



Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire

GIP Loire Estuaire

EXPLOITATION DU MODELE GLOBAL – MODELISATIONS DE L'OXYGENE DISSOUS SUR 3 A 4 MOIS D'ETIAGE (2018)

Rapport de Phase 2 – MODELISATIONS DE L'OXYGENE DISSOUS - version V1

Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire

GIP Loire Estuaire

EXPLOITATION DU MODELE GLOBAL – MODELISATIONS DE L'OXYGENE DISSOUS SUR 3 A 4 MOIS D'ETIAGE (2018)

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI PAR	APPROUVÉ PAR	DATE
1	Version V1	RWR, ALR	OBD	31/03/2023

Artelia
6 rue de Lorraine 38130 Echirolles – TEL 04 76 33 43 45

Artelia
6 rue de Lorraine 38130 Echirolles

SOMMAIRE

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS	4
1. MÉTHODOLOGIE	5
1.1. Objectifs.....	5
1.2. Périodes considérées.....	5
1.3. Conditions initiales.....	7
1.4. Forçage hydrométéorologique et conditions aux limites	7
1.5. Température de l'eau	7
1.6. Modélisation des dragages DAS et DIE	8
1.6.1. Position horizontale du point de rejet.....	8
1.6.2. Position et étendue de la zone de dragage correspondante	9
1.6.3. Position verticale du point de rejet dans la colonne d'eau.....	9
1.6.3.1. Rejet par DIE	9
1.6.3.2. Rejet par DAS	9
1.6.4. Débit solide de la masse de vase rejetée.....	10
1.6.5. Dates et heures de début et durée d'activité d'une opération de dragage	10
2. RÉSULTATS HYDROSÉDIMENTAIRES - BILAN DE MASSE	11
2.1. Calcul de référence (sans dragage)	11
2.1.1. Estuaire dans sa globalité : sections 1 à 12 et amont	11
2.1.2. Répartition par section dans l'estuaire.....	12
2.2. Impact des dragages sur la MES.....	14
2.2.1. Estuaire dans sa globalité	14
2.2.2. Répartition entre sections dans l'estuaire.....	15
2.3. Analyse quantitative de l'impact	17
3. IMPACT DES DRAGAGES SUR L'OXYGÈNATION ET LA MES... 19	19
3.1. Evolution temporelle aux points SYVEL	19
3.2. Temps de dépassement en oxygène dissous.....	19
3.3. Cartographie de la concentration en oxygène dissous	22
RÉFÉRENCES	24

TABLEAUX

Tableau 1-1 : Paramètre de l'équation de température.....	8
Tableau 1-2 : Coordonnées des sections pour la modélisation	9
Tableau 2-1 : Masse moyenne sur la durée de simulation de référence (sc1) par section exprimé en Mt ..	18
Tableau 3-1 : Seuil de concentration en oxygène dissous et impact sur les poissons, d'après GIP Loire[5]	19
Tableau 3-2 : Temps passé (pourcentage) en-dessous des seuils en oxygène dissous à 5 mg/l et 3 mg/l ...	21

FIGURES

Figure 1-1 : Occurrence des dragages DAS et DIE de juin à septembre à 2018	5
Figure 1-2 : Répartition géographiques et intensité des dragages DAS et DIE sur l'année 2018	6
Figure 1-3 : Schéma de principe des ateliers de dragages dans l'estuaire de la Loire (source : GIP Loire[6])	6
Figure 2-1 : Position des sections pour l'analyse des masses de sédiment	11
Figure 2-2 : Variation de la masse de vase dans le sol et en suspension dans l'estuaire.....	12
Figure 2-3 : Répartition par section de la masse de sédiment en suspension.....	13
Figure 2-4 : Répartition par section de la variation de masse de sédiment au sol	14
Figure 2-5 : Différence de la variation de la masse de vase dans le sol et de la masse en suspension	15
Figure 2-6 : Différentiel par section de la variation de masse au sol	16
Figure 2-7 : Différentiel de la répartition par section de masse en suspension	17
Figure 3-1 : Temps passé en-dessous du seuil à 5 mg/ dans le scenario 1 (sans dragage), surface	20
Figure 3-2 : Temps passé en-dessous du seuil à 5 mg/ dans le scenario 2 (avec dragage), surface	20
Figure 3-3 : Temps passé en-dessous du seuil à 3 mg/ dans le scenario 1 (sans dragage), surface	20
Figure 3-4 : Temps passé en-dessous du seuil à 3 mg/ dans le scenario 2 (avec dragage), surface	21
Figure 3-5 : Jusant : différentiel d'oxygène dissous (sc2-sc1) à 0.5 m au-dessus du fond (bas) et 1 m au-dessus du fond (haut).....	22
Figure 3-6 : Flot après la basse mer : différentiel d'oxygène dissous (sc2-sc1) à 0.5 m au-dessus du fond (bas) et 1 m au-dessus du fond (haut)	23

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Le Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire (GIP LE) dispose d'un outil de modélisation hydrosédimentaire et de qualité des eaux (HSQE) de l'estuaire de la Loire décrit dans le rapport « Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire : Construction, calage et validation du modèle global 3d hydrosédimentaire et d'oxygène dissous, Rapport de Phase 1 – version V2.1 » [1].

Ce modèle opérationnel de l'estuaire de la Loire peut maintenant être exploité pour étudier à l'échelle spatiale de l'estuaire les paramètres : niveaux d'eau, courants, houles, salinité, MES, crème de vase et oxygène dissous tout en restant dans le cadre de l'objectif initial pour lequel il a été construit et validé.

La tranche ferme de la phase 2 du marché prévoit l'application de ce modèle global 3D hydrosédimentaire et qualité des eaux afin de reproduire l'effet des dragages DAS et DIE durant une période de trois à quatre mois d'étiage sur les concentrations en MES et en d'oxygène dissous dans l'estuaire interne. Dans ce but, il est réalisé une simulation avec dragage DIE et DAS, ainsi qu'une simulation sans dragage sur la période de juillet à octobre 2018.

Sur les quatre mois étudiés, les dragages par DAS et DIE modélisés, qui ont remobilisés environ 2 millions de tonnes (Mt) de sédiments, ont un impact sur la masse en suspension dans l'estuaire avec une augmentation de l'ordre de 2,75%. En termes de répartition, c'est la section 9-10 où se situe le maximum de concentration du bouchon vaseux qui est la plus impactée avec un pourcentage de variation de 3,36%. Au maximum, sur le dernier cycle de la période, c'est 0.04 Mt de sédiment en plus en suspension qui sont modélisés pour un bouchon vaseux d'environ 0,5 Mt soit un impact d'environ 8%. Les dragages associés à une dynamique estuarienne d'étiage ont par ailleurs permis un déplacement de vase de l'aval vers l'amont sous forme de dépôt équivalent à 0.12 Mt.

Pour l'oxygène dissous, le modèle tend à sous-estimer les déficits observés lors des périodes de grande vive-eau (les 14/08 et 13/09) aux stations SYVEL sur la période de l'été 2018. Sous l'effet des dragages DIE et DAS, il y a une diminution de l'oxygénation des eaux en corrélation avec une augmentation de la MES dans les eaux. La variation de concentration en oxygène dissous par l'activité de dragage est de l'ordre de 0.2 mg/l au maximum et 0.2 g/l pour la concentration en MES. Ce différentiel est plus important durant les phases de vive-eau, aussi bien pour les MES et l'oxygène dissous.

Le temps passé en-dessous du seuil sensible à 5 mg/l et du seuil critique à 3 mg/l en oxygène dissous dans les eaux de surface est calculé pour les deux situations avec et sans dragage. L'analyse des résultats montrent que les durées les plus longues se situent au niveau de Cordemais, avec des pourcentages de temps de l'ordre de 56% en dessous du seuil sensible et d'environ 7% en dessous du seuil critique. Les dragages produisent un allongement de la durée passée en-dessous des seuils. Pour le seuil sensible, le maximum de variation par l'effet des dragages se situent aux stations de Donges et Paimboeuf soit à l'aval de Cordemais. Pour le seuil critique à 3mg/l, le maximum de variation se situe au Pellerin et à Cordemais, soit à l'amont de Cordemais. L'impact des dragages sur l'augmentation de la durée en dessous des seuils est au maximum de 2.1% du temps pour le seuil à 5 mg/l et 1% du temps pour le seuil à 3 mg/l.

Les cartographies à plusieurs instants de la marée montrent une modification locale plus importante sous l'effet du panache en sédiment lié aux opérations de dragage, avec notamment une baisse de la concentration en oxygène dissous au niveau du site de dragage.

1. METHODOLOGIE

1.1. OBJECTIFS

L'objectif de la modélisation est de simuler l'impact des dragages par Drague Aspiratrice Stationnaire (DAS) et par Drague à Injection d'Eau (DIE) sur les concentrations en oxygène dissous, la répartition des MES et la masse de bouchon vaseux dans la Loire en période d'étiage. Cet impact est réalisé par la comparaison des résultats de deux simulations de 4 mois en période d'étiage, l'une sans dragage et l'autre avec dragages.

1.2. PERIODES CONSIDEREES

La période simulée correspond à l'été 2018. L'été 2018 est caractérisé par l'occurrence d'une crue à mi-juin avec un pic à 1660 m³/s le 14 juin (Figure 1-1). Par la suite les débits diminuent, avec le seuil de 500 m³/s franchit le 27 juin 2018, puis le seuil à 300 m³/s franchit le 14 juillet 2018. Le débit reste inférieur à 300 m³/s du 14 juillet 2018 au 12 novembre 2018. Il est inférieur à 200 m³/s sur la période d'août, septembre et octobre 2018.

La Figure 1-1 présente la répartition temporelle et les masses draguées pour les deux types de dragues. Sur la période de juin à octobre 2018, les dragages DAS sont interrompus sur la période du 28 juin au 14 septembre. Les dragages DIE ne commencent qu'à partir du 20 juin 2018.

