

RAPPORT

Etudes hydrodynamiques – Réaménagement du terminal du Naye et extension du port de plaisance des Bas Sablons

Modélisation de la dispersion des panaches turbides

Mars 2023

REGION BRETAGNE



CLIENT : Région bretagne

COORDONNÉES	DPAF 283 Avenue du Général Patton - CS 201102 35711 RENNES CEDEX 7 Tél. : 02.99.27.10.10
INTERLOCUTEUR	Monsieur Arnaud MARREC Tél. : 02.98.33.41.77 E-mail : arnaud.marrec@bretagne.bzh

CREOCEAN

COORDONNÉES	Zone Technocéan – Chef de Baie – Rue Charles Tellier 17000 LA ROCHELLE Tél. : 05 46 41 13 13 - Fax : 05 46 50 51 02 E-mail : creocean@creocean.fr
INTERLOCUTEUR	Monsieur Gaëtan DUFOUR Tél. : 07 88 86 41 57 E-mail : gaetan.dufour@creocean.fr

RAPPORT

TITRE	Etudes hydrodynamiques – Réaménagement du terminal du Naye et extension du port de plaisance des Bas Sablons Modélisation de la dispersion des panaches turbides
NOMBRE DE PAGES TOTAL	43
NOMBRE D'ANNEXES	0

VERSION

RÉFÉRENCE	VERSION	DATE	REDACTEUR	CONTRÔLE QUALITE
181106-Phase3-	V1	15/12/2022	IAZ	GDU
181106-Phase3-	V2	25/01/2023	IAZ	GDU
181106-Phase3-	V3	01/03/2023	IAZ	GDU

Sommaire

1. Contexte	11
2. Descriptif des travaux	12
2.1. Aménagement du terminal du Naye	12
3. Analyses granulométriques	13
3.1. Localisations des échantillonnages réalisés	13
3.2. Analyses granulométriques du terminal du Naye	14
4. Estimation des volumes de dragage et pourcentages de particules fines remises en suspension	15
4.1. Volumes de dragage par zones	15
4.2. Détermination des fractions fines par zones de dragage	16
4.2.1. Terminal du Naye	16
4.3. Hypothèses	17
4.3.1. Taux de remise en suspension – Opération de dragage.....	17
4.3.2. Taux de remise en suspension – Opération de déroctage	19
5. Principe de modélisation	20
5.1. Logiciel utilisé	20
5.1.1. Couplage des modules	20
5.2. Maillage	22
5.3. Bathymétrie	23
5.4. Hypothèses de rendements des opérations de dragage et déroctage	23
5.5. Prise en compte du changement bathymétrique lors des opérations de dragage	25
5.6. Simulation de la dispersion du panache turbide	26
5.6.1. Niveaux d'eau	29
5.6.2. Vents	29
5.6.3. Houles	29
5.6.4. Caractéristiques des particules en suspension	29
5.6.5. Caractéristiques du rejet.....	29
5.6.6. Planning des simulations	30
6. Résultats	32

6.1. Cinétique du panache	33
6.2. Concentration maximale du panache	37
6.3. Analyse des concentrations de panache	38
6.3.1. Analyse des concentrations au niveau des points de sensibilité	38
6.3.2. Analyse des temps de dépassements de la valeur-seuil du taux de MES.....	46
6.3.3. Analyse des dépôts	47
7. Fonctionnement du modèle vis-à-vis le barrage	49
8. Conclusion	51

Liste des Figures

<i>Figure 2.1 : Visualisation des zones de dragage pour les travaux d'aménagement du terminal du Naye</i>	12
<i>Figure 3.1: Localisation des stations d'échantillonnage des sédiments – Terminal du Naye</i>	13
<i>Figure 3.2 : Compositions granulométriques au Terminal du Naye</i>	14
<i>Figure 5.1: Schéma de principe détaillant le couplage des différents modules de la chaine MIKE</i>	21
<i>Figure 5.2 : Visualisation du maillage du modèle</i>	22
<i>Figure 5.3 : Aperçu d'une prise verticale du maillage</i>	23
<i>Figure 5.4: Evolution de la bathymétrie en fonction des phases de dragage pour le terminal du Naye</i>	25
<i>Figure 5.5 : Roses des houles au point HOMERE sélectionné pour l'étude (gauche année 2019, droite moyenne 1994-2020)</i>	27
<i>Figure 5.6 : Série temporelle des houles au point HOMERE sélectionné pour l'étude, l'année 2019 est dans la moyenne des conditions usuelles</i>	28
<i>Figure 5.7 : Localisation des points sources de rejet</i>	30
<i>Figure 6.1 : Points de sensibilités sélectionnés pour l'analyse des séries temporelles de turbidité</i>	32
<i>Figure 6.2: Cinétique du panache entre le 03 Février et le 04 Février (concentrations moyennées sur la verticale)</i>	35
<i>Figure 6.3: Visualisation des maximaux de concentration en MES du panache (moyennée sur la verticale)</i>	37
<i>Figure 6.4: Visualisation des zones de sensibilité</i>	38
<i>Figure 6.5 : Visualisation des maximaux de concentration en MES du panache (moyennée sur la verticale) - Zoom sur la plage des Bas-Sablons</i>	40
<i>Figure 6.6: Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 1</i>	41
<i>Figure 6.7: Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 2</i>	42
<i>Figure 6.8: Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 3</i>	43
<i>Figure 6.9: Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 4</i>	44
<i>Figure 6.10 : Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 5</i>	45
<i>Figure 6.11: Visualisation de la durée pendant laquelle le seuil de 5 mg/l est dépassé</i>	46

Figure 6.12: Visualisation du dépôt de vase après la fin des travaux 47

Figure 6.13 : Visualisation du dépôt de vase un mois après la fin des travaux 48

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau de correspondance entre de zone de dragage et échantillonnage sédimentaire – Terminal du Naye (Artelia).....	13
Tableau 2 : Granulométrie du Terminal du Naye	14
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des volumes de dragage (Terminal du Naye).....	15
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des pourcentages de particules fines - Terminal du Naye	16
Tableau 5 : Tableau synthétisant les pourcentages de particules fines pour chaque zone de dragage - Terminal du Naye	16
Tableau 6 : Constitution Physico-Chimique des sédiments- Terminal de Naye (Rapport CREOCEAN).....	18
Tableau 7 : Tableau récapitulatif des taux de remise en suspension au niveau des zones d'échantillonnage	18
Tableau 8 : Tableau récapitulatif des volumes de particules mises en suspension - Terminal du Naye	19
Tableau 9 : Tableau récapitulatif des jours de dragage estimé pour chaque zone - Terminal du Naye	24
Tableau 10 : Calendrier de simulation.....	31

1. Contexte

Deux grands projets d'aménagement portuaire sont en cours d'élaboration dans le secteur de Saint Malo. Ces projets visent à moderniser les infrastructures existantes et à maintenir, pérenniser et développer le fonctionnement des équipements existants et les activités associées.

Le présent marché concerne :

- Le projet de réaménagement du terminal du Naye, porté par la région Bretagne.
- Le projet d'extension du port de plaisance des Bas Sablons, engagé par la ville de Saint Malo.

Dans le cadre de ces projets d'aménagement, CREOCEAN est en charge de modéliser le potentiel impact de la diffusion d'un nuage turbide lié aux travaux de dragage. Les objectifs de cette prestation sont les suivants :

- Identification des opérations susceptibles d'engendrer une remise en suspension des sédiments marins ;
- Estimation des volumes remis en suspension pendant la phase de travaux ;
- Modélisation du panache turbide engendré par la remise en suspension des sédiments ;
- Fourniture des éléments permettant d'évaluer les incidences sur les zones sensibles.

Le présent rapport constitue l'étude des modélisations de panache turbide des travaux du terminal du Naye.

2. Descriptif des travaux

2.1. Aménagement du terminal du Naye

La figure ci-dessous présente l'emprise concernée par les opérations de dragage/déroctage dans le cadre des travaux d'aménagement du terminal du Naye.

