notera que les sondes sont représentatives des concentrations de surface (-1 à 1,5m sous la surface, sauf pour Donges où il y a aussi une sonde à -4m).

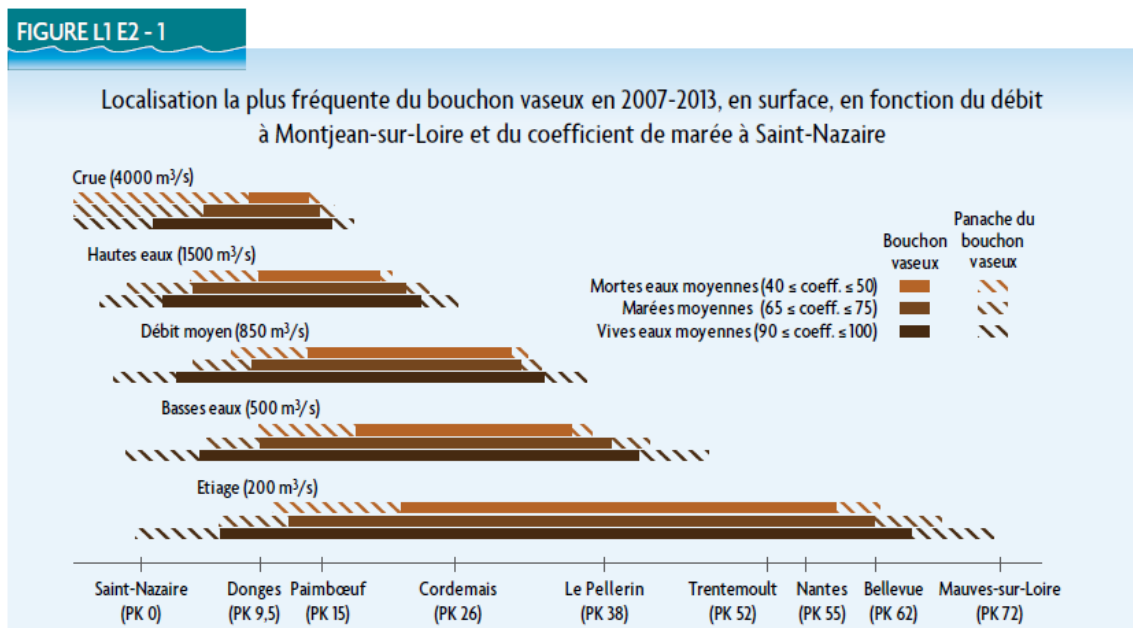


Figure 2.8. Localisation la plus fréquente du bouchon vaseux en surface en fonction du débit (GIP Loire Estuaire, 2014)