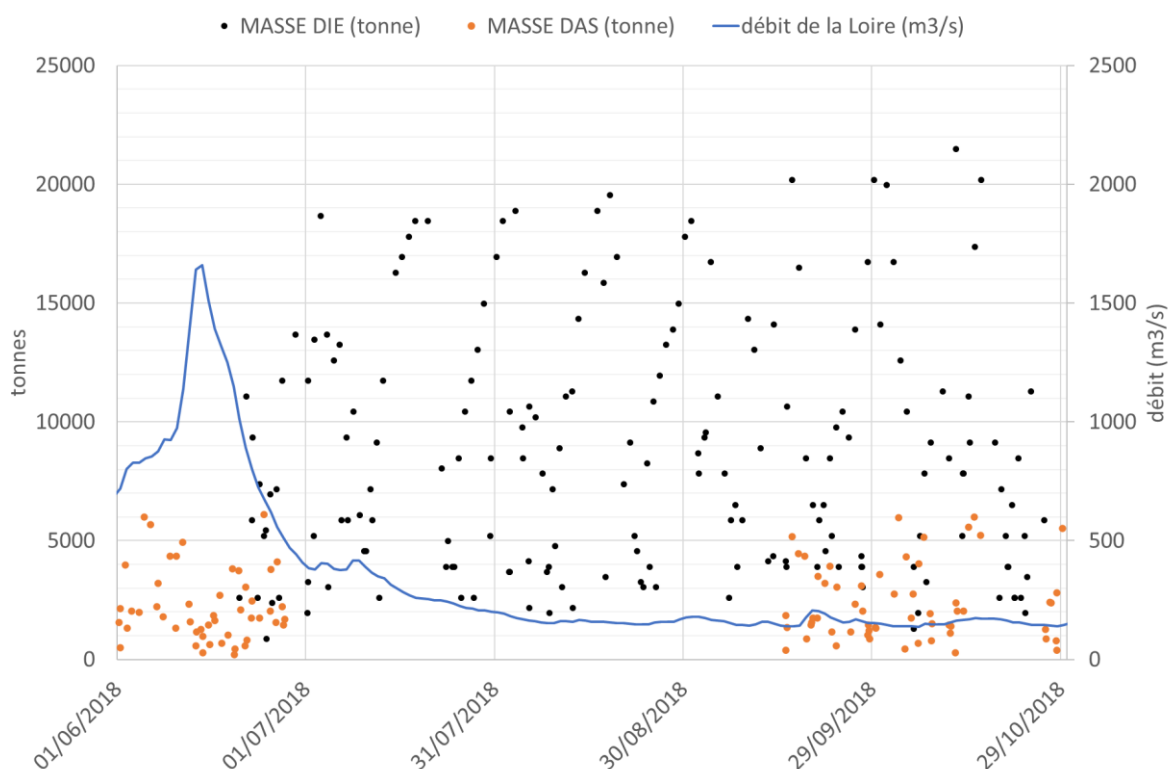


Figure 1-1 : Occurrence des dragages DAS et DIE de juin à septembre à 2018

La répartition géographique et l'intensité des dragages dans l'estuaire interne en fonction de la date montre que les dragages DAS ont lieu dans le chenal aval (Figure 1-2). Les dragages DIE sont répartis essentiellement dans le chenal maritime et le chenal aval. Ils se produisent plus rarement à l'amont de Cordemais. Les dragages par DIE au niveau de Trentemoult n'ont lieu qu'en septembre et octobre. Cette répartition sur l'année 2018 est globalement représentative

du schéma de principe de la répartition des ateliers de dragages annuels (Figure 1-3). Il est à noter l'absence de dragage DAS au niveau de Trentemoult sur la période considérée de l'été 2018.

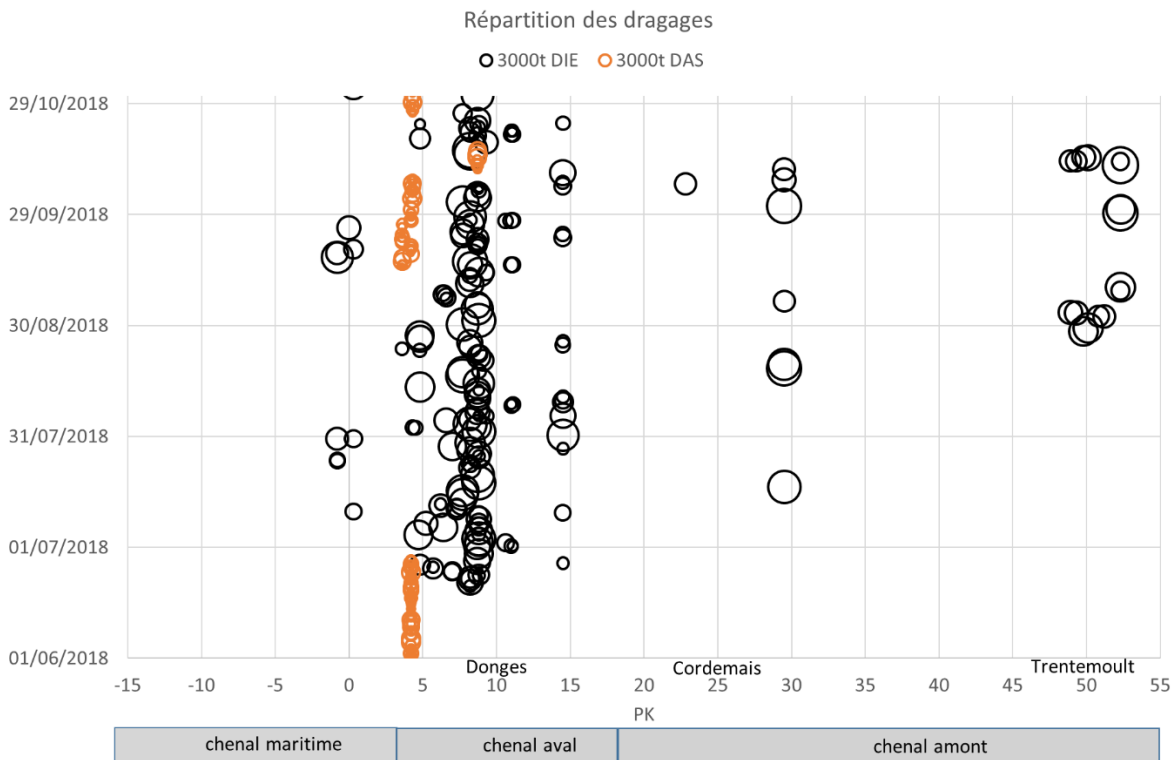


Figure 1-2 : Répartition géographique et intensité des dragages DAS et DIE sur l'année 2018

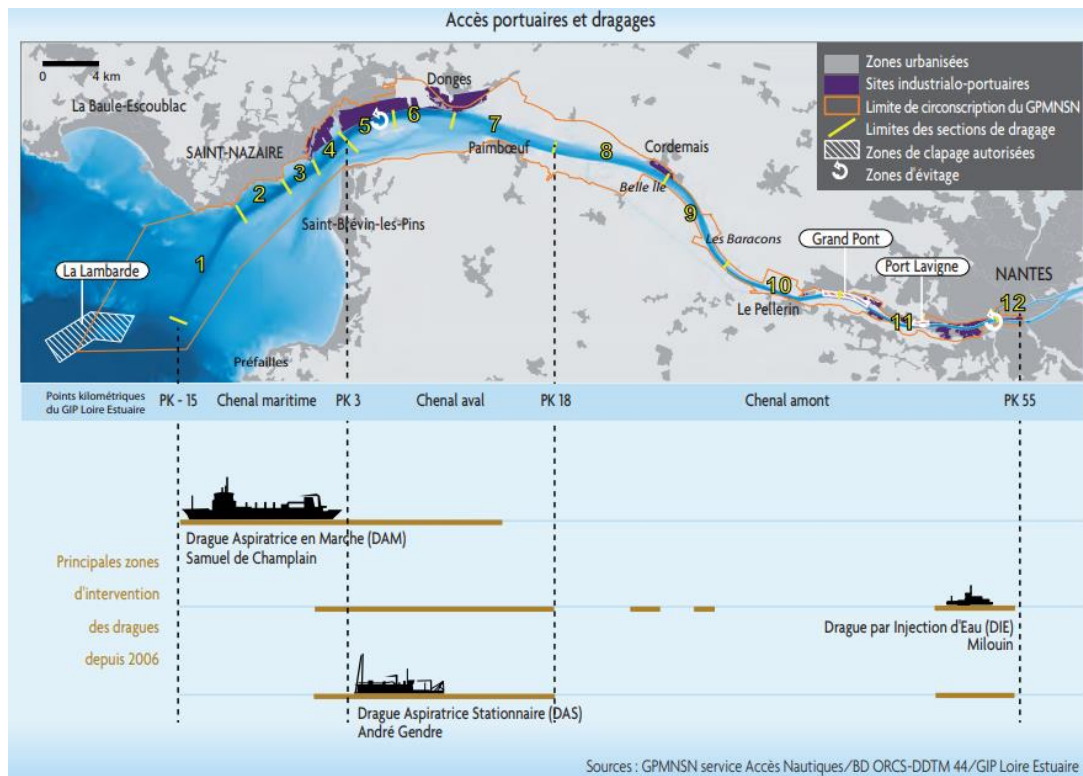


Figure 1-3 : Schéma de principe des ateliers de dragages dans l'estuaire de la Loire (source : GIP Loire[6])

Pour la modélisation, il a été réalisé deux simulations avec le modèle hydrosédimentaire et d'oxygène dissous.

- Scenario 1 : simulation du 07/06/2018 au 31 octobre 2018, sans dragage (ou simulation dite de référence)
- Scenario 2 : simulation du 07/06/2018 au 31 octobre 2018 (soit la même période), avec la prise en compte des opérations des dragages DAS et DIE à partir du 25/06/2018

1.3. CONDITIONS INITIALES

Chaque simulation débute à la date du 07/06/2018 et prend en compte les résultats à cette date (suite de calcul) obtenus par la simulation de calibration en hydrosédimentaire seule de l'année hydrologique 2017-2018 (cf rapport [1]). Les deux scénarios sont donc initialisés pour les paramètres hydrodynamiques (niveau d'eau, courants, salinité) et les paramètres hydrosédimentaires (composition sédimentaire du fond et en suspension) identiques, issus des résultats d'une simulation de plus d'un an. Le modèle possède donc à ce moment quasiment un an d'initialisation, avec notamment un bouchon vaseux bien établi et représentatif du jour de début de la simulation.