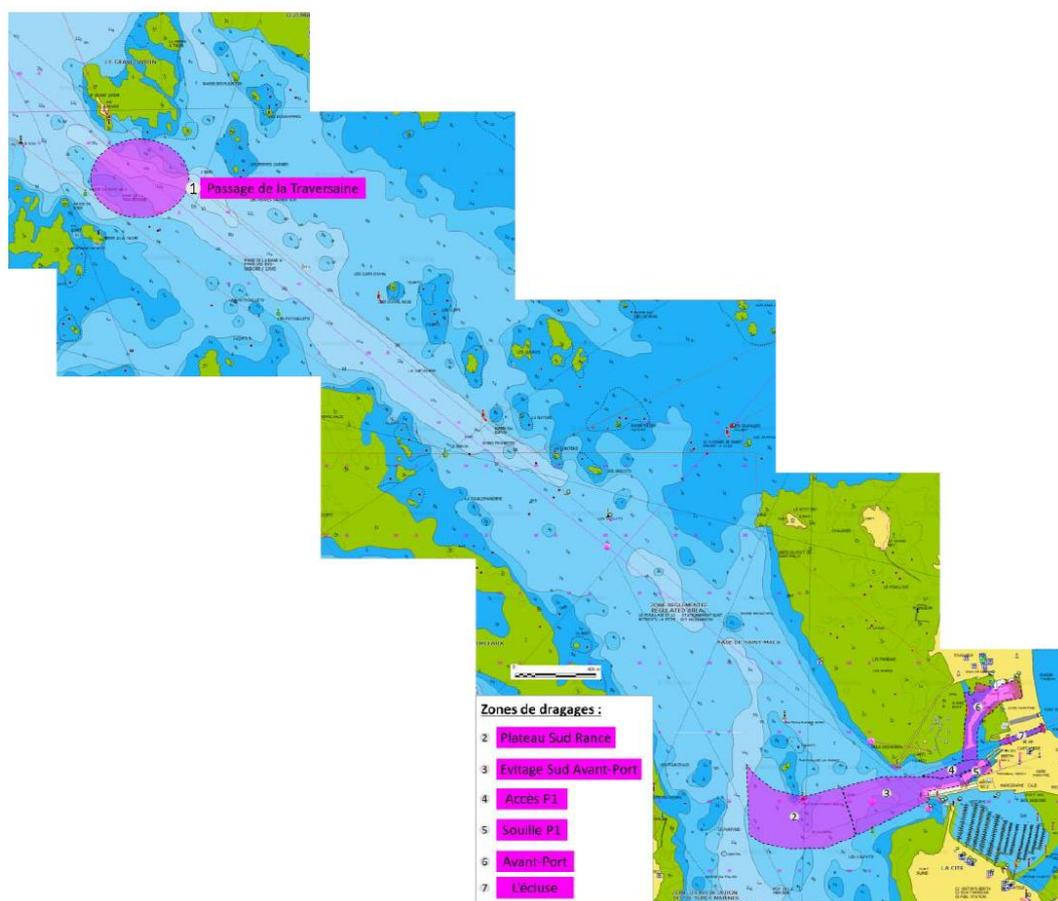


Figure 2.1 : Visualisation des zones de dragage pour les travaux d'aménagement du terminal du Naye

3. Analyses granulométriques

3.1. Localisations des échantillonnages réalisés

Une campagne de prélèvements et d'analyse de sédiments a été réalisée les 9 et 10 août 2019 dans la zone d'étude par CREOCEAN (rapport 190450B). Les stations de prélèvements sont présentées ci-après :



Figure 3.1: Localisation des stations d'échantillonnage des sédiments – Terminal du Naye

La correspondance entre les numéros des échantillons prélevés et les numéros des zones de dragage utilisées est présentée dans le tableau ci-dessous (Artelia, rapport 0550b).

Tableau 1 : Tableau de correspondance entre de zone de dragage et échantillonnage sédimentaire – Terminal du Naye (Artelia)

N° zone de dragage	Dénomination	N° des échantillons concernés
1	Le passage de la Traversaine	-
2	Le plateau Sud de la Rance	1 et 2
3	L'évitage Sud de l'Avant-Port	3 et 4
4	L'accès à P1	3 et 4
5	La souille P1	5
6	L'avant-port (chenal)	6 et 7
	L'avant-port (cale de Dinan)	8
	L'avant-port (Ponton de la Bourse)	9 et 10
7	Ecluse	11

3.2. Analyses granulométriques du terminal du Naye

D'après les mesures réalisées, l'évolution granulométrique varie beaucoup : les échantillons prélevés à l'extérieur sont principalement sableux, et la composition granulométrique évolue vers des vases au fur et à mesure que l'on se rapproche du terminal. **A noter que le rapport d'étude indique l'impossibilité d'échantillonnage dans les stations s3 et s11 en raison de l'absence de sédiments meubles.**

Le tableau ci-dessous présente les résultats de granulométries pour les échantillons du terminal du Naye. La composition granulométrique est également présentée sous la forme d'un histogramme présenté ci-après.

L'analyse globale de ces échantillons montre que les prélèvements S1 et S2 sont composés principalement de sable avec un taux réduit de fraction fine. A l'inverse des prélèvements S4 à S10 où les taux de fractions fines sont importants.

Tableau 2 : Granulométrie du Terminal du Naye

		S1	S2	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	
		Classification granulométrique (% masse volumique)									
Graviers	>2mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sables	Sables grossiers 500-2000µm	34,9	26,5	7,6	31	4,7	4,7	3,4	0	0	
	Sables moyens 200-500µm	57,37	41,9	20,7	22,1	13,7	12,1	8,5	0,2	1	
	Sables fins 63-200µm	4,46	16,4	30,4	19,5	30,9	29,9	19,5	13,6	14,2	
Pérites	Limons/Silts 2-63µm	2,57	12,61	35,08	23,35	43,37	46,42	59,45	75,6	73,5	
Lutites	Argiles <2µm	0,7	2,59	6,22	4,05	7,33	6,88	9,15	10,6	11,3	

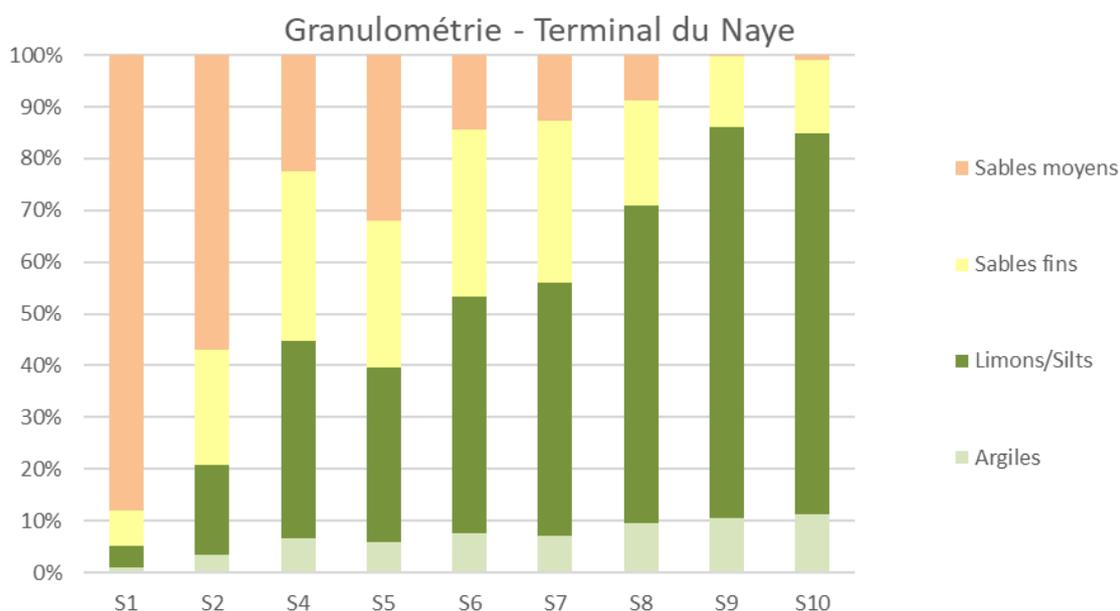


Figure 3.2 : Compositions granulométriques au Terminal du Naye

4. Estimation des volumes de dragage et pourcentages de particules fines remises en suspension

4.1. Volumes de dragage par zones

Pour le terminal du Naye, l'estimation des volumes de dragage par zones a été réalisée par ARTELIA, le tableau ci-après récapitule ces volumes. A noter que dans le rapport ARTELIA, une incertitude de 15% est appliquée et rappelée dans les tableaux ci-dessous.

Les volumes de dragage détaillés dans le tableau ci-dessous concernent uniquement les sédiments meubles, les déblais résultant du décaissement du terre-plein et les migmatites ne sont pas pris en compte. En effet le décaissement du terre-plein est effectué à terre et ne génère pas de perte de matériaux en mer. L'opération de déroctage des migmatites est détaillée dans le chapitre 4.3.2. Par ailleurs, la zone de dragage dans l'écluse ne sera pas modélisée car au vu de la configuration de cette dernière, il est fait l'hypothèse que la zone sera confinée par l'installation de systèmes anti-turbidité de part et d'autre de l'écluse.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des volumes de dragage (Terminal du Naye)

N° zone de dragage	Dénomination	Volume total (m3)
2	Le plateau Sud de la Rance	3 869
3	L'évitage Sud de l'Avant-Port	14 210
4	L'accès à P1	2 149
5	La souille P1	13 780
6	L'avant-port (chenal)	1 586
	L'avant-port (cale de Dinan)	14 443
	L'avant-port (Ponton de la Bourse)	6 671
7	Ecluse	1 150
Volume total		57 858
Incertitude sur le volume (15%)		8 679
Volume total à draguer		66 537

4.2. Détermination des fractions fines par zones de dragage

4.2.1. Terminal du Naye

Pour la présente étude, il est fait l'hypothèse que les particules ayant un diamètre supérieur à 63 µm chutent rapidement et ne génèrent pas de nuage turbide. Le tableau ci-après récapitule le pourcentage des particules ayant un diamètre <63 µm pour chaque station d'échantillonnage.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des pourcentages de particules fines - Terminal du Naye

Station d'échantillonnage	Particules avec diamètre <63µm
S1	3.27 %
S2	15.2 %
S4	41.3 %
S5	27.4 %
S6	50.7 %
S7	53.3 %
S8	68.6 %
S9	86.2 %
S10	84.8 %

Le tableau ci-dessous illustre la correspondance entre les zones de dragage et le pourcentage en particules fines. **Pour les zones 1 à 5, nous avons sélectionné l'échantillonnage présentant le taux de particules fines le plus élevé.** Par exemple pour le plateau Sud de la Rance où les stations d'échantillonnage correspondantes sont S1 et S2, le taux des particules fines de ces dernières est de 3.27 % et 15.2 % respectivement. Afin d'être majorant, une valeur de 15.2% en fraction fines est retenue pour le calcul des taux de remise en suspension. **En ce qui concerne la zone 6 et en raison de la grande variabilité du pourcentage de la fraction fine entre les zones d'échantillonnages, une moyenne pondérée est réalisée sur la base des volumes estimés pour chaque station d'échantillonnage.**

Tableau 5 : Tableau synthétisant les pourcentages de particules fines pour chaque zone de dragage - Terminal du Naye

N° zone de dragage	Dénomination	Zone d'échantillonnage de sédiment	Pourcentage de particules fines retenu (<63µm)
1	Le passage de la Traversaine	-	-
2	Le plateau Sud de la Rance	1 et 2	15.2 %
3	L'évitage Sud de l'Avant-Port	3 et 4	41.3 %
4	L'accès à P1	3 et 4	41.3 %
5	La souille P1	5	27.4 %
6	L'avant-port (chenal)	6 et 7	60 %
	L'avant-port (cale de Dinan)	8	60 %
	L'avant-port (Ponton de la Bourse)	9 et 10	85.5 %
7	Ecluse	11	-

4.3. Hypothèses

4.3.1. Taux de remise en suspension – Opération de dragage

4.3.1.1. Masse des sédiments remis en suspension dans la colonne d'eau par type de dragage

La drague rétrocaveuse étant à l'origine un excavateur opérant sur terre, elle peut être installée sur le pont renforcé d'un chaland. Le godet de la drague est fixé à un bras de manœuvre articulé sur la flèche, et les matériaux sont extraits en ramenant le godet vers la drague. Les produits de dragage sont déposés sur les rives ou dans des chalands.