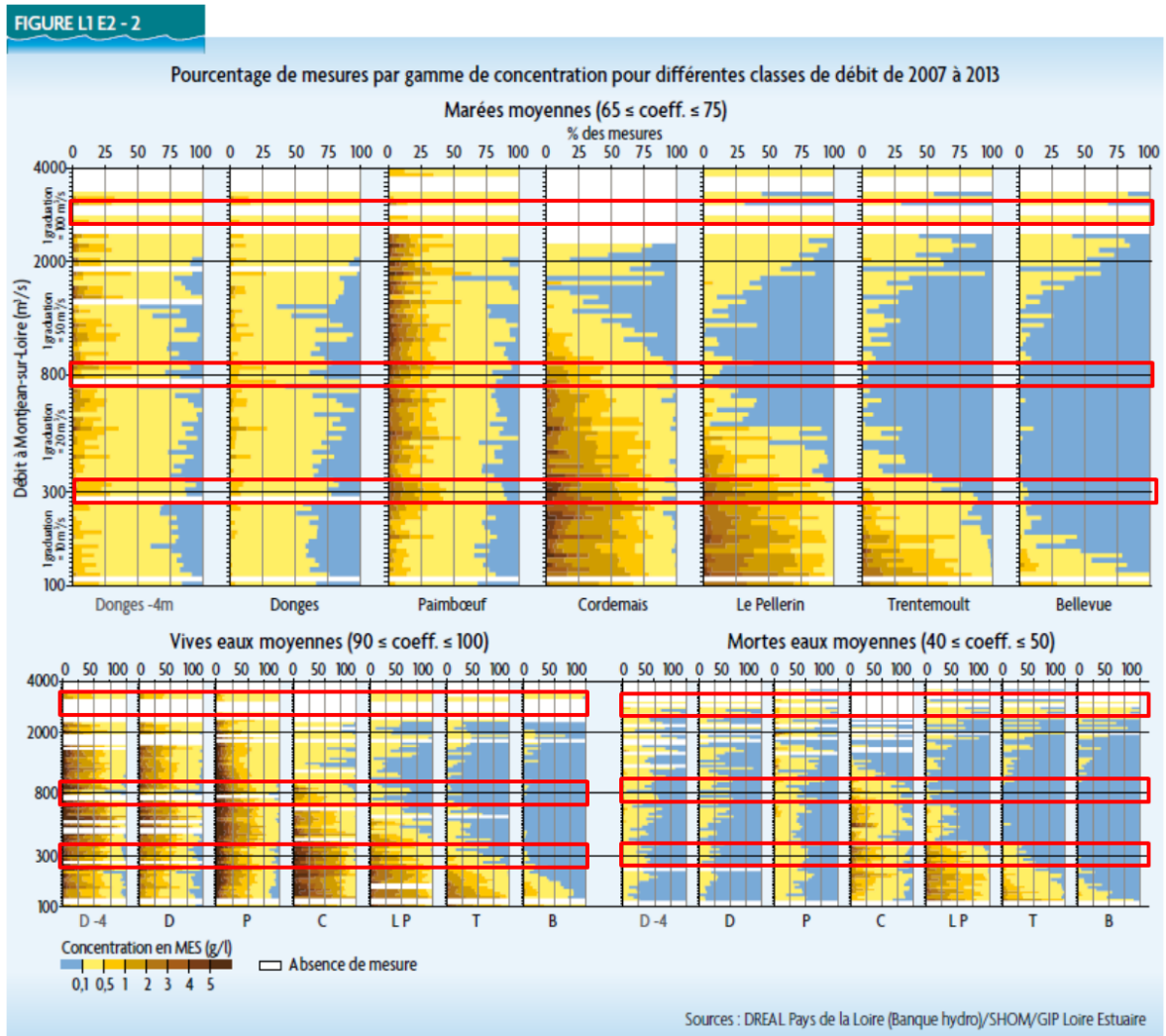


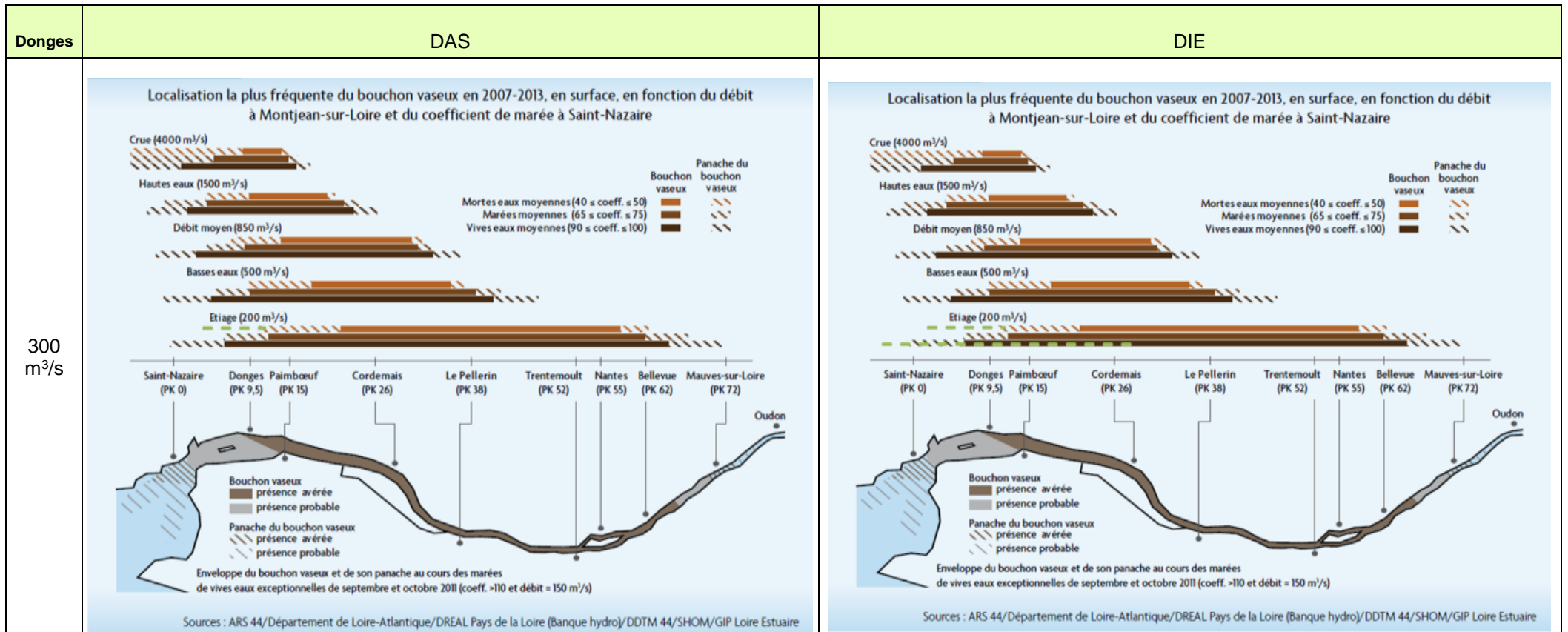
Figure 2.9. Pourcentages de mesures par gamme de concentration pour différentes classes de débit (GIP Loire estuaire, 2014)

2.3.2. Impact d'un dragage par DAS et DIE à l'aval (Donges) sur le bouchon vaseux

L'emprise des impacts des dragages par DAS et DIE (traits verts sur les graphiques ci-dessous) a été comparée aux mesures de suivi du bouchon vaseux pour trois débits : 300, 800 et 2000 m³/s.

On constate que l'emprise de l'impact des dragages par DAS et DIE sera le plus décalé spatialement vis-à-vis de la zone d'extension du bouchon vaseux dans les conditions de faible débit et morte-eau car, dans ces conditions, le bouchon vaseux se trouve assez en amont (Pk 20 à Pk60) alors que la source des remises en suspension issues du dragage se situera en aval (Pk 4 à Pk10). Dans les autres configurations, l'emprise de l'impact des dragages se situe en partie ou en quasi-totalité dans l'emprise du bouchon vaseux.

Tableau 2.7. Donges 6 : comparaison, pour différents débits, des impacts DAS et DIE modélisés aux extensions de panache du bouchon vaseux et de la crème de vase



Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

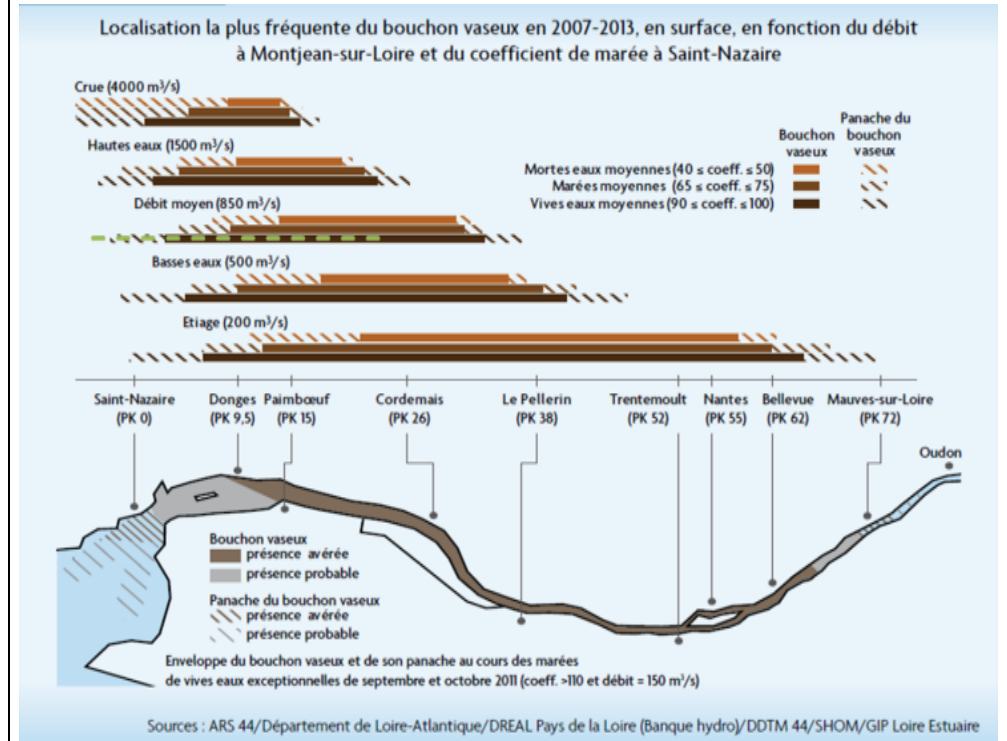
Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

800
m³/s

- - Impact équivalent au panache du bouchon vaseux: 0,1 à 0,5g/l
- Impact équivalent au bouchon vaseux: > 0,5g/l