Les variables de qualité des eaux à la date de début des simulations du 07/06/2018 sont initialisées avec des valeurs constantes. La concentration en oxygène dissous (O_2) est de 8 mg/l, la concentration en chlorophylle a (PHY) est de 10 $\mu\text{g/l}$ la concentration en ammonium (NH_4^+) est de 0.05 mg/l.

Le travail réalisé en phase 1 a montré que la période d'initialisation est de l'ordre de 10 jours pour les variables de qualité des eaux sur une simulation réalisée à partir d'un état initialisé en matière en suspension, en salinité et en hydrodynamique. La période du 07/06 au 25/06 est donc une période suffisante pour l'ajustement des variables de qualité des eaux.

1.4. FORÇAGE HYDROMETEOROLOGIQUE ET CONDITIONS AUX LIMITES

Sur l'aval du modèle, les forçages en marée et courants correspondent à ceux de la période réelle de juin à octobre 2018. Les variations de pression atmosphérique, de vent et de houle sur cette même période sont également prises en compte.

A la frontière amont, les apports en MES varient en fonction du débit (cf rapport [1]). Pour les variables qualité des eaux, les apports en phytoplancton sont variables en temps et déduites des valeurs de concentration en chlorophylle a (PHY) sur la période modélisée. Pour l'oxygène dissous (O_2), la concentration est établie à partir de la concentration de saturation, calculée à partir des mesures haute fréquence en température à Montjean-sur-Loire et en tenant compte du pourcentage de saturation obtenue par les mesures basse-fréquence DDTM à Montjean-sur-Loire. La concentration en ammonium est considérée constante à 0.05 mg/l.

1.5. TEMPERATURE DE L'EAU

Pour rappel la température de l'eau est prise en compte sous la forme d'une équation paramétrique permettant de représenter les variations annuelles de la température journalière selon la formule [1] :

$$T(x,t)=T_a(x)+T_b(x) \sin (2 \pi (t-T_{\text{phase}})/ 365.25)$$

Les paramètres T_{max} , T_{min} et T_{ref} sont des paramètres déterminés par les observations à différentes stations le long de l'estuaire. Un nouvel ajustement de la loi paramétrique a été réalisé sur la période 2018 à partir des mesures haute-fréquence du réseau SYVEL. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1-1. Cette année est représentative d'une année très chaude comme le montre les valeurs d'ajustement T_{min} et T_{max} , supérieure d'environ 1 degré aux valeurs d'ajustement calculées en utilisant plusieurs années de mesures (cf rapport [1]).

Tableau 1-1 : Paramètre de l'équation de température

station	Tmin (deg. C)	résidu	t value	Tmax (deg. C)	résidu	t value	T_phase (jours)	résidu	t value	residu standard error	nombre d'années	Coef. de corrélacion
Montjean-sur-Loire	6.04	0.14	44.32	24.45	0.14	179.54	111.75	0.70	159.14	1.50	1	0.9498
Mauves-sur-Loire	6.22	0.27	23.43	25.95	0.21	125.27	114.94	1.17	98.48	1.88	1	0.9327
Bellevue	5.70	0.17	33.57	24.76	0.17	149.22	115.74	0.90	128.90	1.82	1	0.9683
Trentem.	6.17	0.18	34.59	25.13	0.16	157.93	113.89	0.92	124.03	1.63	1	0.9742
Le Pellerin	5.49	0.18	30.92	25.22	0.16	157.45	115.68	0.81	142.17	1.63	1	0.9739
Cordemais	6.25	0.14	44.61	24.33	0.14	175.28	115.26	0.74	156.59	1.53	1	0.9865
Paimboeuf	6.17	0.13	48.49	22.80	0.11	207.95	117.73	0.66	177.92	1.16	1	0.9715
Donges	7.22	0.05	153.70	21.23	0.05	442.80	119.49	0.33	364.40	1.20	1	0.9717

1.6. MODELISATION DES DRAGAGES DAS ET DIE

Une opération de dragage par DAS ou DIE est simulée dans le modèle par un ou plusieurs « points sources » rejetant un débit solide de vase (les deux types de drague ne font « que » remobiliser les sédiments, il n'y a pas d'exportation vers la Lambarde comme pour la DAM). La même quantité de vase est alors enlevée (dragage) dans le sol sur une étendue définie afin d'avoir une conservation de la masse. Une opération de dragage doit donc être définie en entrée sous forme de 5 données :

- Position horizontale X, Y du point de rejet,
- Position et étendue X, Y de la zone de dragage correspondante,
- Position verticale Z du point de rejet dans la colonne d'eau au point de rejet,
- Débit solide de la masse de vase rejetée,
- Date et heure de début d'activité et durée du dragage.

1.6.1. Position horizontale du point de rejet

La position des dragages DAS et DIE est issue des fichiers fournis par le GPMNSN. Lorsque les positions sont définies par des noms de zone ou section, une position centrale du point de rejet par rapport à la zone affectée a été attribuée pour la simulation. Les coordonnées correspondantes pour les sections 3 à 9 sont fournies dans le Tableau 1-2. La position temporelle des dragages DAS et DIE en fonction de la date est répertoriée sur la Figure 1-2.

Tableau 1-2 : Coordonnées des sections pour la modélisation

	X_RGF93 (m)	Y_RGF93 (m)
Section 3	306514.695	6697237.163
Section 4	308581.164	6698955.887
Section 5	311433.822	6701064.711
Section 6	315312.461	6701679.229
Section 7	320654.982	6700278.052
Section 8	328755.638	6698223.722
Section 9	333695.574	6694484.105

1.6.2. Position et étendue de la zone de dragage correspondante

La position du point de rejet de dragage étant représentative d'une zone de dragage, l'emprise où le sédiment correspondant doit être prélevé dans le sol doit être plus étendue qu'uniquement sous le point de rejet, afin notamment d'assurer la présence suffisante de sédiment. Il a été effectué le choix de draguer une zone comprise dans un rayon de 1000 mètres autour du point de rejet, dans le chenal de navigation.

1.6.3. Position verticale du point de rejet dans la colonne d'eau

La méthodologie de modélisation d'un rejet de DAS et DIE a été développée lors d'une étude d'évaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par aspiratrice stationnaire (DAS) et par injection d'eau (DIE), effectuée pour le GPMNSN [4]. Les méthodologies ont d'abord été calées sur un ensemble de mesures disponibles ce qui a conduit à mettre en œuvre une modélisation spécifique séparée du champ proche dont les résultats sont ensuite introduits sous forme de points sources dans le modèle de l'estuaire. Ces mêmes méthodologies sont reprises ici.

1.6.3.1. Rejet par DIE

Les campagnes expérimentales de dragages par injection d'eau en Loire ont été systématiquement accompagnées, entre 2006 et 2012, par un suivi environnemental. Ce suivi portait sur les incidences du DIE sur la qualité de l'eau et notamment la MES et la crème de vase. Plusieurs périodes de campagnes expérimentales ont permis de calibrer les paramètres de modélisation propre à une opération de dragage par DIE [4]. Sur la base de ces éléments, le rejet est effectué par un point source se situant à 0,5 m au-dessus du fond, soit pour notre modèle sur le 2^{ème} plan au-dessus du fond.

1.6.3.2. Rejet par DAS

Le rejet de dragage de la DAS André Gendre, en charge de l'entretien des souilles, s'effectue selon la verticale, en sub-surface (-1m sous la surface), dans le chenal de navigation soumis aux courants de marée. Ce jet, de densité plus

importante que le milieu ambiant, va évoluer rapidement en descendant la colonne d'eau en fonction du débit, de la densité de la mixture, du courant ambiant et de la hauteur d'eau. Une analyse de jets plongeants à forte densité par des mesures expérimentales en laboratoire [4] et une modélisation simple du champ proche par le logiciel Cormix [4] a permis de montrer que l'épaisseur de la couche de mixture en sortie de champ proche représente entre 23 et 46 % de la hauteur d'eau suivant les cas (courants, hauteur, différence de densité). Il a été effectué le choix dans le modèle 3D de rejeter la mixture sur 40% de la colonne d'eau. En effet, les cas où les pourcentages de hauteur d'eau sont plus faibles correspondent 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.

Pour la DAS, le rejet est donc effectué par des points sources sur les plans qui se situent dans les 40 % du bas de la colonne d'eau (variable donc suivant le moment de la marée).

1.6.4. Débit solide de la masse de vase rejetée

L'analyse quantitative des pratiques de dragages par DAS et DIE ont été étudiées lors d'une étude d'évaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par aspiratrice stationnaire (DAS) et par injection d'eau (DIE), effectuée pour le GPMNSN. D'après les conclusions du rapport « Analyse quantitative des pratiques » [3] :

- Un chantier typique de dragage par DAS mènerait à une remise en suspension de 34 680 t de vase sur une durée d'activité 8 jours (à raison de 7,5h effectives/jour). Ceci mène donc à un débit solide moyen de remise en suspension de 581 t/h, lorsque le dragage est effectif.
- Un chantier typique de dragage par DIE mènerait à une remise en suspension de 31 266 t de vase sur une durée d'activité de 12h sur la zone Donges-poste 6. Ceci conduit donc à un débit solide moyen de remise en suspension de 2 605 t/h.

1.6.5. Dates et heures de début et durée d'activité d'une opération de dragage

Les dates et heures de début d'activité ainsi que la durée effective du dragage sont issues directement des fichiers du GPMNSN. Il s'agit donc de l'activité réelle réalisée en 2018.

2. RESULTATS HYDROSEDIMENTAIRES - BILAN DE MASSE

2.1. CALCUL DE REFERENCE (SANS DRAGAGE)

2.1.1. Estuaire dans sa globalité : sections 1 à 12 et amont

La réalisation de la simulation sans dragage permet d'évaluer la répartition de la masse totale de vase modélisée dans l'estuaire (Figure 2-2). L'estuaire est ici défini comme l'ensemble des sections de dragage 1 à 12 définies par le GPMNSN élargies à la largeur de l'estuaire, plus la section amont en Loire.