Cette technique, bien qu'induisant une faible modification physique des sédiments (les matériaux extraits présentent notamment une densité proche de celle des sédiments en place) entraîne toutefois certains inconvénients, comme la perte des matériaux durant l'opération et ainsi un phénomène de remise en suspension plus ou moins important.

La remise en suspension des sédiments causée par le dragage est définie comme les particules de sédiments en suspension dans la colonne d'eau pendant l'opération de dragage qui ne se déposent pas rapidement hors de la colonne d'eau après la remise en suspension (Hayes et Engler 1986).

La remise en suspension des sédiments est inévitable dans une certaine mesure et se produit chaque fois que des matériaux sont dragués, quel que soit le type de drague ou les précautions qui peuvent être prises pendant les opérations de dragage. Cependant, le degré de remise en suspension des sédiments lors du dragage dépend de nombreuses variables spécifiques au site et à l'opération (Herbich et Brahme 1991, Collins 1995, Johnson et Parchure 2000, Nakai 1978, Pennekamp et al. 1996, Hayes et Wu 2001).

Le processus de remise en suspension des sédiments par dragage mécanique est décomposé de la manière suivante (Herbich et Brahme 1991) :

- Remise en suspension lorsque le godet heurte le lit de sédiments, se ferme et est retiré du fond ;
- Pertes de sédiments lorsque le godet est tiré à travers la colonne d'eau (soit soulevé du fond, soit abaissé de la surface) ;
- Pertes de sédiments lorsque le godet brise la surface de l'eau ;
- Déversement ou fuite de sédiments/eau lorsque le godet est hissé et balancé de l'eau à la barge de transport.

Le rapport « Dragages et immersions en mer et estuaire – Revue des bonnes pratiques environnementale », du GEODE (Groupe d'Etudes et d'Observation sur les Dragages et l'Environnement) fait la revue de la génération de turbidité par les différents types d'engins de dragage. En fonction de la technique de dragage et des conditions du milieu, un **paramètre S** de mesure de la masse des sédiments remis en suspension dans la colonne d'eau est attribué pour chaque cas d'étude.

Il a été convenu de prendre les valeurs de :

- **S= 54 kg/m³ pour les cas d'utilisation d'un godet de dragage ouvert ;**
- **S= 21 kg/m³ pour les cas d'utilisation d'un godet de dragage fermé (clapet).**

La zone de dragage n°6 est divisée en deux sous-zones : sur la zone de la bourse (zones d'échantillonnage 9 et 10), un godet à clapet sera utilisé (qualité >N2), alors que sur le reste de la zone (qualité >N1), la modélisation est réalisée avec une drague mécanique sans godet environnemental. Si les travaux se font finalement avec une drague hydraulique, les taux de pertes de fines sont plus faibles et similaires à ceux d'une drague mécanique avec godet à clapet, ce qui reste donc protecteur comme scénario modélisé.

4.3.1.2. Calcul du taux et des volumes de remise en suspension

Le rapport CREOCEAN « Etude qualité des sédiments » de 2020 détaille la constitution physico-chimique des sédiments, le tableau ci-après illustre le pourcentage de matière sèche ainsi que la masse volumique pour chaque échantillon.

Tableau 6 : Constitution Physico-Chimique des sédiments- Terminal de Naye (Rapport CREOCEAN)

Zone d'échantillonnage	1*	2*	4	5	6	7	8	9	10
Matière sèche	77.9	82.1	54.5	71.5	60.9	62.9	55.9	48.3	54.4
Masse volumique g/cm³	1.78	1.80	1.62	1.88	1.75	1.71	1.64	1.64	1.71

*Le rapport « Etude qualité des sédiments » version 2020 n'a pas détaillé la composante sédimentaire pour les zones 1 et 2, les caractéristiques physiques de ces deux échantillons sont reprises du rapport version 2019.

Le calcul du taux de remise en suspension passe par :

1. Calcul de la masse volumique de la matière sèche pour chaque échantillon ;
2. Estimation du taux de remise en suspension en divisant le paramètre S par la masse volumique sèche des sédiments à draguer.

Le tableau 7 ci-dessous récapitule les taux de fractions fines pris en considération pour chaque zone.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des taux de remise en suspension au niveau des zones d'échantillonnage

Zone d'échantillonnage	1	2	4	5	6	7	8	9	10
Masse sèche (%)	77.9	82.1	54.5	71.5	60.9	62.9	55.9	48.3	54.4
Masse volumique (kg / m³)	1780	1800	1620	1880	1750	1710	1640	1640	1710
Masse volumique de la matière Sèche (kg/ m³)	1386	1478	882	1344	1065	1075	916	792	930
Paramètre S (kg/ m³)	54	54	54	54	54	54	54	21	21
Taux de remise en suspension (%)	3.89	3.65	6.12	4.02	5.07	5.05	5.89	2.65	2.26

Le tableau 8 ci-après récapitule les volumes de sédiments susceptibles d'être mis en suspension par le dragage mécanique pour chaque zone de dragage. Comme énoncé précédemment, des pourcentages de remise en suspension sont déterminés en fonction des caractéristiques des sédiments. Un volume global de mise en suspension est calculé par la suite (englobant les particules grossières et fines). Les valeurs hautes de taux de remise en suspension présentées dans le tableau précédent sont considérées de manière à avoir une hypothèse conservatrice.

Par ailleurs, comme il est fait l'hypothèse que les particules grossières (diamètre >63 µm) chutent rapidement par l'effet de gravité, le volume de particules fines est uniquement pris en considération.

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des volumes de particules mises en suspension - Terminal du Naye

N° zone de dragage	Dénomination	Pourcentage sédiment <63 µm (%)	Volume total (m ³)	Taux de remise en suspension (%) Drague	Volume de mise en suspension (M ³)	Volume de la particule fine mise en suspension (m3)
2	Le plateau Sud de la Rance	15.2	3 869	3.77 %	146	22
3	L'évitage Sud de l'Avant-Port	41.3	14 210	6.12 %	870	359
4	L'accès à P1	41.3	2 149	6.12 %	132	54
5	La souille P1	27.4	13 780	4.02 %	554	152
6	L'avant-port (chenal)	60	1 586	5.05 %	80	48
	L'avant-port (cale de Dinan)	60	14 443	5.89 %	851	510
	L'avant-port (Ponton de la Bourse)	85.5	6 671	2.45 %	163	140

Sur un total initial de volume dragué de 57 923m³, alors 1 285 m³ de particules fines seront susceptibles d'être remises en suspension.

Le même pourcentage d'incertitude dans l'estimation des volumes dragués sera appliqué sur l'estimation des volumes de la fraction fine mise en suspension, c'est-à-dire 15%. Ainsi le volume total de particules fines remises en suspension sera de 1 480 m³.

4.3.2. Taux de remise en suspension – Opération de déroctage

Les quantités de matériaux remis en suspension liées aux travaux de déroctage sont considérées comme faibles et limitées dans le temps (par rapport aux opérations de dragage) et sont donc considérées comme négligeables.

5. Principe de modélisation

5.1. Logiciel utilisé

La dispersion du panache turbide lors des travaux sera évaluée par modélisation tridimensionnelle à l'aide du logiciel MIKE 3D et ses modules hydrodynamiques et de transport de sédiments fins.

La simulation du transport des sédiments vaseux, qui a lieu en suspension, est assurée par le module MT (Mud Transport) pour MIKE3 FM, qui permet le calcul du transport sédimentaire vaseux sous l'action des courants (de marée et induits par le vent) et des vagues.

Le transport 3D est simulé en résolvant une équation d'advection-diffusion. La variabilité spatiale et temporelle de l'érodabilité des fonds vaseux peut être simulée : le tassement et la consolidation des lits sédimentaires sont calculés en exprimant des taux de transition entre les couches du sédiment.

Les processus suivants peuvent être pris en compte dans les simulations :

- Forçage par les vagues et/ou les courants ;
- Flocculation ;
- Description détaillée du processus de décantation ;
- Érosion/dépôt, remise en suspension ;
- Tassement/consolidation du fond.