Concentration en surface < 0,1g/l



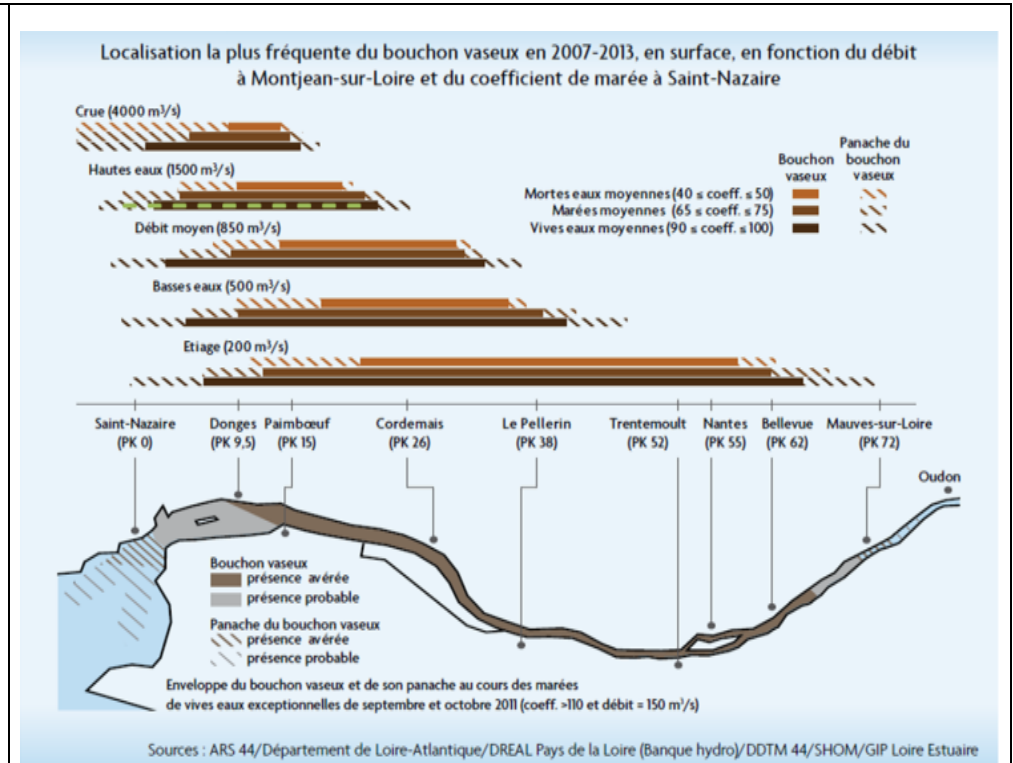
Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

2000
m³/s

Concentration en surface < 0.1g/l



Des calculs de temps de dépassement montrent que les concentrations aux points de rejets sont dans des gammes inférieures ou équivalentes à celles mesurées dans le milieu naturel ambiant, pour les deux pratiques et ce quelles que soient les conditions hydrométéorologiques étudiées.

Les différences entre les temps de dépassement du seuil de concentration des MES de 0,1 g/l entre conditions naturelles et impact du dragage sont plus importants en vive-eau (temps de dépassement de DAS et DIE entre 4 à 8 fois moins important que les temps de dépassement naturels) qu'en morte-eau (temps de dépassement de DAS et DIE 2-3 fois moins importants que les temps de dépassement naturel).

A retenir également un écart systématique sur les temps de dépassement entre la DAS et la DIE avec des différences plus ou moins sensibles selon les conditions naturelles : près de deux fois moins pour la DIE pour l'ensemble des conditions, hormis pour les faibles débits où les différences sont dans la gamme 20-40%.

Tableau 2.8. Donges 6 : Comparaison des temps de dépassement du seuil de 0,1g/l entre le milieu naturel, un dragage par DAS et un dragage par DIE à l'aval

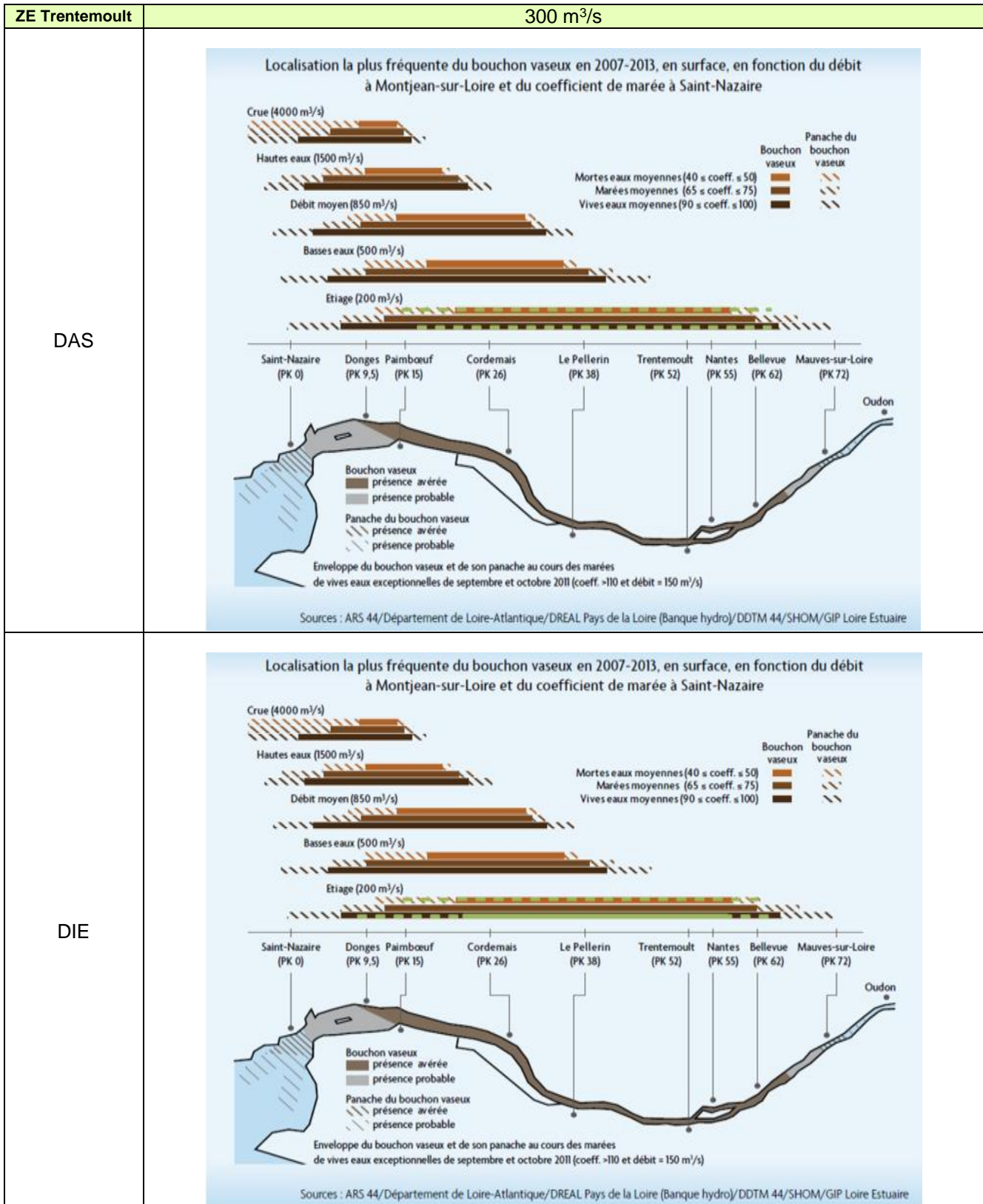
DONGES poste 6	ME (% temps > 0,1g/l)	VE (% temps > 0,1g/l)
	MILIEU NATUREL / DAS / DIE	MILIEU NATUREL / DAS / DIE
Q = 300 m ³ /s	30% / 28 % / 23%	90% / 18% / 11%
Q = 800 m ³ /s	50% / 31% / 18%	90% / 21% / 12%
Q = 2000 m ³ /s	60% / 31% / 12%	100% / 26% / 12%

2.3.3. Impact d'un dragage DAS et DIE à l'amont (Trentemoult) sur le bouchon vaseux

A l'amont, l'emprise des impacts des dragages par DAS et DIE (traits verts sur les graphiques ci-après) a été comparée aux mesures de suivi du bouchon vaseux pour le débit de 300 m³/s correspondant à une situation d'étiage pendant laquelle ont lieu les dragage d'entretien.