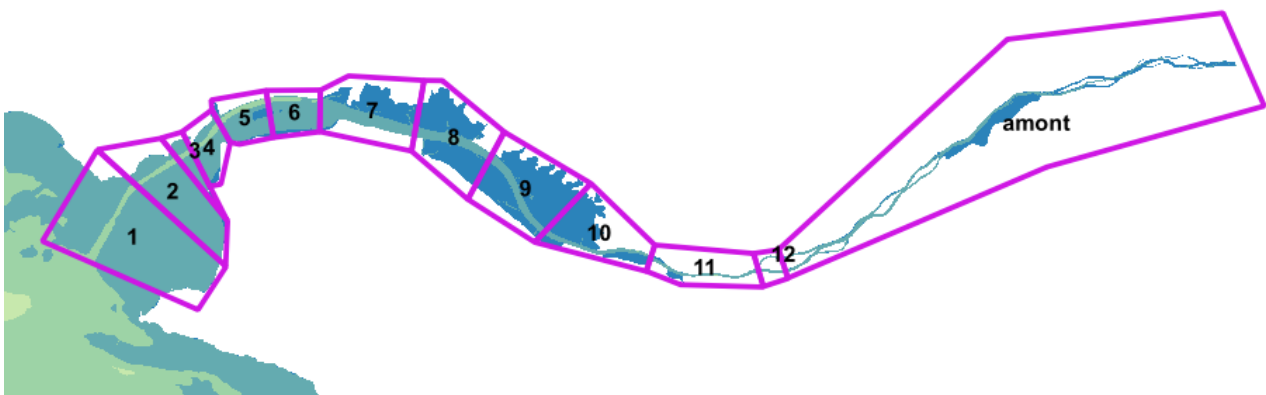


Figure 2-1 : Position des sections pour l'analyse des masses de sédiment

La répartition des masses de vase se décompose globalement sur la période analysée en :

- 13 à 14 Mt dans le sol,
- 0.1 à 1 Mt dans en suspension.

On notera que le total de masse au sol est indicatif car il dépend totalement de l'initialisation du remplissage sédimentaire effectué dans le lit mineur, mais aussi dans le lit majeur (zones submersibles). De plus l'ensemble de ces sédiments n'est pas forcément actif lors de la simulation. Cependant, il est intéressant d'étudier les variations de cette masse au cours du temps, ce qui quantifiera la part mobile ou active du sédiment au sol sur la période. Pour la suite de l'analyse, la variation instantanée de masse au sol par rapport à la masse au sol à la date initiale est donc prise en compte.

L'évolution temporelle de la masse en suspension (Figure 2-2) montre qu'elle est influencée par le cycle de la marée à l'échelle de la journée et à l'échelle des cycles de vive-eau et morte-eau. La variation de la masse au sol est quasiment le symétrique de la variation de masse en suspension, le total des deux étant quasiment stable au cours du temps. En remarque, le total n'est pas centré sur la valeur 0, car au temps initial une quantité d'environ 0,1 Mt de sédiment est en suspension alors que la variation de masse est-elle initialisée à une valeur nulle. Cela signifie que sur ces 4 mois à débit faible, les apports amonts et les échanges avec le large sont faibles, l'estuaire dans sa globalité fonctionne quasiment en système fermé.

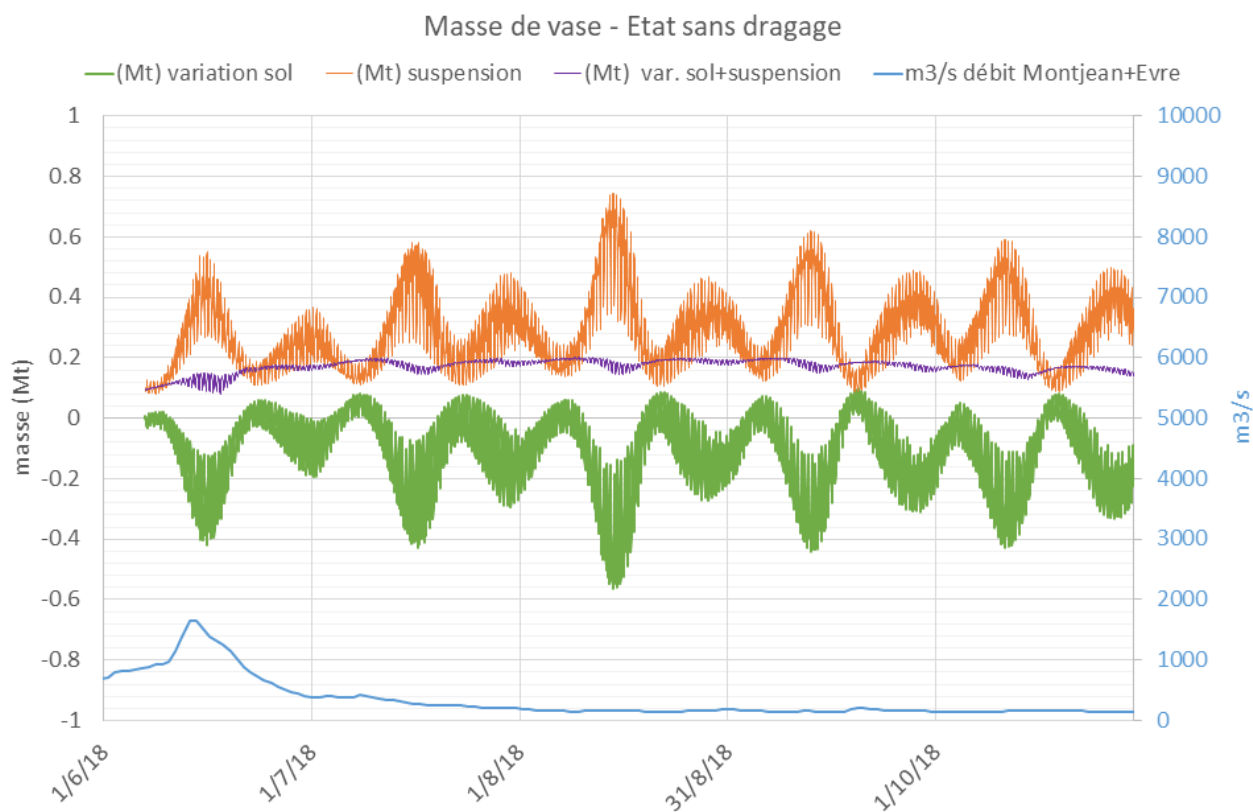


Figure 2-2 : Variation de la masse de vase dans le sol et en suspension dans l'estuaire

2.1.2. Répartition par section dans l'estuaire

Les masses en suspension (Figure 2-3) sont essentiellement réparties sur la partie aval (section 1 à 8) durant la période de juin, caractérisée par des débits de la Loire importants pour la saison et entre 500 et 1500 m³/s. Par la suite, en période de faible débit puis d'étiage de juillet à octobre inclus, la masse turbide se déplace des sections aval vers les sections amont : il y a augmentation de la masse en suspension sur les sections 9 à 12 et amont, ainsi qu'une diminution de la masse des sections 1 à 8 au cours du temps. Ceci illustre bien la remontée à l'amont du bouchon turbide lors de l'étiage.

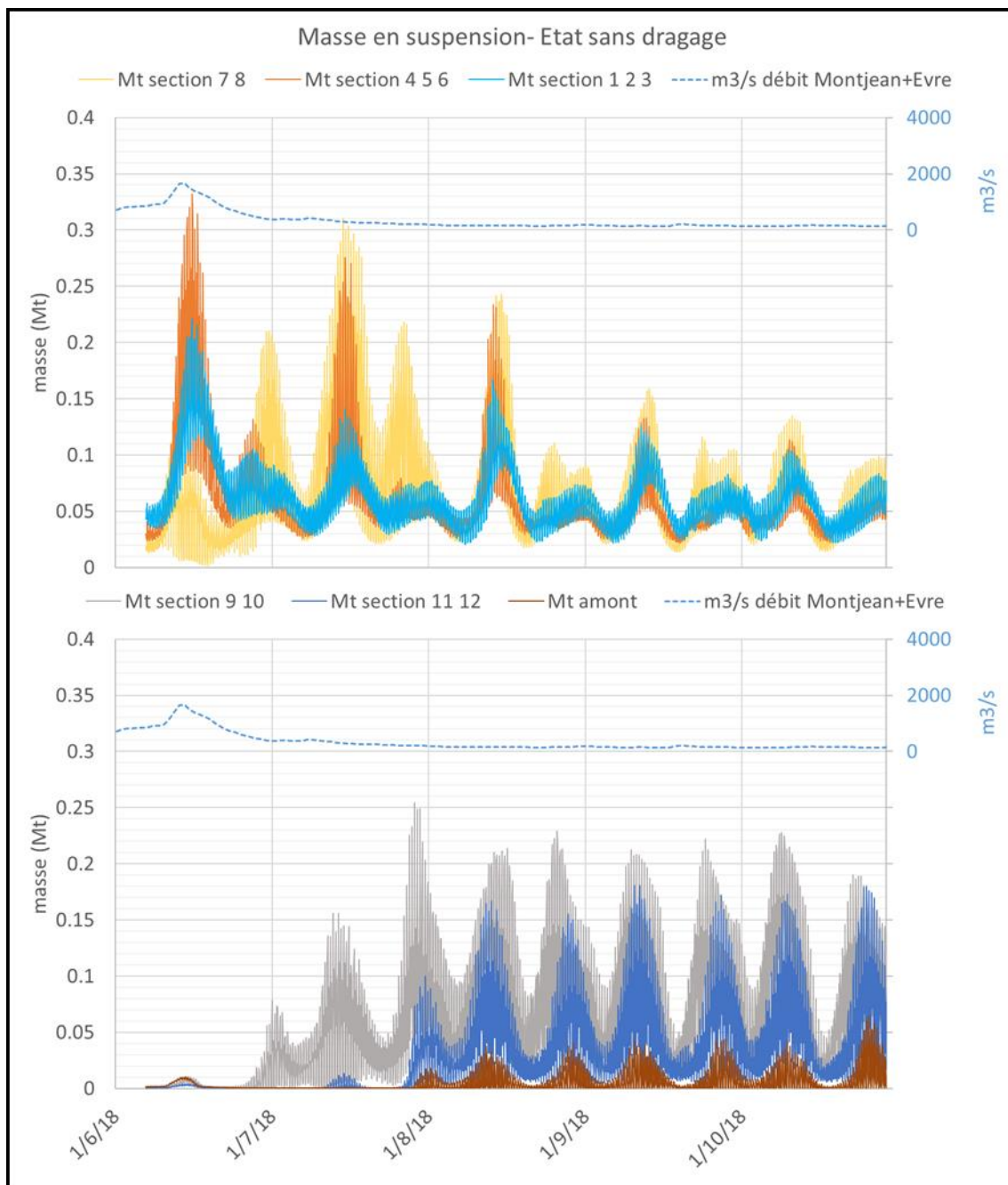


Figure 2-3 : Répartition par section de la masse de sédiment en suspension

Si maintenant, on étudie la variation de masse au sol au cours du temps (Figure 2-4), on voit clairement que le déplacement du bouchon turbide de l'aval vers l'amont a permis une remontée (avec une inertie plus lente que celle du bouchon vaseux) de la crème de vase se situant principalement dans les sections 4-5-6 (perte d'environ 1 Mt) vers les sections 9 à 12 (gain d'environ 0,8 Mt au moment d'une phase de dépôt). A partir du moment où les débits baissent, les sections 7 et 8 s'engraissent légèrement. Cette zone sert alors davantage de zone de transfert des masses de l'aval vers l'amont que de zone de stockage.