Le module de transport par résolution d'une équation d'advection/diffusion est adapté au transport de sédiment fin qui se produit en suspension. Le forçage des érosions/dépôts s'exprime en fonction de la contrainte de cisaillement sur le fond, qui est calculée à partir du courant, et d'une contribution des vagues. Le module sédimentaire gère les échanges par érosion et dépôt, et tient compte de la consolidation des sédiments. Le sédiment est discrétisé en fines couches d'épaisseurs millimétriques, permettant de décrire les variations de densité et d'érodabilité des sédiments, et d'éventuels "litages".

Le sédiment est caractérisé dans le module MT par :

- 12 couches maximum décrivant les sédiments fins sur le fond ;
- La vitesse de chute des particules de vase dans l'eau, qui est fonction des processus de flocculation et d'entravement (la chute des particules est gênée si la concentration est trop élevée). Dans le module MT, deux formulations peuvent être choisies pour décrire ces phénomènes :
 - Richardson et Zaki (1954) ;
 - Winterwerp (1999).

5.1.1. Couplage des modules

Le couplage complet des 3 modules (Hydrodynamique, spectral, et transport de sédiment) permet notamment de calculer les phénomènes engendrés par la houle sur l'écoulement des masses d'eau, tels que les phénomènes de setup (surélévation locale du plan d'eau, en fonction de la configuration locale des fonds sur les zones de déferlement) mais permet aussi, réciproquement, de prendre en compte l'influence du set-up précédemment calculé sur la propagation des vagues à la côte. La création de courant par la houle (dérive littorale) et la réfraction des vagues par les courants sont également pris en compte.

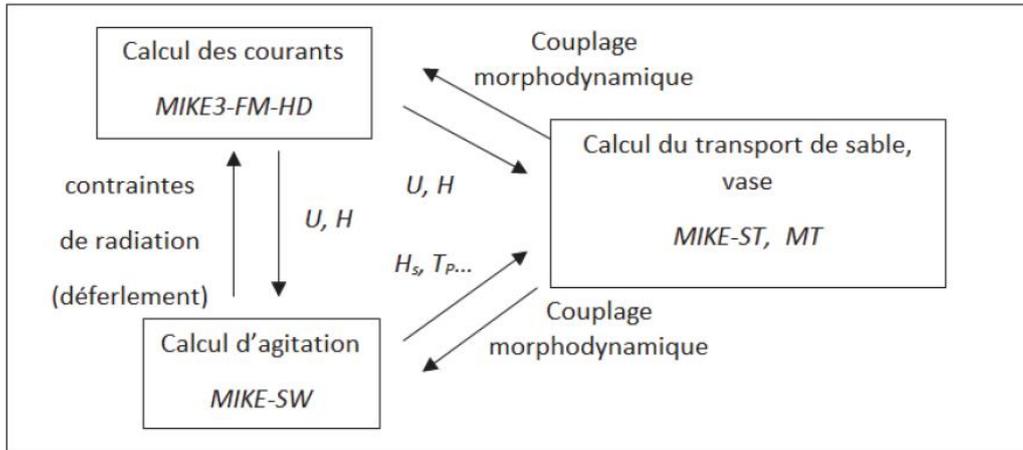


Figure 5.1: Schéma de principe détaillant le couplage des différents modules de la chaîne MIKE

5.2. Maillage

La taille des mailles dans la zone d'étude est comprise entre 5 à 10m, le raffinement est concentré sur la zone portuaire ainsi que le chenal d'accès.

Le modèle courantologique utilisé est le même que celui mis en place dans les phases précédentes de l'étude, il couvre l'ensemble de la Manche pour une bonne prise en compte des forçages de marée.

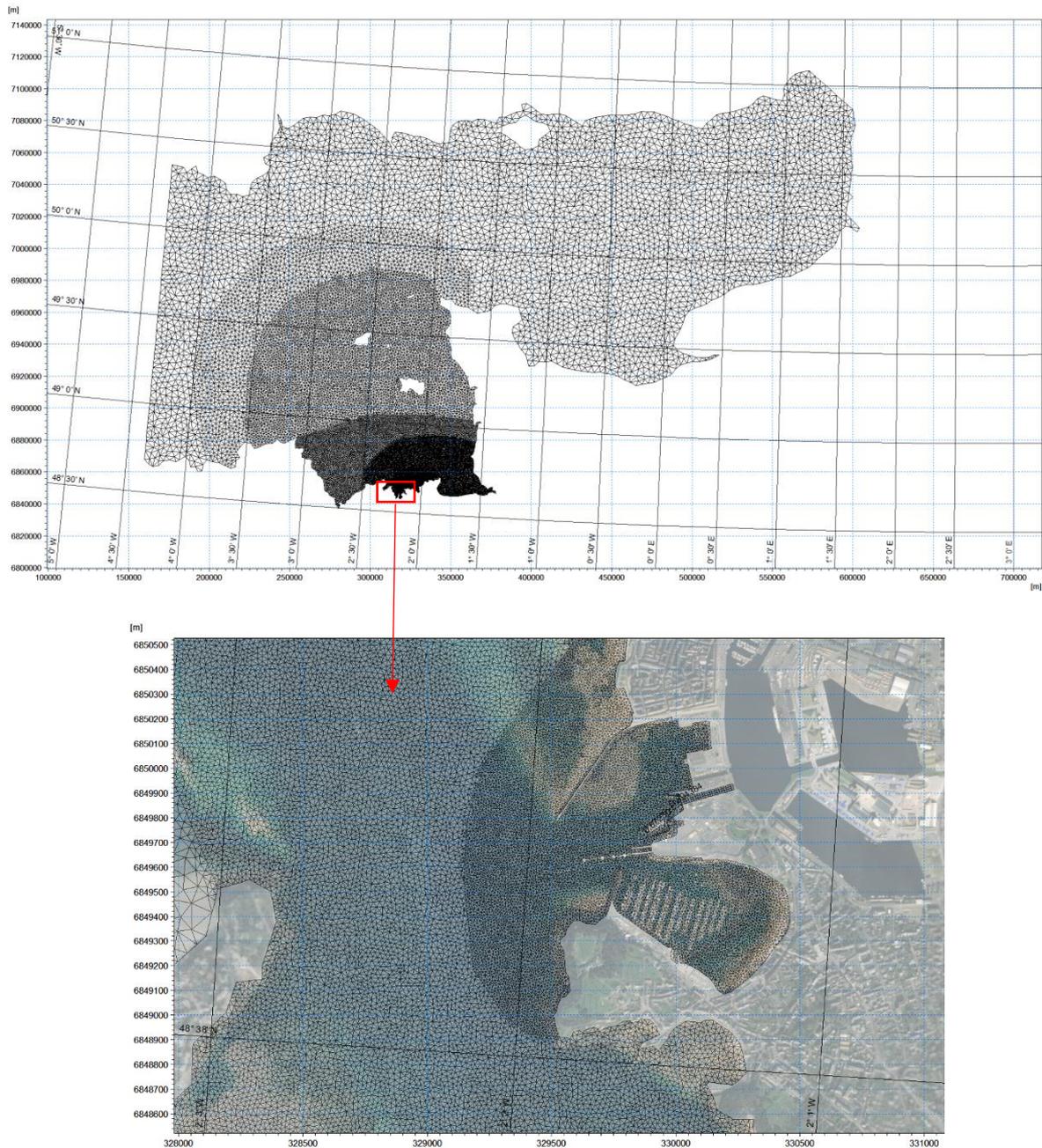


Figure 5.2 : Visualisation du maillage du modèle

Le modèle utilisé pour étudier la dispersion du panache turbide est divisé verticalement en 3 couches (% de la profondeur suivant les lignes bathymétriques).

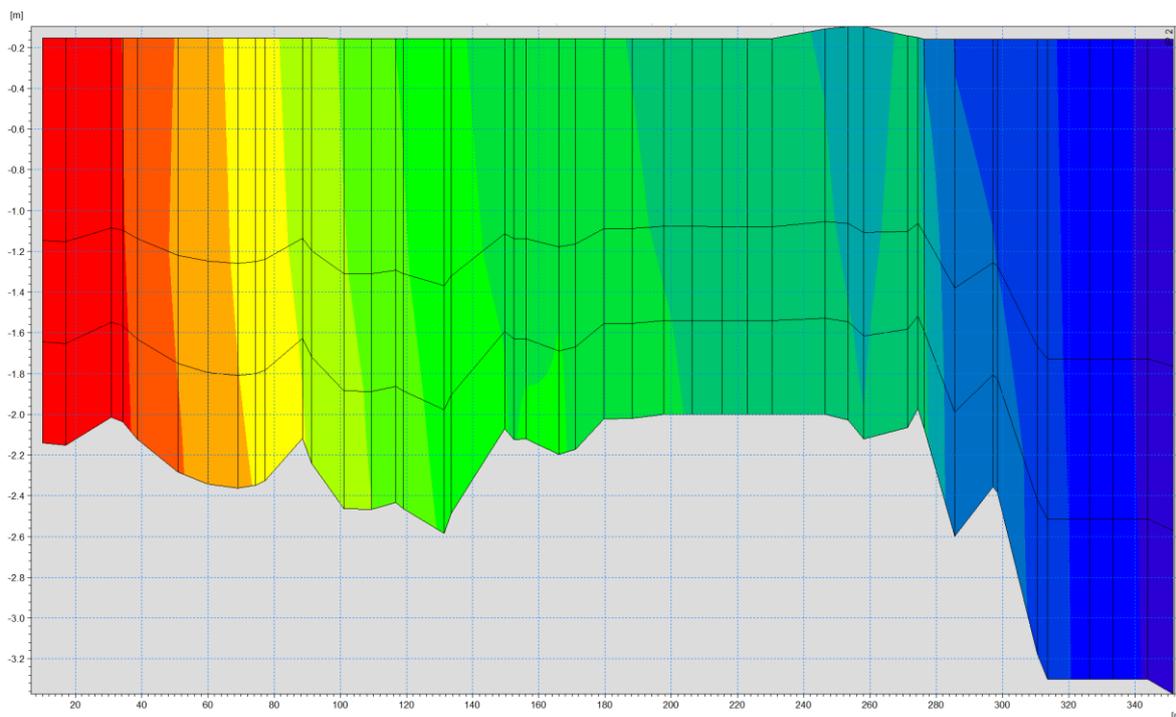


Figure 5.3 : Aperçu d'une prise verticale du maillage

5.3. Bathymétrie

Une bonne représentation de la morphologie du domaine est essentielle pour la précision et la fiabilité des calculs hydrodynamiques. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) du modèle a été réalisé en compilant toutes les données récentes disponibles :

- Le levé bathymétrique du port datant de 2018 (INGEO) ;
- Les produits numériques de bathymétrie fournis par le SHOM sur la zone ;
- Le levé Lidar ;
- La base de données GEBCO pour le large.