Par rapport au milieu ambiant, la zone d'impact de chaque pratique se trouve toujours dans la gamme de concentrations équivalente ou inférieure au milieu naturel, quels que soient les débits.

Tableau 2.9. ZE Trentemoult : comparaison des impacts DAS et DIE aux extensions de panache du bouchon vaseux et de crème de vase



--- Impact équivalent au panache du bouchon vaseux: 0,1 à 0,5g/l
 --- Impact équivalent au bouchon vaseux: > 0,5g/l

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

Les calculs de temps de dépassement de concentrations-seuils montrent que :

- pour la DIE, les impacts aux points de rejets sont dans des gammes équivalentes (marée de ME) ou inférieures (marée de VE) à celles mesurées dans le milieu ambiant ;
- pour la DAS, les concentrations sont également inférieures à celles du milieu naturel, à l'exception du cas du débit de 300 m³/s en morte-eau, pour lequel les concentrations au point de rejet peuvent dépasser plus souvent 0,1 g/l que dans le milieu naturel (80 % contre 50 %).

Tableau 2.10. Trentemoult : comparaison des temps de dépassement du seuil de 0,1g/l entre le milieu naturel, un dragage par DAS et un dragage par DIE

TRENTEMOULT	ME (% temps > 0,1g/l)	VE (% temps > 0,1g/l)
	MILIEU NATUREL / DAS / DIE	MILIEU NATUREL / DAS / DIE
Q = 300 m ³ /s	50% / 80 % / 46%	90% / 71% / 27%

2.3.4. Synthèse des résultats

Des résultats de la modélisation, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- la marée a une influence notable sur le devenir des sédiments. Les matériaux seront plus étalés dans le temps et dans l'espace en marée de vive-eau qu'en marée de morte-eau. Cette conclusion est vraie pour l'amont et l'aval quelle que soit la pratique, excepté pour la DAS en amont. Pour cette configuration, la marée a très peu d'influence sur le devenir des matériaux ;
- globalement, les temps de dispersion des sédiments sont plus étalés suite à l'utilisation d'une DAS que d'une DIE, que ce soit en amont ou en aval. En contrepartie, les enveloppes des concentrations maximales et les valeurs de concentrations maximales sont plus importantes avec une DIE qu'avec une DAS ;
- les concentrations de MES modélisées aux points de rejets restent dans des gammes inférieures ou équivalentes à celles mesurées dans le milieu ambiant, pour les deux pratiques et quelles que soient les conditions de débits/marées étudiées, excepté un cas pour la DAS (en ME et période d'étiage).

Les modélisations ont été réalisées en « eau pure », sans la prise en compte des MES. Ainsi, pour une meilleure représentation de la réalité, il est prévu, dans le cadre des prochaines études, de coupler dans la modélisation les opérations de dragage, la dynamique des MES, la dynamique (remise en suspension, dispersion/ désorption) des contaminants chimiques et la dynamique de l'oxygène dissous.

2.3.5. Impact global des dragages sur la masse turbide de l'estuaire

L'impact global des dragages sur la masse turbide de l'estuaire est différent pour chaque technique utilisée. Ainsi, le dragage par DAM évacue le sédiment dragué à l'extérieur, le dragage par DAS remet du matériau en suspension sur l'ensemble de la colonne d'eau alors qu'une intervention par DIE est majoritairement limitée à la couche de crème de vase sur le fond. Ce point a pu être vérifié par la modélisation numérique comme cela est illustré ci-dessous.

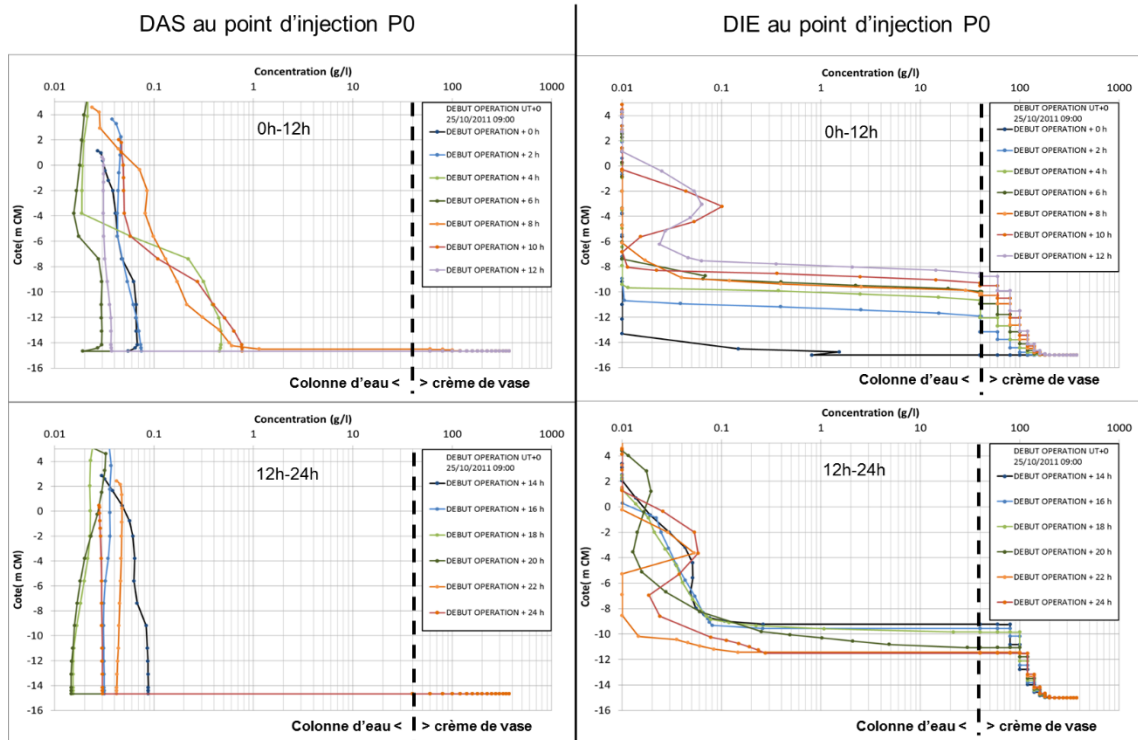


Figure 2.10. Comparaison de profils verticaux en MES sur l'opération de dragage simulée au poste de Donges 6, à l'aval, en morte-eau, à l'étiage

Le bilan de masse global de l'estuaire a été réalisé en 2011 par une simulation numérique (voir paragraphe 1.5 pour les détails).

En 2021, il n'a pas été possible de refaire une simulation de ce type³.

Il est donc pertinent de comparer les remises en suspension du dragage par DAS qui sont de l'ordre de 0,5 millions de m³/an entre 2012 et 2020 soit environ **0,35 Mt en cumulé sur un an** avec la masse maximale du bouchon vaseux qui peut atteindre **1,0 Mt à un instant donné**.