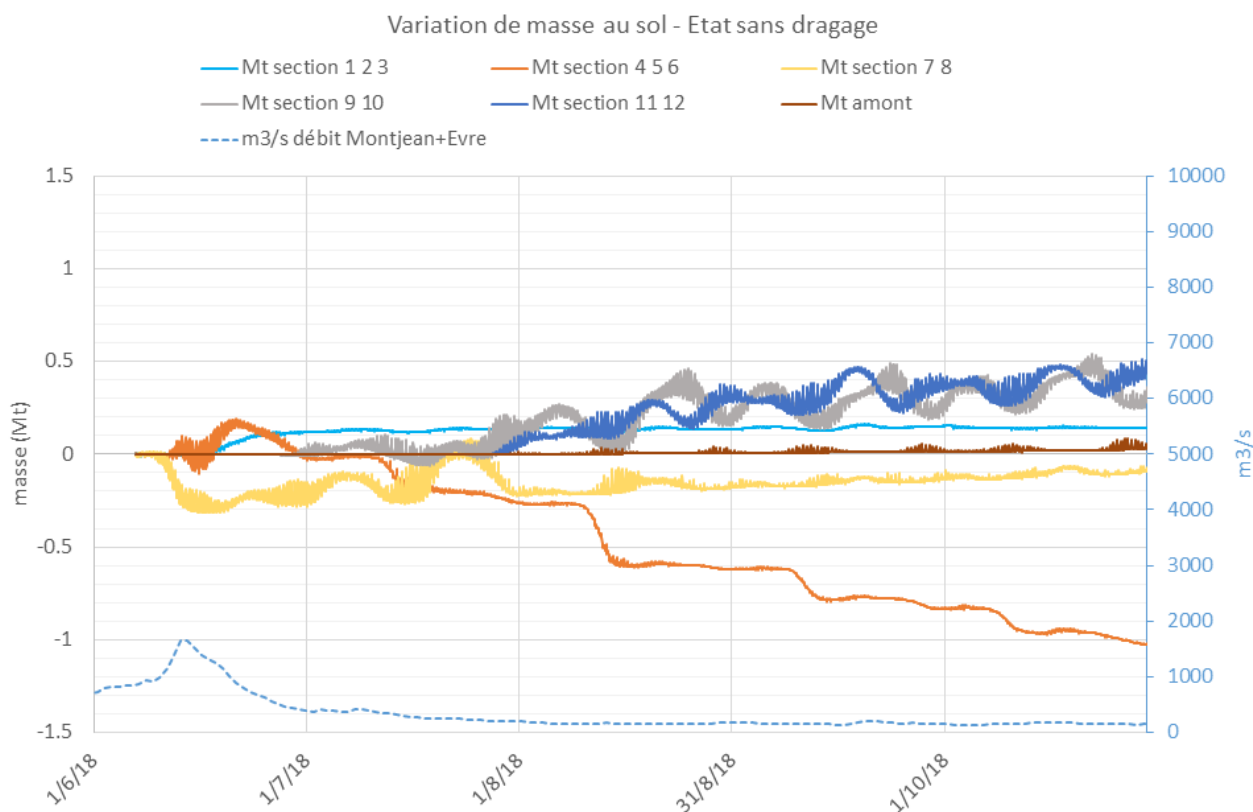


Figure 2-4 : Répartition par section de la variation de masse de sédiment au sol

2.2. IMPACT DES DRAGAGES SUR LA MES

La masse cumulée de sédiment remobilisée par dragages DIE et DAS représente au bout de quatre mois environ 2 Mt de sédiments.

L'impact des dragages DAS et DIE est estimé à l'échelle de l'estuaire dans sa globalité puis sur la répartition des masses dans l'estuaire interne en considérant les sections présentées sur la Figure 1-3.

Pour ce faire, nous avons effectué le même type d'analyse que celle présentée en §2.1 pour le calcul sans dragage : bilan sur la masse du bouchon vaseux et sur la variation de masse au sol au cours du temps, mais cette fois-ci avec les dragages par DAS et par DIE. Nous avons alors soustrait les résultats de l'analyse avec dragage à ceux obtenus sans dragage. Ainsi, les courbes présentées dans ce chapitre représentent bien l'impact des dragages par DAS et par DIE modélisés.

2.2.1. Estuaire dans sa globalité

A l'échelle globale de l'estuaire (section 1 à 12 + amont), il est constaté une augmentation progressive de la masse au sol devenant active de l'ordre de 0.04 Mt au maximum. Cela correspond à une diminution de la courbe verte sur la Figure 2-5.

La masse en suspension dans l'estuaire interne montre de façon symétrique une augmentation du même ordre de grandeur (0.04 Mt au maximum). A l'échelle de l'estuaire les masses remobilisées par DAS et DIE ne s'additionnent que très peu au total de la suspension (comparaison des 2 Mt remobilisées par rapport au surplus de bouchon vaseux de

0,04 Mt) du fait que l'estuaire a suffisamment de source de sédiment pour se charger à sa capacité maximale sans ces remobilisations. Le déplacement et l'augmentation locale à l'échelle de sections due aux remobilisations sont étudiées dans le paragraphe suivant.

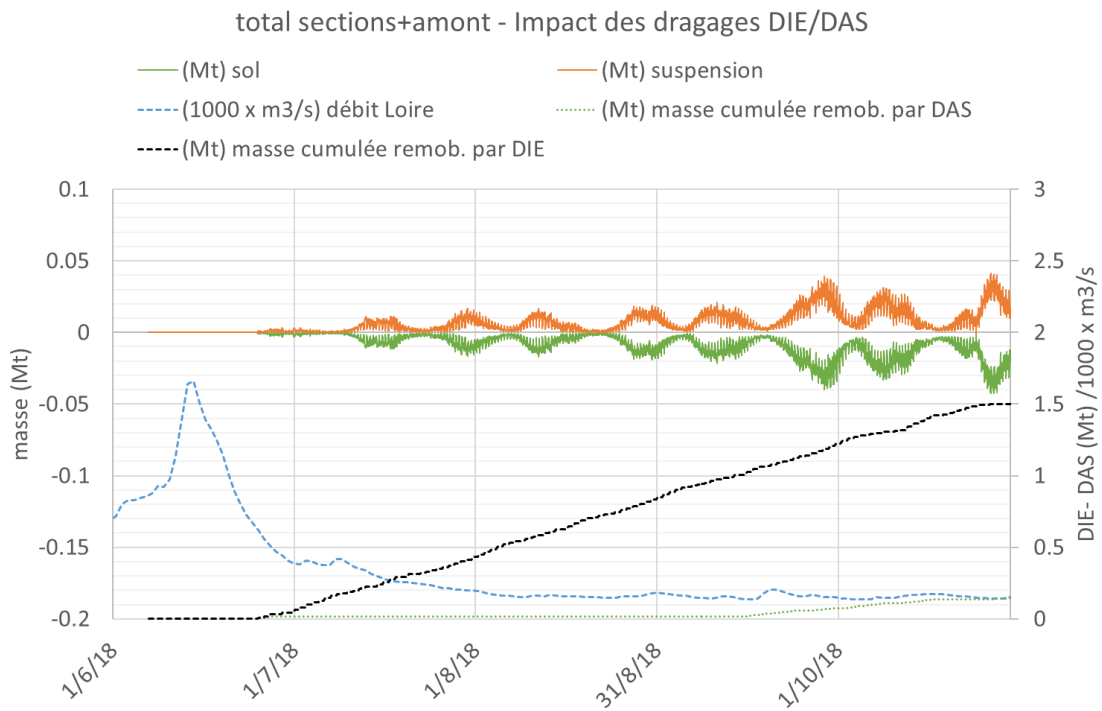


Figure 2-5 : Différence de la variation de la masse de vase dans le sol et de la masse en suspension

2.2.2. Répartition entre sections dans l'estuaire

En analysant l'impact des variations de masse au sol, on observe le même fonctionnement que dans le calcul sans dragage. C'est-à-dire que le surplus de sédiment pris dans le sol dans les sections 4-5-6 (qui correspond à la majeure partie des dragages par DAS et DIE) soit environ 0,12 Mt, va se retrouver principalement dans les sections 9 à 12 dans un ordre de grandeur d'environ 0,08 Mt. Le moteur de ce déplacement est le transport via le bouchon vaseux.

Le fait que l'on retrouve le surplus de sédiment (0,12 Mt) érodé à l'aval sous forme de crème de vase (0,08 Mt) à l'amont, signifie que le bouchon vaseux s'est bien engraisé d'environ 0,04 Mt comme vu auparavant, et qu'il a aussi permis le déplacement d'un surplus de crème de vase de l'aval vers l'amont.