5.4. Hypothèses de rendements des opérations de dragage et déroctage

Selon le rapport de maîtrise d'œuvre intitulé « AVP-RAP-0500-B-Rapport-Dragage-Deroctage », la production maximale par atelier pourrait être de 1000 m³/jour pour les terrains meubles et 400 m³/jour pour les terrains durs. Le nombre de jours est calculé pour chaque zone de dragage suivant la cadence de production décrite dans ce rapport, le tableau 9 ci-après détaille le nombre de jour estimé pour chaque zone.

La zone de l'écluse n'est pas présentée ici, car comme indiqué précédemment, elle n'est pas modélisée.

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des jours de dragage estimé pour chaque zone - Terminal du Naye

N° zone de dragage	Dénomination	Volume total (m3)	Volume avec 15 % d'incertitudes	Estimation du nombre de jours pour l'opération de dragage
2	Le plateau Sud de la Rance	3 869	4 450	5 jours
3	L'évitage Sud de l'Avant-Port	14 210	16 342	17 jours
4	L'accès à P1	2 149	2 472	3 jours
5	La souille P1	13 780	15 847	16 jours
6	L'avant-port (chenal)	1 586	1 824	2 jours
	L'avant-port (cale de Dinan)	14 443	16 610	17 jours
	L'avant-port (Ponton de la Bourse)	6 671	7 672	8 jours
Total		56 773	65 292	68 Jours

5.5. Prise en compte du changement bathymétrique lors des opérations de dragage

Ne disposant pas d'informations sur le phasage des travaux de dragage/déroctage, il est pris l'hypothèse que les opérations de dragage se feront suivant l'ordre établi dans le tableau 9 ci-dessus. Le modèle prendra en compte le changement bathymétrique des opérations de dragage, comme présenté dans les figures suivantes.

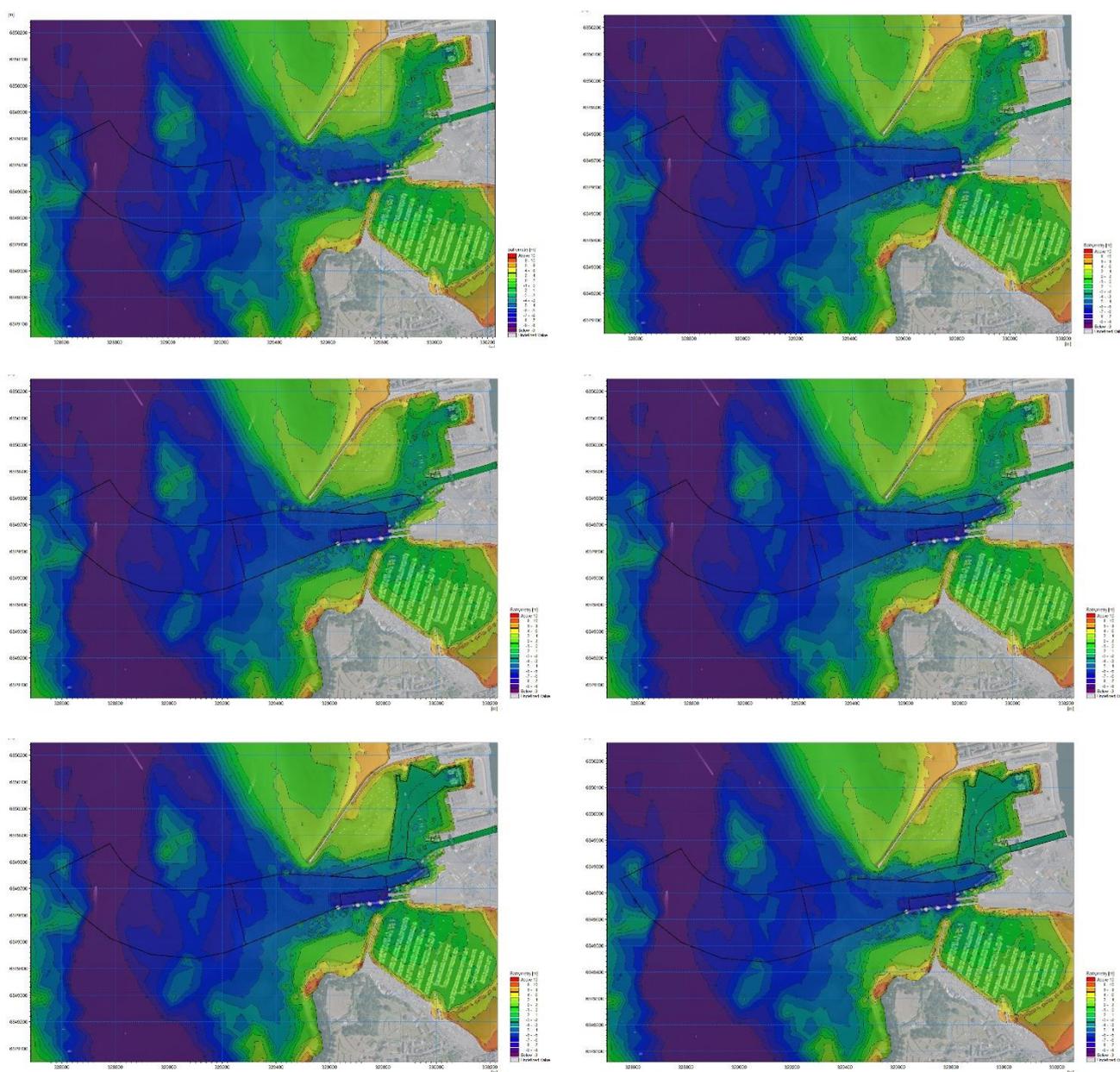


Figure 5.4: Evolution de la bathymétrie en fonction des phases de dragage pour le terminal du Naye

5.6. Simulation de la dispersion du panache turbide

Les simulations sont réalisées sur la durée totale des jours estimés. Les données de forçage sont extraites des bases données mondiales (cf sections suivantes) correspondantes à la période février–Juin 2019, qui est une période représentative des conditions rencontrées usuellement dans la zone d'étude, comme le montrent les figures ci-dessous.

La modélisation du panache se fait entre février à mi-avril 2019, un mois de simulation sans rejet suivra cette période afin de visualiser le temps de retour à la normale.

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

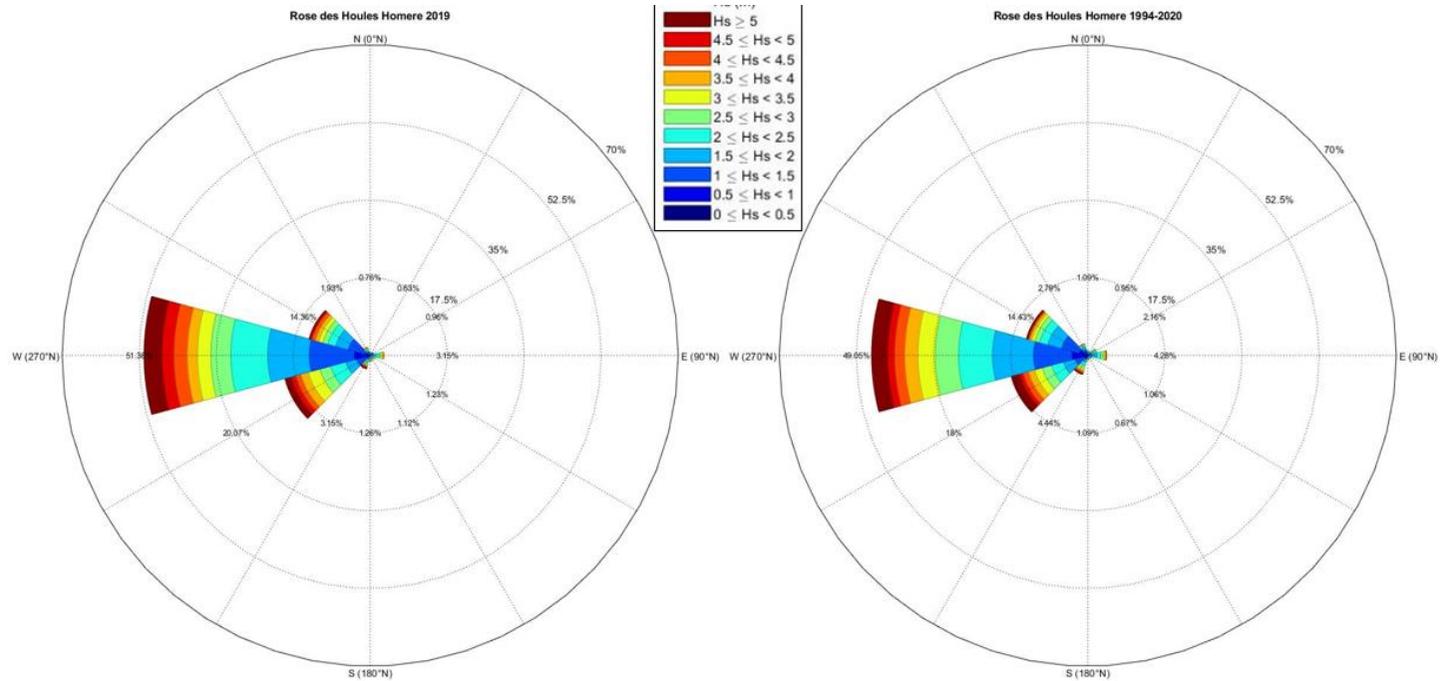


Figure 5.5 : Roses des houles au point HOMERE sélectionné pour l'étude (gauche année 2019, droite moyenne 1994-2020)