On peut également mettre en perspective les dragages par DIE qui concernent essentiellement la crème de vase pour un **volume annuel cumulé de 1,7 millions de m³ soit 1 Mt** avec la masse de la crème de vase qui peut atteindre **plus de 2 Mt à un instant donné**.

L'impact de la réduction de l'effort de dragage par DAM sur le bilan sédimentaire n'a pas encore été évalué précisément. La dégradation de la cote de navigation entre ces deux périodes (chapitre 3.2 de l'annexe 1) est une indication de la persistance des apports aussi bien de l'amont que de l'aval qui pourrait indiquer que l'effort de dragage est insuffisant actuellement pour tenir la cote objectif.

On notera que ces estimations ne fournissent qu'un ordre de grandeur approché qui sera affiné avec la nouvelle modélisation Hydrosédimentaire 3D engagée en 2021 par le GIP Loire Estuaire. Cette modélisation permettra également d'estimer quantitativement l'impact des dragages sur la masse turbide de l'estuaire.

³ Le GIP Loire Estuaire va démarrer en 2021 une nouvelle modélisation 3D hydrosédimentaire global de l'estuaire de la Loire qui permettra de refaire un bilan de masse affiné.

2.4. SEDIMENTATION LATÉRALE ET LIEN AVEC LES DRAGAGES

2.4.1. Contexte

Les berges latérales de Loire sont soumises à la sédimentation. Cette sédimentation est alimentée par les matériaux transportés par l'hydrodynamisme de l'estuaire.

Le dragage favorisant la remise en suspension des matériaux, son impact potentiel sur la sédimentation latérale est un enjeu important. En effet, il s'agit plus particulièrement de rechercher s'il existe un lien entre les opérations de dragage, la turbidité et un envasement des prairies qui aurait un impact négatif pour l'activité agricole. Un suivi a notamment été réalisé sur la période 2012-2013, afin d'identifier les zones posant problème et de les mettre en perspective par rapport aux zones draguées et aux périodes de dragage.

Le bureau d'étude HOCER a réalisé pour le compte du GPMNSN des études sur la dynamique de la sédimentation latérale en estuaire de Loire, au niveau des estrans et des zones du lit majeur (vasières, marais et prairies) ainsi que sur l'impact potentiel du dragage sur cette dynamique sédimentaire. Ces études ont donné lieu à deux rapports :

- HOCER, 2013. Réalisation d'un suivi de la sédimentation latérale ;
- ACRI-HE-Hocer, 2014. Contribution d'une base de données pour le suivi environnemental des dragages d'entretien du GPM dans l'estuaire de la Loire. Réalisation d'un suivi des épisodes de sédimentation latérale.

2.4.2. Bilan de l'étude sur la sédimentation latérale

Données bibliographiques

Dans le cadre de ces travaux, HOCER a d'abord réalisé un travail de synthèse sur la bibliographie existante et les données historiques.

Il en ressort que les évolutions et les conditions de sédimentation observées sur les bords d'un estuaire sont liées à une complexité de processus se produisant à différentes échelles de temps.

A court terme (quelques heures à quelques mois), ce sont les cycles tidaux, les courants de marée, l'agitation et le débit fluvial qui sont prédominants.

A moyen terme (entre 1 et 10 ans), ce sont l'évolution de la végétation du schorre et des marais et l'impact de certains travaux d'aménagement qui sont les facteurs principaux.

A plus long terme, les travaux d'aménagements majeurs comme l'installation de polders ou le creusement/comblement de chenaux influencent de façon prépondérante l'évolution des rives de l'estuaire.

Enfin, à des échelles de temps encore supérieures, les modifications climatiques, le jeu des cycles glacio-eustatiques et la géologie vont conditionner l'existence de l'estuaire et son mode de fonctionnement.

A l'échelle des cycles climatiques, l'envasement et le comblement d'un estuaire en période de haut niveau marin est une évolution tout à fait naturelle. Dans la Loire, ce comblement a été considérablement accéléré par les travaux d'endiguement et de remblaiement des bras secondaires de l'estuaire. Ainsi, la surface des berges continentalisées a progressé très fortement en quelques années. Parallèlement, le niveau de turbidité dans le chenal aménagé a globalement augmenté en relation avec son approfondissement et la migration vers l'amont du bouchon vaseux a aussi pu accroître le risque de sédimentation latérale dans des zones moins impactées auparavant.

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

Dans cette recherche bibliographique, il n'a pas été trouvé d'études démontrant les conséquences des dragages sur les problèmes de sédimentation latérale, que ce soit dans les estuaires français ou plus généralement dans la littérature européenne et internationale. A l'échelle de plusieurs années, cet impact ne paraît donc pas prépondérant au regard des grands travaux d'aménagements et de modification des chenaux réalisés dans les estuaires.

Campagne de mesures *in-situ*

A la suite de cette recherche bibliographique, HOCER a analysé des suivis de l'altimétrie de deux vasières entre Donges et Cordemais (section 7 et 8), réalisés de décembre 2008 à avril 2010 (cf. figure ci-dessous).