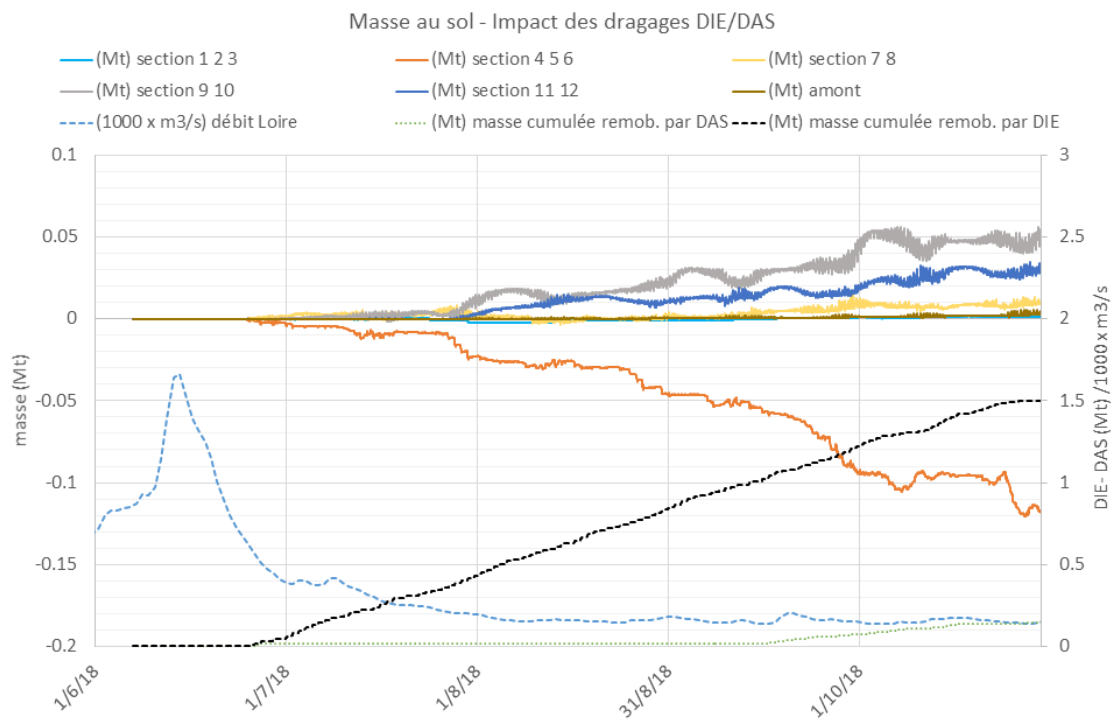


Figure 2-6 : Différentiel par section de la variation de masse au sol

La Figure 2-7 permet de mieux définir la répartition de l'impact du surplus de sédiment en suspension le long de l'estuaire. Tout d'abord on voit que sur les sections aval l'impact est assez stable voire en légère augmentation malgré le fait que le bouchon vaseux soit remonté. Cela est dû au fait que la majeure partie des dragages par DAS et DIE se situe dans ces sections aval. Il s'agit donc là d'un impact local à court terme mais continu. En revanche l'impact dans la partie amont est dû à la fois aux dragages locaux (mais peu fréquents proportionnellement par rapport à l'aval) et aux imports d'une partie des dragages effectués à l'aval vers l'amont, de par la dynamique estuarienne en période d'étiage. Il s'agit donc là d'un impact à plus long terme.

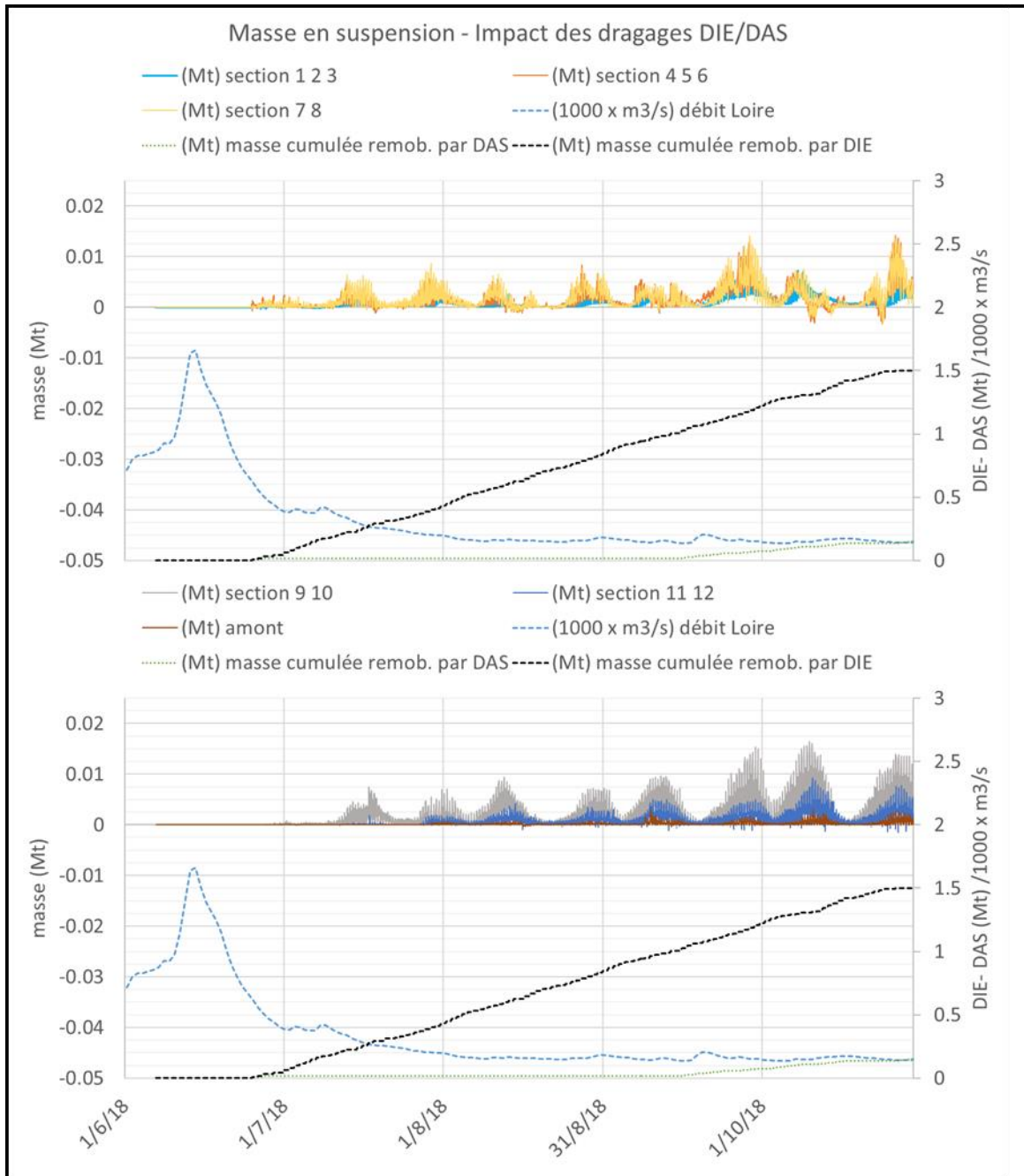


Figure 2-7 : Différentiel de la répartition par section de masse en suspension

2.3. ANALYSE QUANTITATIVE DE L'IMPACT

Le Tableau 2-1 met en évidence l'impact que peut avoir les dragages DAS et DIE sur la masse moyenne en suspension. Sur les quatre mois étudiés, les dragages par DAS et DIE modélisés ont remobilisés environ 2 Mt de sédiments. Ils ont alors un impact sur la masse en suspension de l'ordre de 2,75%. En termes de répartition, c'est la section 9-10 où se situe le maximum de concentration du bouchon vaseux qui est la plus impactée à hauteur de 3,36%.

Tableau 2-1 : Masse moyenne sur la durée de simulation de référence (sc1) par section exprimé en Mt

Section :	1 2 3	4 5 6	7 8	9 10	11 12	amont	total estuaire
Suspension moyenne (Mt)	0.06	0.05	0.07	0.08	0.04	0.01	0.30
Impact dragage sur la suspension moyenne (Mt)	0.001	0.002	0.002	0.003	0.001	0.000	0.008
Impact dragage sur la suspension moyenne (%)	1.70	2.97	2.69	3.36	2.79	3.54	2.75

Au maximum, sur le dernier cycle de la période, c'est 0.04 Mt de sédiment en plus en suspension qui sont modélisés pour un bouchon vaseux d'environ 0,5 Mt, soit un impact d'environ 8%.

Les dragages associés à une dynamique estuarienne d'étiage ont permis un déplacement de vase de l'aval vers l'amont sous forme de dépôt équivalent à 0.12 Mt.

3. IMPACT DES DRAGAGES SUR L'OXYGENATION ET LA MES

3.1. EVOLUTION TEMPORELLE AUX POINTS SYVEL

Afin d'évaluer l'impact des dragages DIE et DAS sur la concentration en oxygène dissous dans l'estuaire, les courbes d'évolution de la concentration en oxygène dissous de surface pour la simulation avec dragage aux stations SYVEL de Donges, Paimboeuf, Cordemais, Le Pellerin et Cordemais sont tracées sur les planches diapositives 2 à 7 en Annexe 1. Elles sont comparées aux mesures SYVEL. Le différentiel en oxygène dissous entre les scénarios 2 et 1 est également tracé. Les diapositives incluent également les courbes de MES comparées aux mesures SYVEL ainsi que le différentiel en matière en suspension.

Le modèle tend à sous-estimer les déficits en oxygène dissous observés lors des périodes de grande vive-eau (14/08 et 13/09) au stations SYVEL. Sous l'effet des dragages DIE et DAS, il y a une diminution de l'oxygénation des eaux (différentiel négatif) en corrélation avec une augmentation de la MES dans les eaux (différentiel positif). La variation de concentration en oxygène dissous est de l'ordre de 0.2mg/l au maximum et 0.2g/l pour la concentration en MES. Ce différentiel est plus important durant les phases de vive-eau, aussi bien pour les MES et l'oxygène dissous. Au fur et à mesure de l'avancement dans la période d'étiage et de l'augmentation du sédiment remobilisé, il est mis en évidence une augmentation du différentiel d'oxygène dissous lors des vives-eaux. Il n'est pas observé de différence significative entre les stations sur le différentiel d'oxygène dissous.

3.2. TEMPS DE DEPASSEMENT EN OXYGENE DISSOUS

Les concentrations seuil à 5 mg/l (seuil sensible) et 3 mg/l (seuil critique) sont retenues pour le calcul du temps passé en-dessous d'une concentration en oxygène dissous (Tableau 3-1). Le calcul du temps passé s'exprime en pourcentage de la période considérée, soit du 25/06/2018 au 31/10/2018.