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

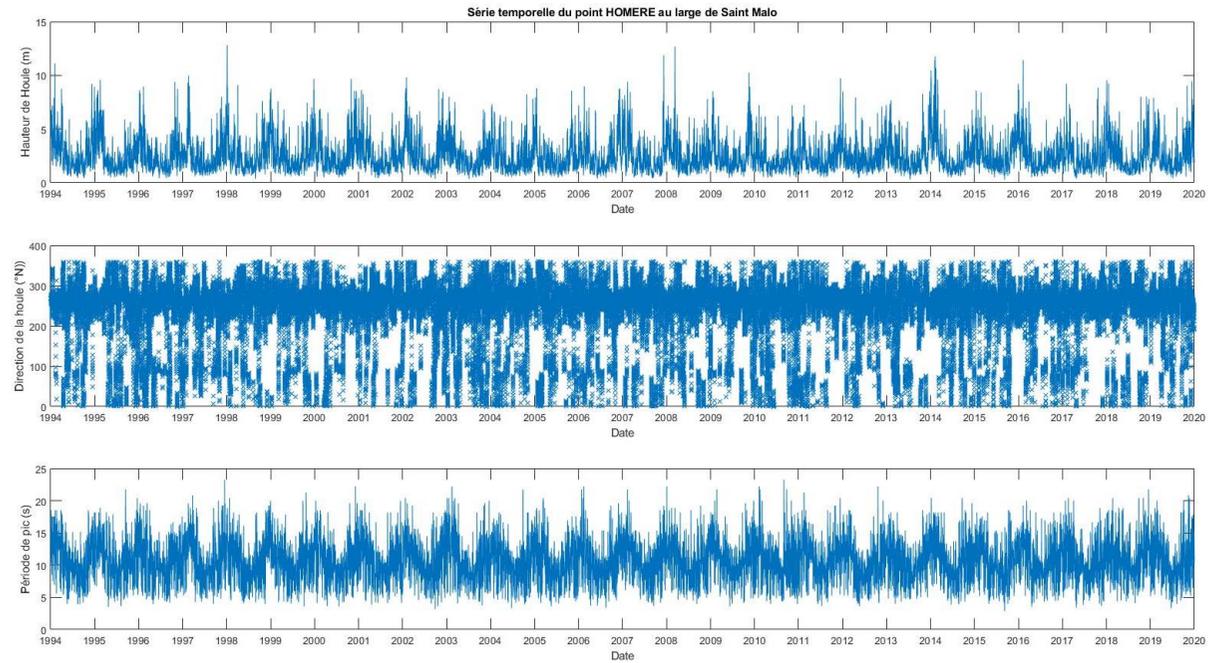


Figure 5.6 : Série temporelle des houles au point HOMERE sélectionné pour l'étude, l'année 2019 est dans la moyenne des conditions usuelles

5.6.1. Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau sont forcés aux frontières ouvertes par les niveaux issus de la reconstitution des harmoniques de marée. La base de données globale FES2014 est utilisée.

5.6.2. Vents

Le modèle est forcé par les données de vent et de pression atmosphérique CFSR (Climate Forecast System Reanalysis).

5.6.3. Houles

Les données de houle de la base de données HOMERE sont utilisées pour forcer le modèle aux frontières avec le modèle MIKE SW.

5.6.4. Caractéristiques des particules en suspension

Les vitesses de chute des particules issues de dragage dépendent principalement de leur dimension, une particule élémentaire de vase a une vitesse moyenne de chute comprise entre 0.1 et 0.8 mm/s (Laboratoire centrale hydraulique de France, 1977). Une vitesse de chute de 0.2 mm/s sera appliquée dans le modèle de manière à obtenir des résultats majorants, tout en restant réalistes.

5.6.5. Caractéristiques du rejet

Le point de rejet des sédiments est localisé au milieu de chaque zone de dragage. Des tests de sensibilité sur la position verticale du rejet dans la colonne d'eau ont été également effectués afin de voir l'impact de ce paramètre sur les résultats. La position donnant les résultats les plus majorants est reprise.

A la suite des tests de sensibilité, les points de rejet ont été localisés au milieu des zones de dragage, d'autres points de sources ont été intégrés aux zones 3 et 6, comme suite :

- La zone 3 est divisée en deux sous zones : 3a et 3b ;
- La zone 6 est divisée en trois sous zones : 6a,6b et 6c.

La figure 5.7 illustre la localisation des points rejets dans le modèle.

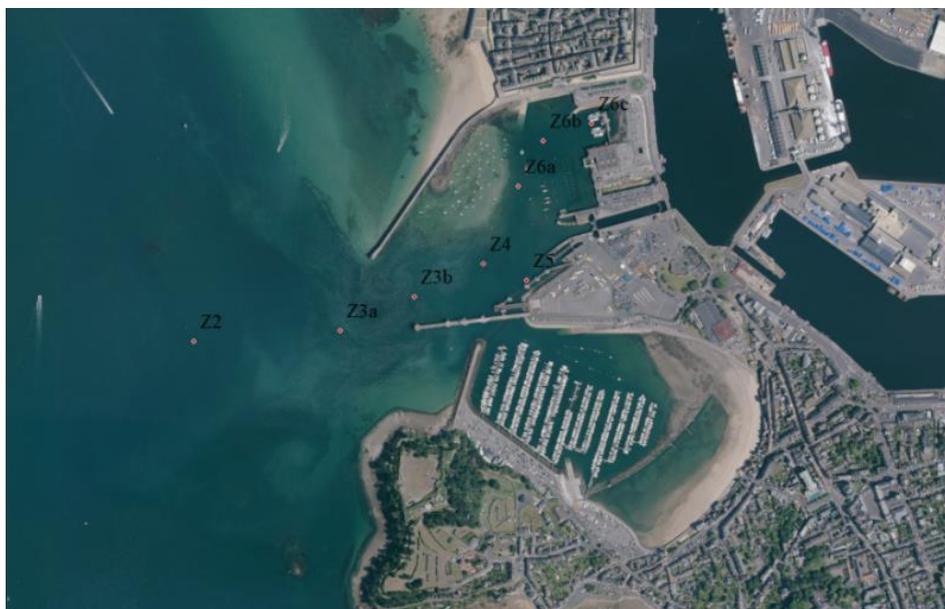


Figure 5.7 : Localisation des points sources de rejet

5.6.6. Planning des simulations

Comme énoncé précédemment, les simulations vont couvrir l'ensemble de la période de dragage (5 mois).

Le tableau ci-dessous résume le calendrier de simulation proposé. Pour rappel la cadence de dragage prise dans le cadre des hypothèses est de 1000 m³/jour pour les terrains meubles.

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

Tableau 10 : Calendrier de simulation

N° zone de dragage	Dénomination	Estimation du nombre de jours pour l'opération de dragage	Période de simulation
2	Le plateau Sud de la Rance	5 jours	du 03/02/2019 au 07/02/2019
3	L'évitage Sud de l'Avant-Port	17 jours	du 08/02/2019 au 24/02/2019
4	L'accès à P1	3 jours	du 25/02/2019 au 27/02/2019
5	La souille P1	16 jours	du 28/03/2019 au 16/03/2019
6	L'avant-port (chenal)	2 jours	du 16/03/2019 au 17/03/2019
	L'avant-port (cale de Dinan)	17 jours	du 18/03/2019 au 03/04/2019
	L'avant-port (Ponton de la Bourse)	8 jours	du 04/04/2019 au 11/04/2019
Total		68 Jours	

6. Résultats

Comme expliqué précédemment, la dynamique sédimentaire est modélisée sur l'ensemble de la période de dragage, des statistiques hydrodynamiques ont été réalisées pour le choix de l'année représentative des conditions sur le site d'étude.

Les résultats sont présentés sous la forme de différentes cartes :

- ▶ cartes de panaches de matières en suspension ;
- ▶ carte de l'enveloppe maximale du panache atteinte au cours de la saison de travaux ;
- ▶ carte montrant les durées probables de dépassement de la valeur seuil ;
- ▶ carte des dépôts à la fin des travaux.

Par ailleurs, des séries temporelles de la turbidité sont établies sur les 16 points de sensibilité définis en fonction des usages, de la localisation des herbiers, et des points de suivis existants. Ces points de sensibilité sont présentés dans la figure ci-dessous.

Pour cette étude nous prenons en compte une valeur seuil de 5mg/l pour le calcul de temps de dépassement. Cette valeur correspond au fait que le bruit de fond moyen dans la zone est autour de 5mg/l et que la valeur totale maximale à respecter est de 10mg/l en MES pour les herbiers.