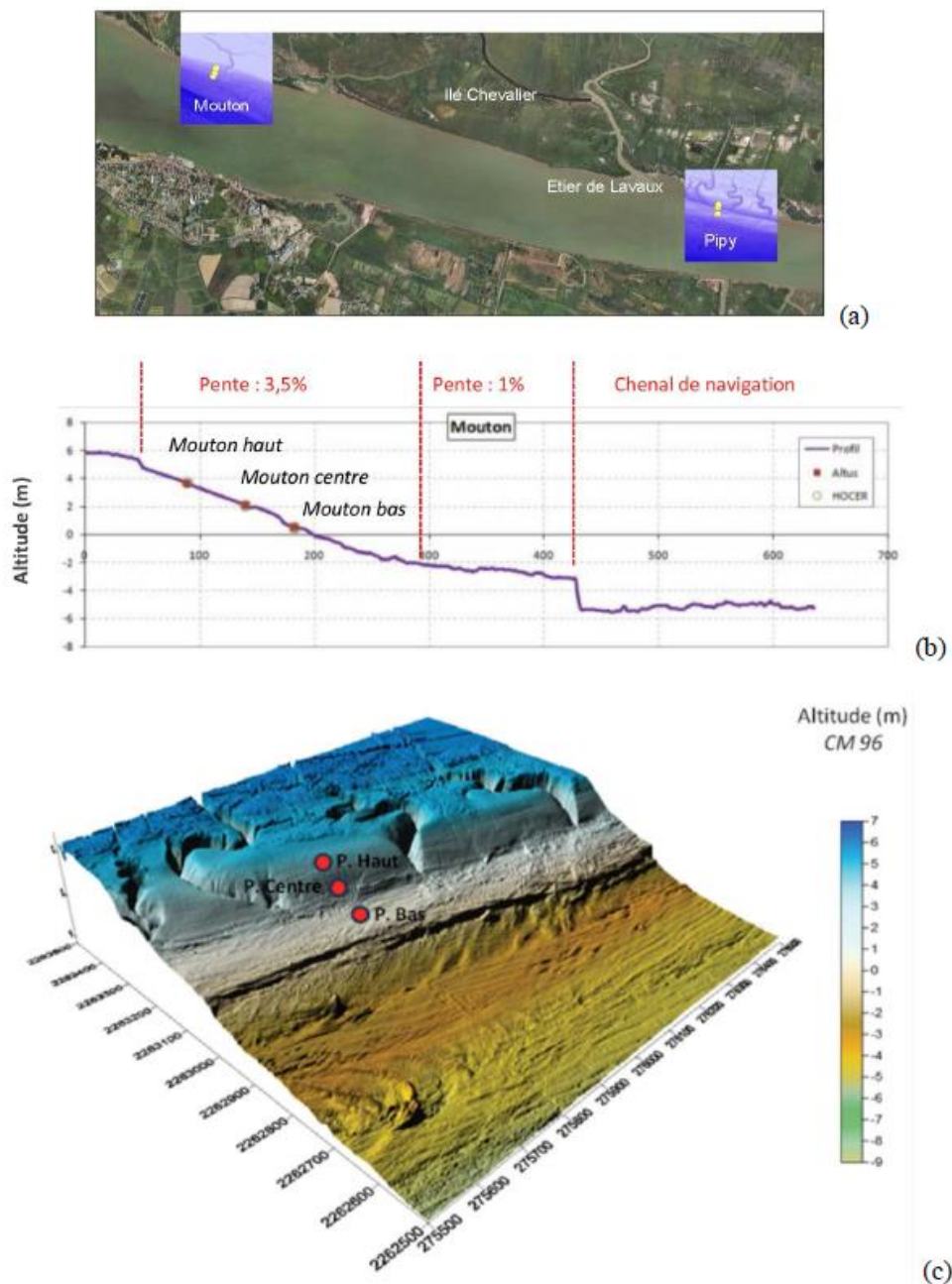


Figure 2.11. Exemple de mise en place d'un suivi de la topographie des vasières - site de Mouton et de Pipy (Geotransfert, 2011)

Ces suivis ont permis de mettre en relation la sédimentation des vasières et les processus hydrosédimentaires naturels, dont les facteurs prépondérants sont les suivants :

- la position sur la vasière : le haut est relativement stable et évolue lentement (variation de 10 cm), tandis que le bas, plus souvent submergé et proche du chenal de navigation, est marqué par des modifications importantes et rapides des altitudes (variations pouvant atteindre 20 à 30 cm) ;
- le régime fluvial et la position du bouchon vaseux : les évolutions s'enregistrent à l'échelle annuelle et peuvent atteindre jusqu'à 20 cm. En période d'étiage, la haute vasière est stable tandis que la partie basse montre une tendance érosive. En période de crue on observe une érosion lente de la partie haute et une accrétion sur la partie basse ;
- la marée :
 - cycle mortes-eaux/vives-eaux : les évolutions peuvent atteindre 10 cm. Les phases de déchet⁴ et de mortes-eaux favorisent la sédimentation, au contraire du revif et des vives-eaux qui sont responsables de périodes d'érosion. Les baisses des coefficients et des vitesses des courants de marée associées provoquent le dépôt sur les vasières et une baisse très nette de la turbidité dans l'estuaire et inversement ;
 - cycle basse mer/haute mer : à l'échelle diurne et semi-diurne, des évolutions de quelques millimètres à quelques centimètres ont été observées. Les moments de sédimentation peuvent varier en fonction des conditions (crue/ étiage, ME/VE) et de la localisation ;
- l'agitation et les tempêtes : sur les enregistrements altimétriques ponctuels, la dynamique estuarienne prédomine par rapport à l'action érosive des vagues.

Au niveau des zones de marais et de prairies humides, la dynamique sédimentaire est liée aux apports de la Loire par submersions des sédiments en suspension. Les phénomènes de submersion vont donc dépendre du niveau d'eau contrôlé par la marée, du débit (surtout en zone amont) et des phénomènes météorologiques. L'expansion des eaux est ensuite conditionnée par d'autres facteurs comme la présence d'étiers, la topographie générale, l'humidité du sol, la végétation.

Evaluation des effets du dragage sur la sédimentation latérale

La Chambre d'Agriculture a émis l'hypothèse d'un lien direct entre les dragages d'entretien du port, leur potentiel de remise en suspension de sédiments et l'envasement chronique des prairies engendrant donc des impacts négatifs sur les pratiques agricoles dans l'estuaire amont. Si cette augmentation de remise en suspension des sédiments coïncide avec une période de vive-eau, voire à un effet de surcote important, elle peut contribuer localement à une submersion des berges et des prairies voisines par des eaux chargées en sédiment. Ces problèmes d'envasement, qui ont été particulièrement importants en 2010, ont été rapportés par les agriculteurs au GPMNSN lors d'une réunion d'échanges tenue le 21/01/2011.

Le GIP-Loire Estuaire a montré (période 2007-2010) que lors des phases de forts coefficients de marée sur les mois d'août à octobre les concentrations en MES autour des pleines mers sont dans la frange haute de celles mesurées sur la période 2007-2010. Ainsi, lors des périodes de forts coefficients de marée, les charges en MES sont élevées autour des pleines mers et il est logique que des dépôts importants soient constatés sur les prairies latérales inondées.

Sur la période 1980-2010, le GIP Loire Estuaire a considéré les marées de coefficient supérieur à 110, puis les vives-eaux d'été et d'automne préjudiciables pour la profession agricole. Se distinguent les années suivantes: 1980, 1984, 1997, 1998, 2002, 2006 et 2010.

Cette analyse semblait donc montrer l'absence de lien entre dépôts sur les prairies et dragages dans le chenal de Nantes.

⁴ période de déchet : diminution du marnage entre la vive-eau et la morte-eau

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

Néanmoins, à la demande du GPMNSN, HOCER a, au travers de graphiques (exemples ci-dessous), mis en parallèle les activités de dragage, les paramètres environnementaux (suivis SYVEL, données hydrologiques, données météo, marée, ...) et les phénomènes d'envasement constatés sur les vasières et les prairies humides sur les années 2012 et 2013 (cf. figures ci-dessous).

Pour rappel, la position des stations selon les points kilométriques (PK) est la suivante : Donges (PK24) ; Paimboeuf (PK29) ; Cordemais (PK42) ; Le Pellerin (PK52) ; Trentemoult (PK67) ; Bellevue (PK 76).

Les niveaux de dragage ont été définis selon les volumes mobilisés :

- Niveau 1 : < 5 000 m³ ;
- Niveau 2 : 5 000 à 10 000 m³ ;
- Niveau 3 : 10 000 m³ à 50 000 m³ ;
- Niveau 4 : > 50 000 m³.