Tableau 3-1 : Seuil de concentration en oxygène dissous et impact sur les poissons, d'après GIP Loire[5]

	Concentration en O ₂	Impact sur les poissons
Seuil sensible hypoxie	plus de 5 mg/l	Absence d'effets à long terme. Passage de l'ensemble des espèces migratrices
	de 4 à 5 mg/l	Salmonidés : migration incertaine, croissance altérée
Seuil critique	de 3 à 4 mg/l	
Seuil létal	de 2 à 3 mg/l	Survie des juvéniles incertaine. Croissance et fécondité altérées. Arrêt ou retard du développement embryonnaire. Migration impossible pour beaucoup d'amphihalins. Mortalité des salmonidés
	de 1 à 2 mg/l	Mortalité pour la plupart des espèces
	moins de 1 mg/l	Milieu azoïque

La cartographie du seuil de concentration à 5 mg/l (Figure 3-1 et Figure 3-2) met en évidence une zone centrée au niveau de Cordemais, où le temps passé en-dessous du seuil de 5 mg/l est le plus grand, compris entre 50% et 60% du temps. La zone est étendue de 2 km vers l'aval sous l'effet des dragages. Le temps passé en-dessous du seuil est allongé notamment pour la zone entre Cordemais et Donges. A l'amont de Cordemais et à l'aval de Donges, il y a très peu de modification.

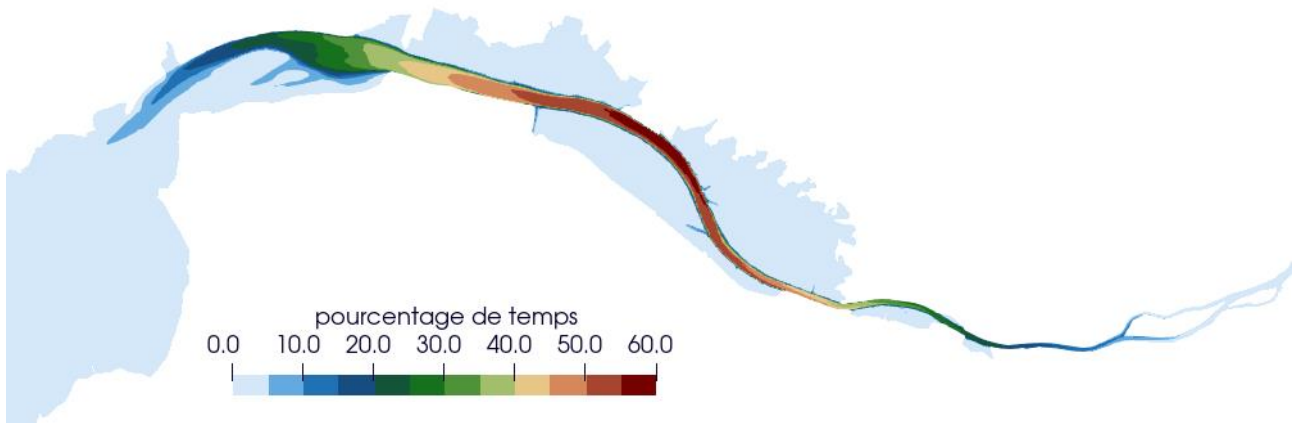


Figure 3-1 : Temps passé en-dessous du seuil à 5 mg/ dans le scenario 1 (sans dragage), surface

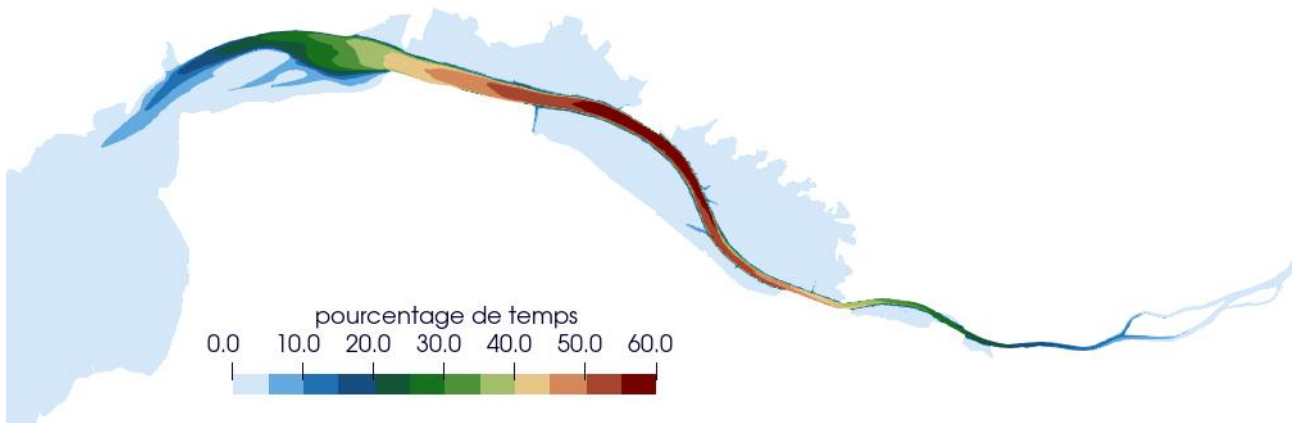


Figure 3-2 : Temps passé en-dessous du seuil à 5 mg/ dans le scenario 2 (avec dragage), surface

Dans le cas du seuil à 3 mg/l, le maximum de temps passé se situe également au niveau de Cordemais (Figure 3-3 et Figure 3-4). Le temps passé est de 8% sur cette zone dans le cas du scenario 1 (sans dragage) et il est augmenté à 9% dans le cas du scenario 2 (avec dragage). La zone de temps passé dans les gammes de concentration en oxygène dissous inférieures à 3mg/l, et supérieure à 1% du temps, se situe entre Paimboeuf et Trentemoult. Son étendue n'est pas modifiée par les dragages.

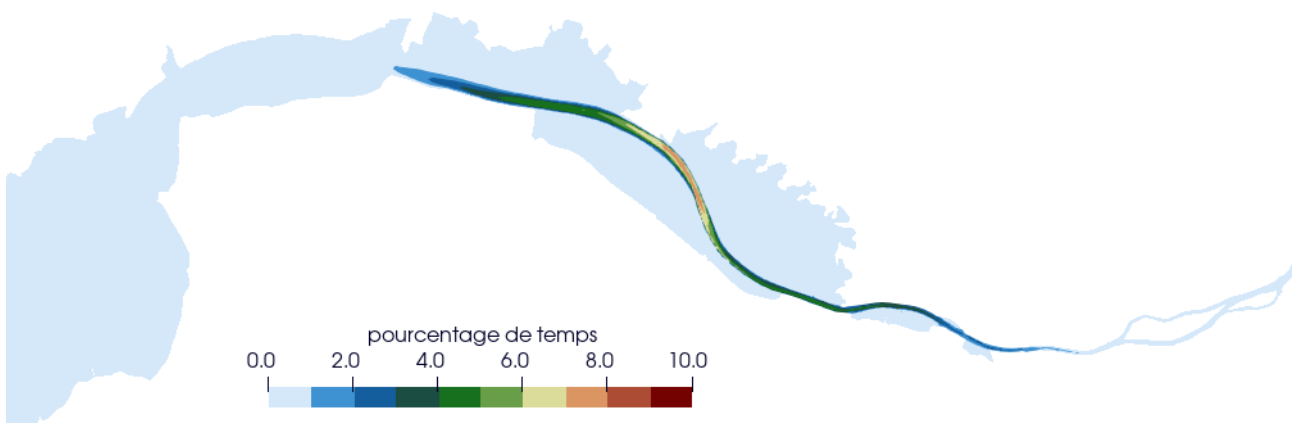


Figure 3-3 : Temps passé en-dessous du seuil à 3 mg/ dans le scenario 1 (sans dragage), surface

Exploitation du modèle global – Modélisations de l'oxygène dissous sur 3 à 4 mois d'été (2018)
 MODELE 3D HYDROSEDIMENTAIRE ET DE QUALITE DES EAUX DE LA LOIRE

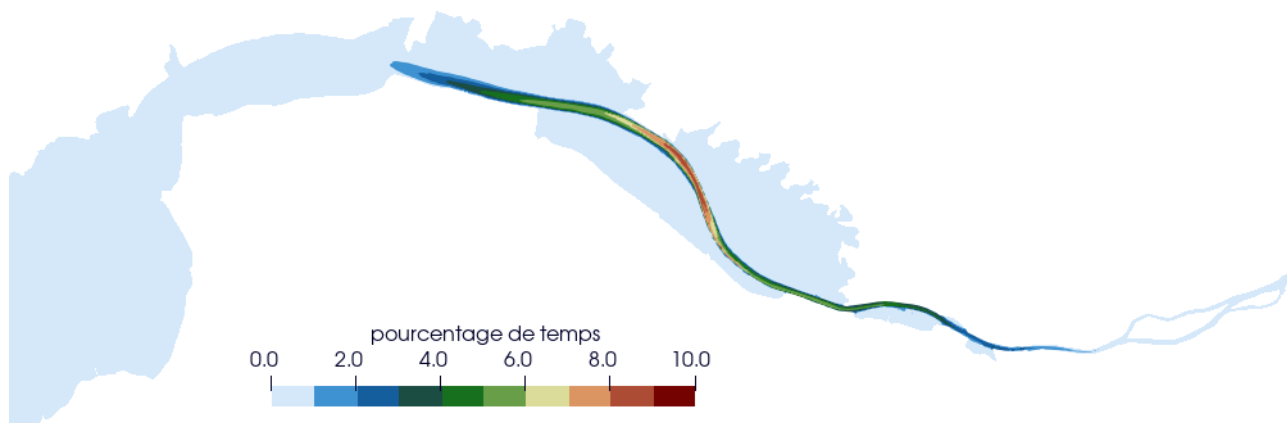


Figure 3-4 : Temps passé en-dessous du seuil à 3 mg/l dans le scénario 2 (avec dragage), surface

Le Tableau 3-2 met en évidence que les modifications les plus importantes se situent aux stations de Donges et Paimboeuf soit à l’aval de Cordemais, pour le seuil à 5 mg/l. La variation la plus importante se situe au Pellerin et à Cordemais, soit à l’amont de Cordemais, dans le cas du seuil à 3 mg/l. Le différentiel est au maximum de 2.1% pour le seuil à 5 mg/l et 1% pour le seuil à 3 mg/l.