Figure 6.1 : Points de sensibilités sélectionnés pour l'analyse des séries temporelles de turbidité

6.1. Cinétique du panache

Comme présagé, il est observé, après analyse des résultats de modélisation, une sensibilité du panache aux conditions locales, notamment à l'intensité de la marée et du débit du barrage de la Rance. Les premières analyses montrent que :

- ▶ Les courants de marée ont tendance à disperser le panache, soit vers le sud en situation de flot ou vers le nord en situation de courant de jusant.
- ▶ L'influence du barrage de la Rance est visible, et joue un rôle important dans le transport résiduel, le débit du barrage durant la première partie du flot génère des courants orientés vers le large et influence l'hydrodynamisme dans la zone. Le débit du barrage constitue donc un facteur de dissipation important pour l'étude.
- ▶ D'autre part, en situation de marée montante, les courants sont orientés vers le Sud-Est, une partie du panache sera entraînée par les courants et finira en amont du barrage.

Le modèle ne permet pas d'étudier le comportement du panache une fois passé au-delà du barrage.

Compte tenu de la longue durée de la simulation, il est impossible de présenter l'ensemble de la cinétique dans le rapport. Néanmoins, les figures suivantes illustrent 36 heures de simulation et permettent de visualiser le comportement général du panache vis-à-vis la courantologie locale. La vidéo représentant l'intégralité de la modélisation est fournie en dehors du présent rapport.

A noter que 72h après la fin des travaux, les concentrations en MES redeviennent inférieures à 1mg/l.

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

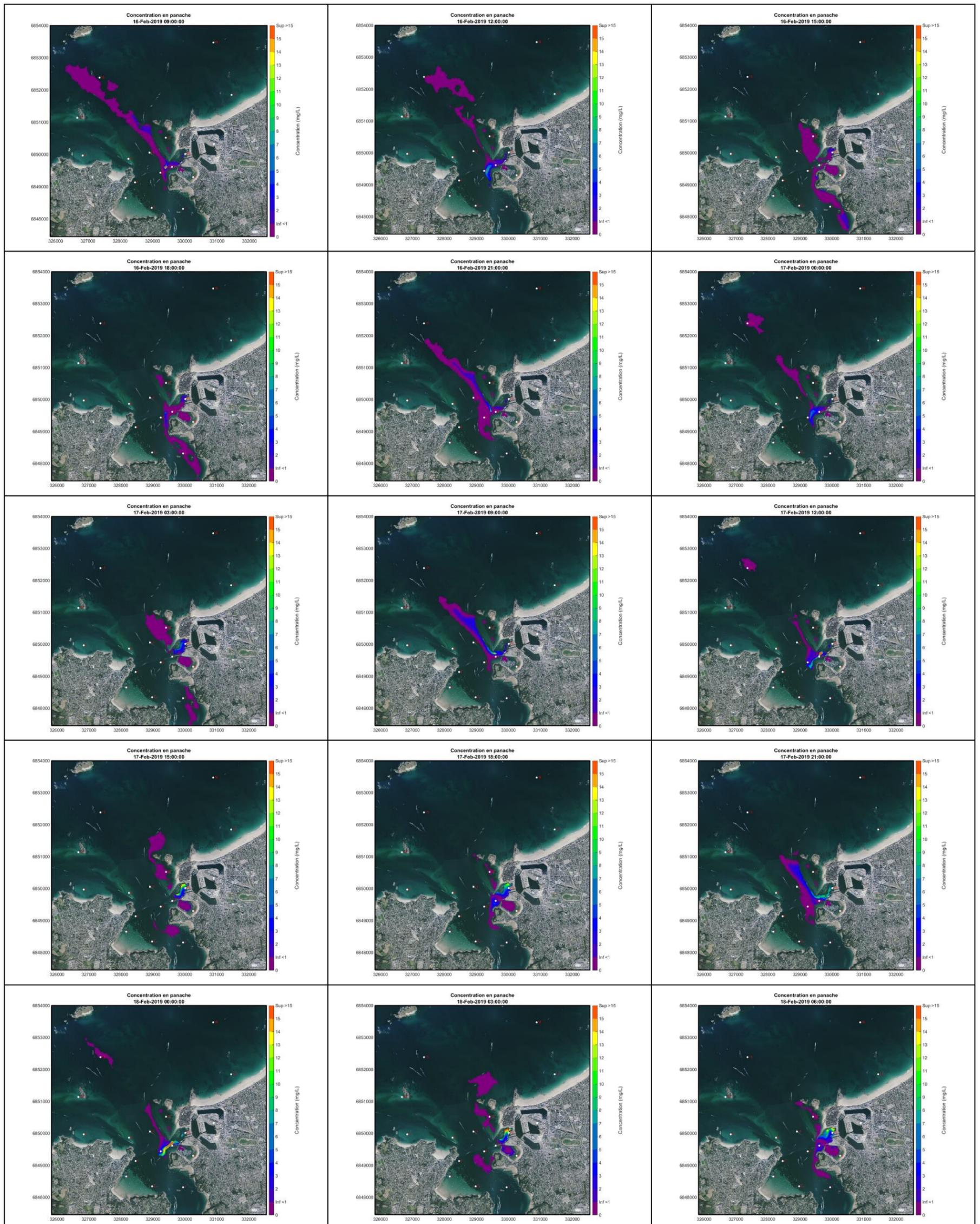


Figure 6.2: Cinétique du panache entre le 03 Février et le 04 Février (concentrations moyennées sur la verticale)

6.2. Concentration maximale du panache

L'extension maximale du panache turbide sur la durée totale des travaux est présentée ci-après.

Une concentration moyenne sur la colonne d'eau est calculée pour chaque pas de temps. Les maximums de concentration de MES sont calculés en deuxième lieu à partir de ces pas de temps, ce qui correspond au maximum de concentration enregistré dans chaque maille pendant toute la durée de simulation.

L'analyse des résultats montre :

- ▶ Une étendue de panache de MES de concentration supérieure à 15 mg/l centrée sur le port de saint Malo et le port des Bas Sablons ainsi que les alentours (dans un rayon approximatif de 500m).
- ▶ Une deuxième couche de panache de MES de concentration comprise entre 2 et 15 mg/l est observée, cette couche s'éloigne plus vers le large (jusqu'à 3.5 km au Nord) et 2 km au sud.
- ▶ La couleur violette dans la figure concerne le panache de MES de concentration inférieure à 1mg/l, ce panache couvre un rayon de 8 km.

La conclusion issue de l'observation de ces résultats est que l'extension du panache turbide de concentration supérieure à 15mg/l dû aux opérations de dragage est resté à proximité du port. Une deuxième nuance de concentration comprise entre 2 et 15 mg/l est plus étendue vers le nord et sud.

L'évolution des concentrations en fonction du temps est illustrée dans le chapitre suivant.

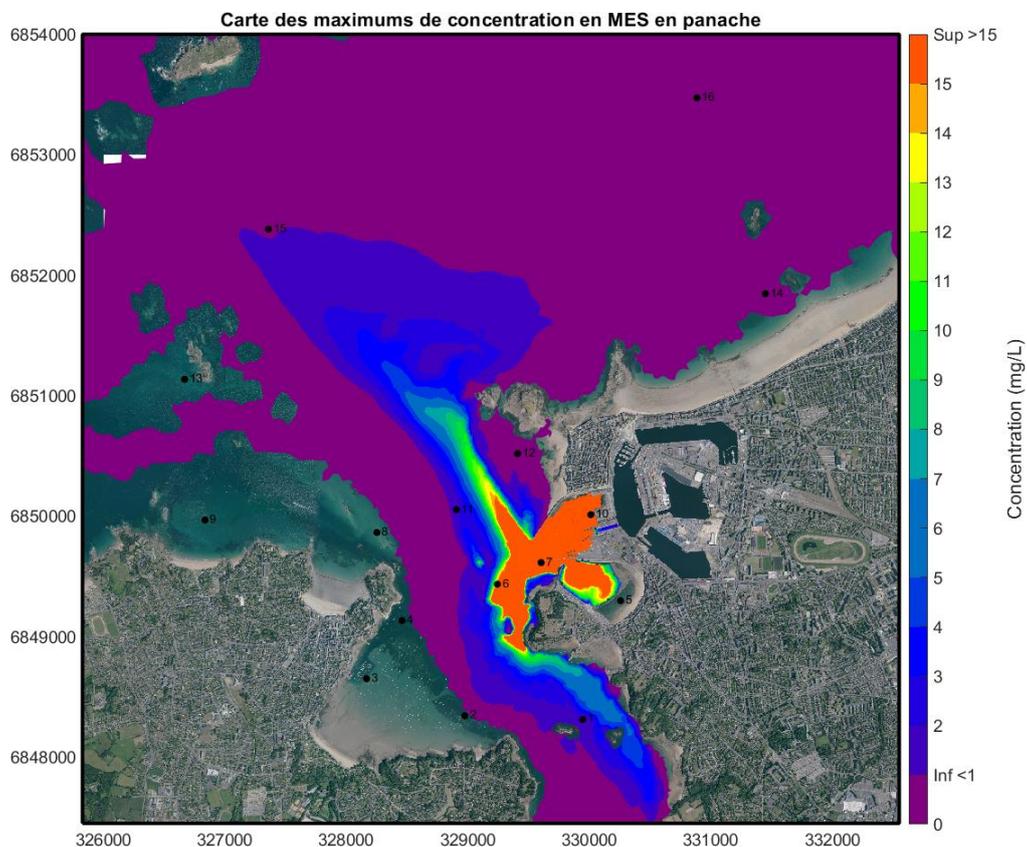


Figure 6.3: Visualisation des maximaux de concentration en MES du panache (moyennée sur la verticale)

6.3. Analyse des concentrations de panache

6.3.1. Analyse des concentrations au niveau des points de sensibilité

Afin de faciliter la lecture des résultats, les points de sensibilité ont été regroupés en 5 zones distinguées par la position géographique des points, une figure de concentration de MES dans le temps est générée pour chaque zone. La figure 6.3.1 illustre les zones de sensibilité.