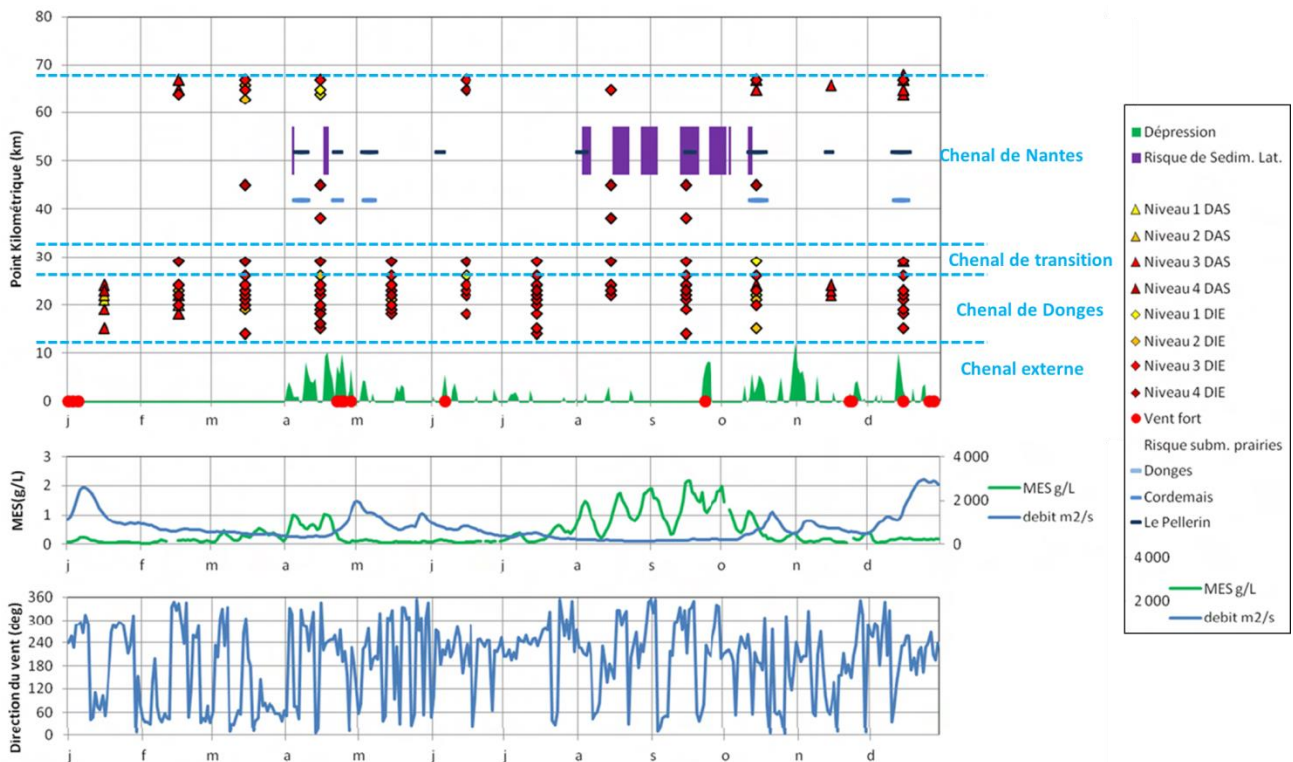


Figure 2.12. Suivis du risque de sédimentation latérale et des opérations de dragage sur l'année 2012 (étude ACRI-HE, 2014)

Renouvellement de l'autorisation des dragages-immersions du GPMNSN

Etude hydro-sédimentologique

R1 - ANNEXE 3 : SUIVI HYDROSEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

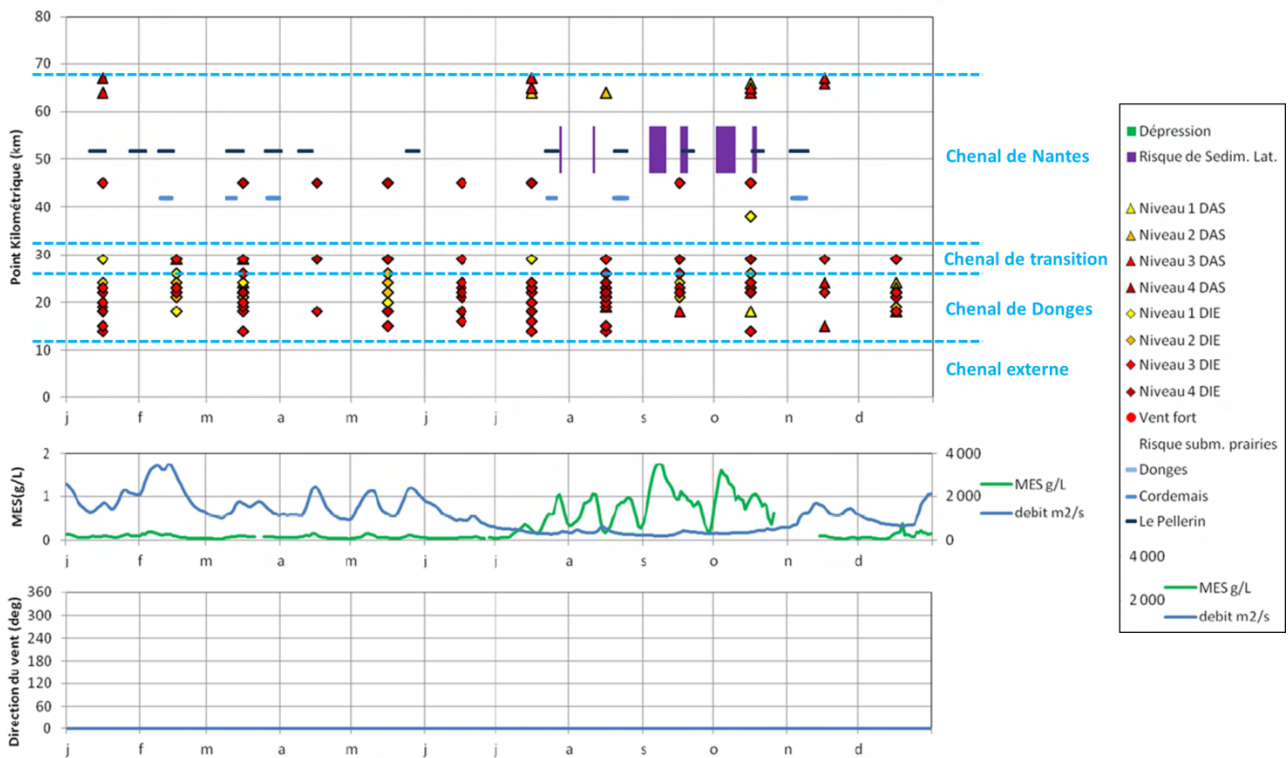


Figure 2.13. Suivis du risque de sédimentation latérale et des opérations de dragage sur l'année 2013 (étude ACRI-HE, 2014)

La comparaison des évènements de submersion aux périodes de dragage et de turbidités intenses permet d'identifier des situations à risque de sédimentation.

Pour les évènements de septembre 2012, les suivis montrent qu'au moment des grandes marées de septembre, les actions de dragage étaient réalisées bien en aval (à Montoir) ou en amont (à Nantes). En fait, plus que l'impact direct des dragages d'entretien, il apparaît hautement probable que c'est la position du bouchon vaseux, sa charge sédimentaire et la présence conjointe de quantités importantes de crème de vase qui conditionnent fortement les taux d'envasement sur les prairies latérales.