Tableau 3-2 : Temps passé (pourcentage) en-dessous des seuils en oxygène dissous à 5 mg/l et 3 mg/l

	Sc1	Sc2	Sc2-Sc1	Sc1	Sc2	Sc2-Sc1
Seuil :	5 mg/l	5 mg/l	5 mg/l	3 mg/l	3 mg/l	3 mg/l
Donges	30.2	32.0	1.8	0.4	0.4	0.1
Paimboeuf	40.0	42.1	2.1	0.7	1.1	0.3
Cordemais	56.1	57.1	1.1	6.8	7.6	0.9
Le Pellerin	40.4	40.9	0.5	4.6	5.7	1.0
Trentemoult	8.0	8.4	0.5	0.1	0.2	0.1
Sainte-Luce	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Saint-Géréon	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Montjean	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

3.3. CARTOGRAPHIE DE LA CONCENTRATION EN OXYGENE DISSOUS

Les cartographies instantanées (Figure 3-5 et Figure 3-6) montrent le différentiel en oxygène dissous à l'échelle de l'estuaire à proximité du fond. Il est constaté une diminution de l'oxygène dissous de l'ordre de 0.2 mg/l par l'effet des dragages au niveau du bouchon vaseux. Ce différentiel longitudinal se déplace en fonction de l'instant de la marée. Au même instant, l'effet ponctuel d'un dragage est visible au niveau de Donges. Il occasionne un déficit ponctuel et très localisé de l'ordre de 0.5 à 1 mg/l sur l'emplacement du dragage à 0.5 m au-dessus du fond. Ce déficit est plus faible dans les couches supérieures de la colonne d'eau.

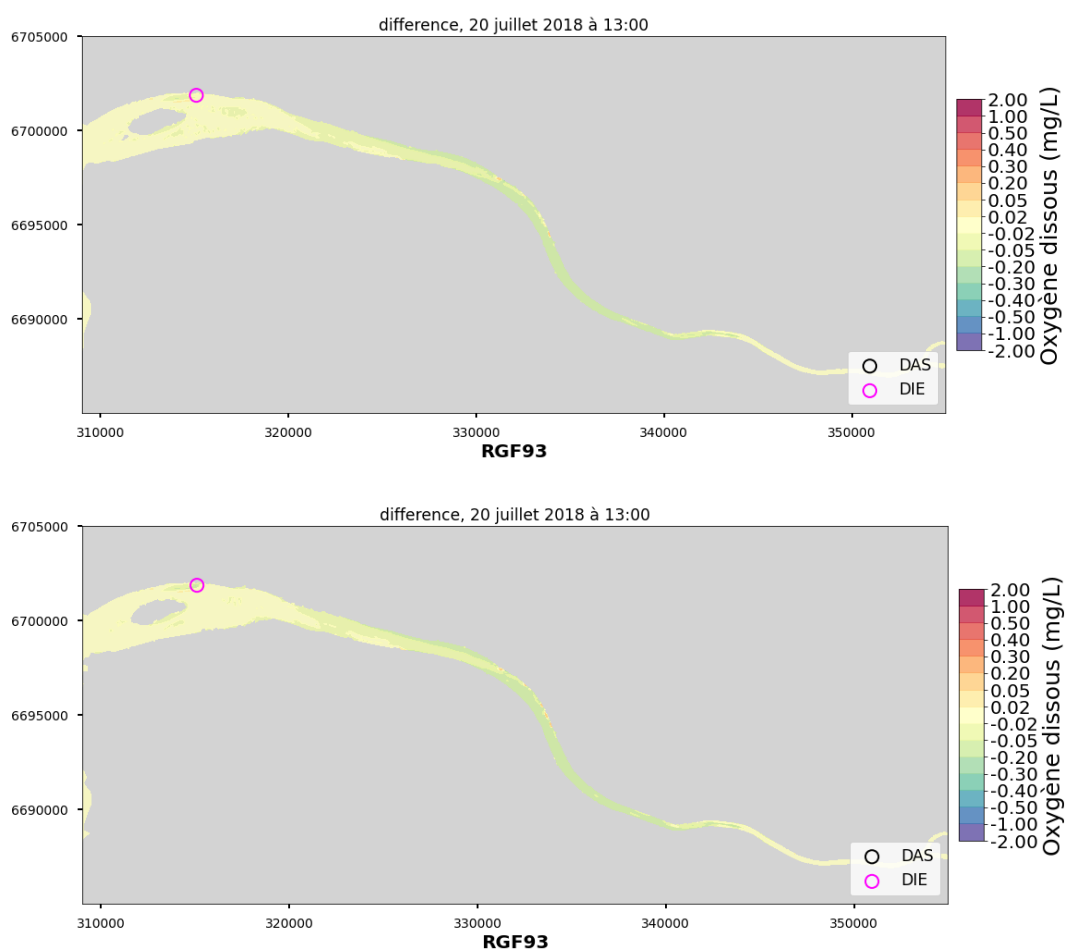


Figure 3-5 : Jusant : différentiel d'oxygène dissous (sc2-sc1) à 0.5 m au-dessus du fond (bas) et 1 m au-dessus du fond (haut)

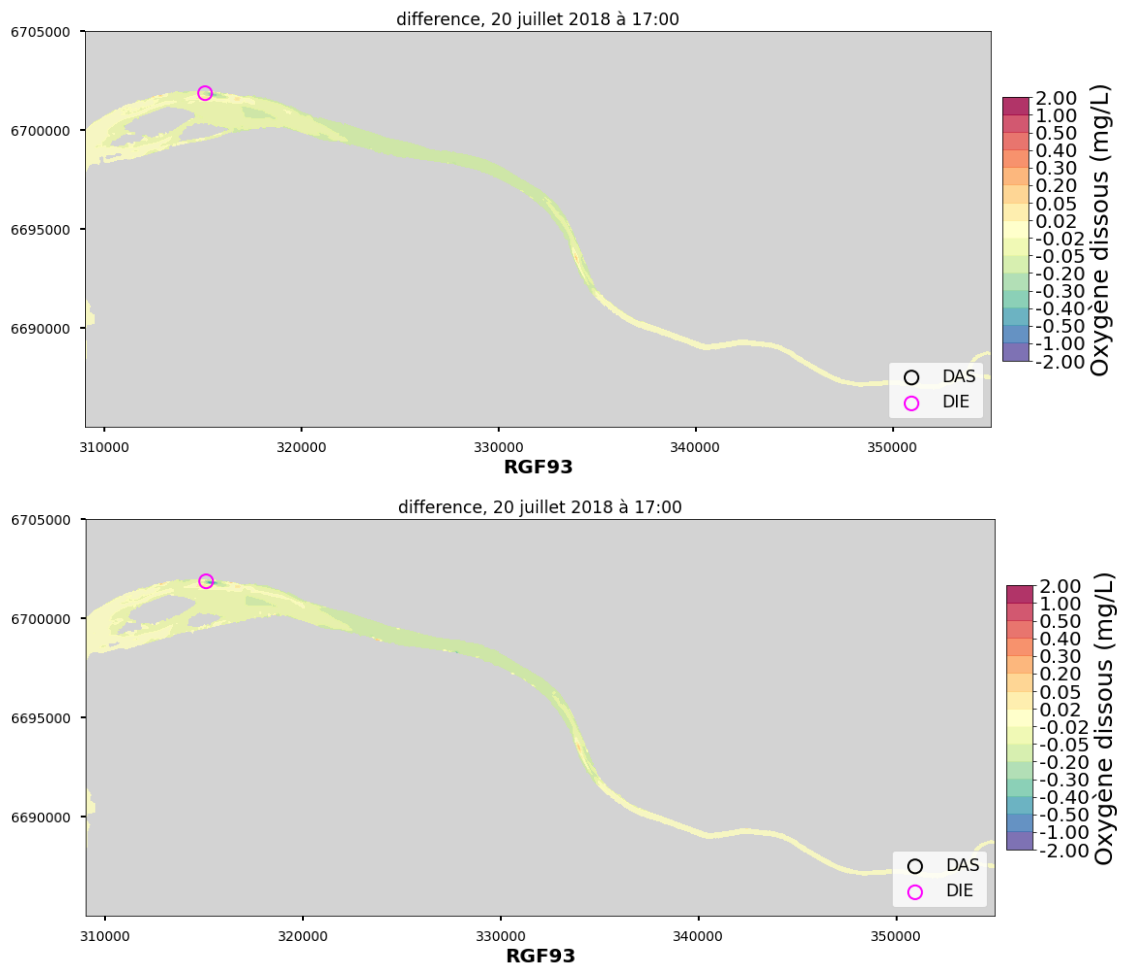


Figure 3-6 : Flot après la basse mer : différentiel d'oxygène dissous (sc2-sc1) à 0.5 m au-dessus du fond (bas) et 1 m au-dessus du fond (haut)

REFERENCES

- [1] Modèle 3D hydrosédimentaire et de qualité des eaux de la Loire : Construction, calage et validation du modèle global 3d hydrosédimentaire et d'oxygène dissous, Rapport de Phase 1 – version V2.1, rapport ARTELIA-8716307-Tranche ferme phase 1 - 03-2023
- [2] Note technique sur les relations conductivité-salinité et turbidité-MES appliquées aux données du réseau SYVEL, GIP Loire estuaire, 01/10/2021
- [3] rapport 8 71 3791 R1, Artelia : Evaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par aspiratrice stationnaire (DAS) et par injection d'eau (DIE),analyse quantitative des pratiques, Décembre 2017
- [4] rapport 8 71 3791 R2, Artelia : Evaluation comparée des impacts sur la MES d'un dragage par aspiratrice stationnaire (DAS) et par injection d'eau (DIE), évaluation comparée par modélisation numérique, mars 2018
- [5] L'eau support de vie : l'oxygène dissous. Cahier indicateur L2A1 GIP Loire Estuaire, réédition 2020.
- [6] Les sédiments : Les dragages d'entretien dans l'estuaire. Cahier indicateur L1 E3, GIP Loire estuaire. Réédition 2018.