Sur les deux années d'observation (2012 et 2013), on constate que :

- l'augmentation des valeurs de MES est corrélée à la diminution du débit de la Loire et ne semble pas en lien avec les activités de dragage ;
- les risques de sédimentation latérale sont concentrés au niveau de la section 10 (Pk 49 à Pk 57) et ne sont donc pas localisés dans un secteur où les opérations de dragage sont les plus importantes. Il n'y a pas d'opération de dragage sur les sections 10 et 11 (Pk 57 à 67) ;
- pour les sections 7 à 9 (Pk 26 à Pk 49), les opérations de dragages ont été réalisées par DIE, qui a été mis en œuvre uniquement en jusant. Ces sections se situant en aval des zones à risque, les impacts peuvent donc être considérés comme négligeables ;
- la période où ont été identifiés les risques de sédimentation latérale s'étale d'août à mi-octobre. Aucune opération de dragage n'a été réalisée de juillet à septembre en 2012 et d'août à octobre en 2013 au niveau de la section 12 (port de Nantes), en amont de la zone identifiée à risque.

Sur les années 2012-2013, les opérations de dragage d'entretien du chenal de Nantes ne présentent donc pas des caractéristiques les désignant comme facteur influençant notablement les dépôts latéraux dans l'estuaire.

2.4.3. Conclusion

Les études menées se sont schématiquement déroulées en trois phases :

- la recherche bibliographique, démontrant que la sédimentation et l'évolution des zones latérales sont liées à différents phénomènes et à différentes échelles de temps : des cycles annuels de la marée et de l'hydraulicité de la Loire aux cycles glacio-eustatiques sur des temps géologiques en passant par les aménagements réalisés par l'homme à l'échelle pluriannuelle ;
- l'analyse de mesures in-situ montrant que la sédimentation des vasières à court et moyen terme était liée aux conditions hydrosédimentaires de l'estuaire. Ainsi, la sédimentation des berges latérales est alimentée par les matériaux transportés par la Loire (bouchon vaseux). Les niveaux de sédimentation dépendent du rapport entre la cote topographique et le niveau d'eau suivant la marée (ME-VE) et le débit de la Loire. Ainsi le risque de sédimentation des prairies est d'autant plus fort lorsque la présence du bouchon vaseux coïncide avec une période de vive-eau et une période de crue ;
- la mise en parallèle des activités de dragage, des paramètres environnementaux et des phénomènes d'envasement constatés sur les vasières et les prairies humides sur les années 2012 et 2013 :
 - les risques de sédimentation latérale sont concentrés au niveau de la section 10 (Pk 49 à Pk 57) ;
 - **les suivis ne montrent pas que les opérations de dragage constituent un facteur influençant les dépôts latéraux dans l'estuaire.**

Suite à ces conclusions, le suivi de la sédimentation latérale a été supprimé des suivis réglementaires à réaliser par le GPM dans l'arrêté complémentaire du 31 décembre 2020.

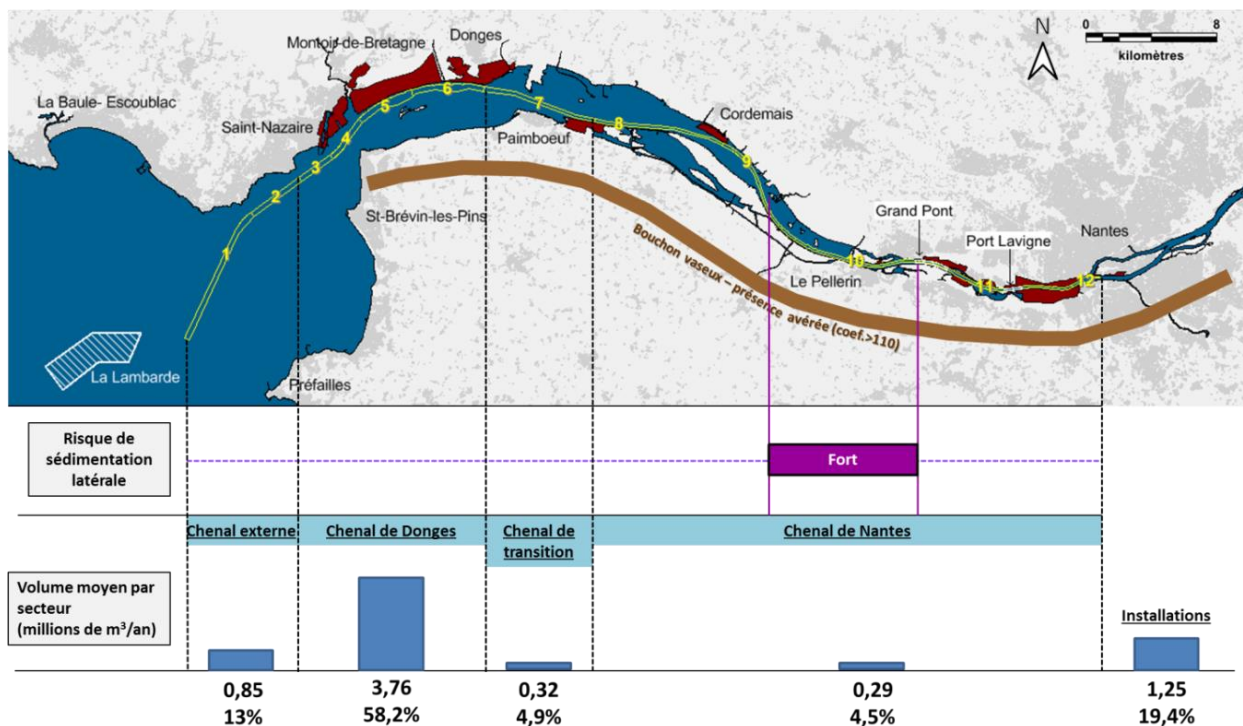


Figure 2.14. Carte de synthèse sur la sédimentation latérale en estuaire de Loire

BIBLIOGRAPHIE

ACRI-HE, 2014. Constitution d'une base de données pour le suivi environnemental des dragages d'entretien du GPM dans l'estuaire de la Loire. Réalisation d'un suivi des épisodes de sédimentation latérale.

ARTELIA, 2011. Développement et exploitation d'un modèle hydrosédimentaire en trois dimensions sur l'estuaire de la Loire. Lot 1 – phase 3 : Tests de sensibilité. Rapport n° 171 1822 R23 de décembre 2011 établi pour le compte du GIP Loire estuaire.

ARTELIA, 2015. Justification des modifications des pratiques de dragage d'entretien sur le secteur amont de l'estuaire de la Loire.

ARTELIA, 2018. Evaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par DAS et par DIE. Rapport R1 – analyse quantitative des pratiques.

ARTELIA, 2018. Evaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par DAS et par DIE. Rapport R2 – évaluation par modélisation numérique.

ARTELIA/CREOCEAN, 2012, Dossier Loi sur l'Eau dans le cadre de la demande de renouvellement des autorisations pour le dragage et l'immersion des sédiments du Grand Port Maritime de Nantes – Saint-Nazaire.

GIP Loire-Estuaire, 2021. Données du réseau de suivi SYVEL.

GIP Loire-Estuaire, 2018. L'essentiel de la Loire, de la Maine à la mer.

HOCER, 2009. Analyse des données relatives à la crème de vase de l'estuaire de la Loire. Rapport d'étude n° HCR/BT/08/CMB05/RE v2.1 du 10 mars 2009 établi pour le compte du GIP Loire Estuaire

HOCER, 2013. Réalisation d'un suivi de la sédimentation latérale. Rapport d'étude.

Service Accès Nautique du port, 2021. Levés bathymétriques de la zone d'immersions de Grand Pont de 2014 à 2020.