Les concentrations en MES en fonction du temps sont moyennées sur la colonne d'eau (suivant les couches verticales du modèle)

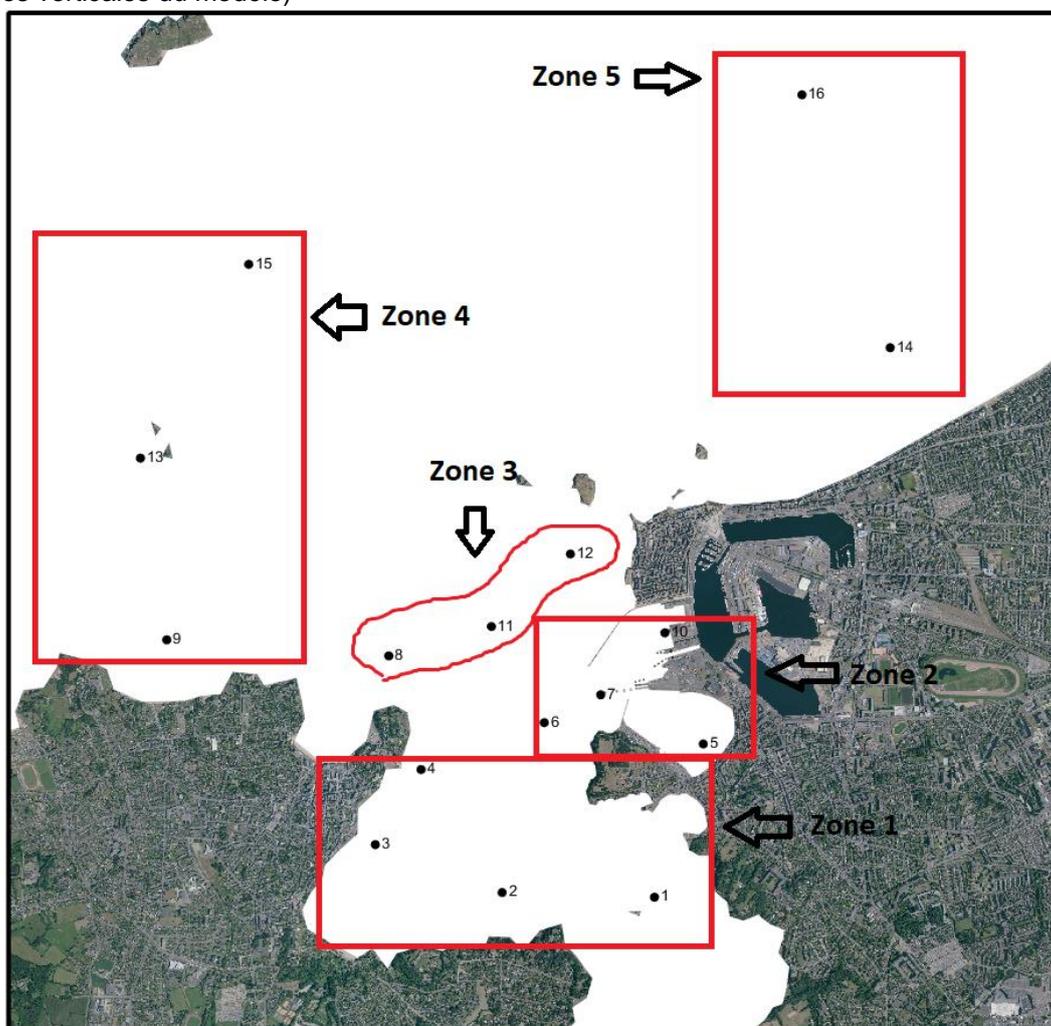


Figure 6.4: Visualisation des zones de sensibilité

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

Le tableau ci-après illustre la correspondance entre les numéros de points et l'appellation:

Points	Nom
1	ZI6
2	Suivi apparition herbier
3	Suivi port de plaisance
4	Suivi herbier
5	Plage bas sablons
6	Crapaud cité
7	Prise d'eau
8	Point Remi
9	Plage et pêche a pied
10	Prise d'eau
11	Rance Nord
12	Herbier et pêche à pied
13	Point Remi
14	Plage du Sillon
15	Clé d'aval n°10
16	Point ROCCH

L'analyse des résultats est établie pour chaque zone :

- ▶ La zone 1 situé au sud du port, affiche des concentrations de MES inférieure à 1.2 mg/l pour le point 1. Les concentrations au niveau des points 2,3 et 4 sont négligeables (<0.1 mg/l). ;
- ▶ La zone 2 est la zone où il est enregistré les plus importantes concentrations de MES, à l'exception du point 5 ou la concentration enregistrée est nulle sur l'ensemble de la durée de simulation. Les concentrations au niveau du point 6 atteignent les 20 mg/l, le point 7 dépasse de peu la barre des 40 mg/l. quant au point 10, les concentrations de MES sont les plus importantes et atteignent les 180 mg/l ;
- ▶ Les concentrations au niveau de la zone 3 sont comprises entre 0 et 1.8 mg/l en maximum ;
- ▶ La zone 4 affiche des concentrations ne dépassent pas 1 mg/l ;
- ▶ Les concentrations au niveau de la zone 5 sont nulles.

Les observations montrent que La zone 2 est la plus impactés du fait que les points de sensibilité sont localisés à l'intérieur ou à proximité du port.

Les concentrations en MES du panache en fonction de la durée de dragage pour les points 6, 7 et 10 montrent un effet cumulatif, en effet, il est observé une évolution de la concentration en fonction du temps **pendant la durée du dragage.**

Le point 5 au niveau de la zone 2 n'a enregistré aucune concentration de MES, ceci est due en partie à la digue submersible de la plage qui a tendance à bloquer l'arrivée de MES.

La digue submersible Routhouan joue un rôle important dans le blocage du passage du panache vers la plage des Bas Sablons, celle-ci a été modélisée comme un élément bathymétrique dans le modèle. Une analyse des résultats plus localisée sur la plage des Bas Sablons est faite pour valider l'analyse des observations au niveau du point de sensibilité N°5.

La figure ci-après présente l'extension maximale du panache au niveau de la plage des Bas Sablons, il est observé que le panache couvre une partie de la plage mais la concentration des MES à ce niveau ne dépasse pas les 0.2 mg/l et donc peut être considérée comme négligeable. Il est observé aussi que

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

le point de sensibilité N°5 se trouve légèrement en retrait du panache, cette observation confirme en conséquence les observations décrites au préalable sur le fait que le point de sensibilité N°5 n'a enregistré aucune concentration de MES.

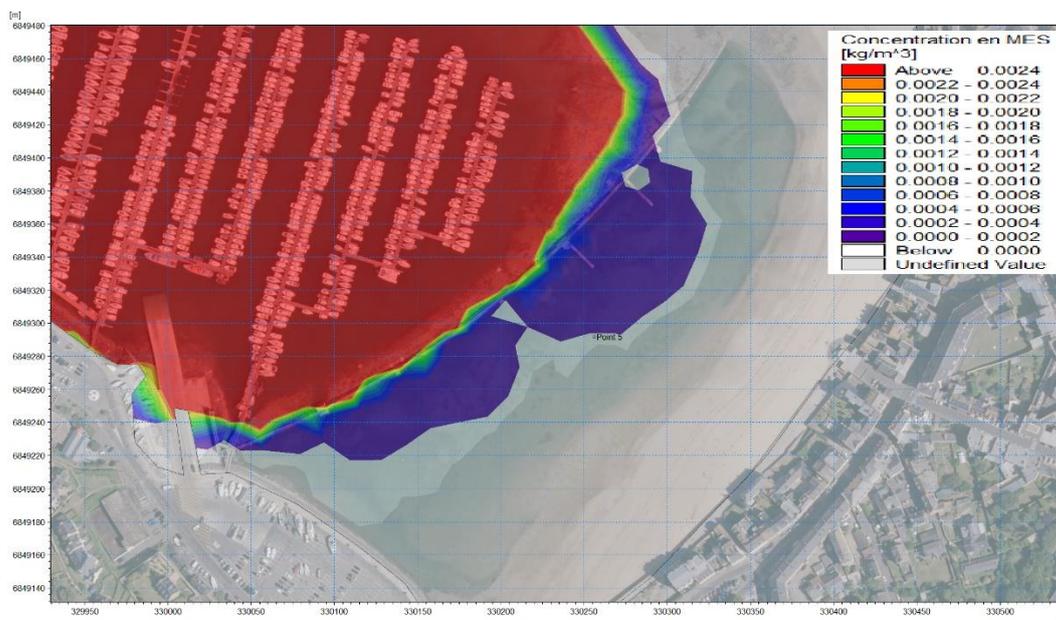


Figure 6.5 : Visualisation des maximaux de concentration en MES du panache (moyennée sur la verticale) - Zoom sur la plage des Bas-Sablons

En ce qui concerne les autres zones, la concentration de MES au niveau des points de sensibilité n'est pas très importante et reste inférieure de 2 mg/l dans la plupart des cas.

Après la fin des travaux, il est observé une diminution graduelle des concentrations de MES jusqu'à atteindre une valeur nulle un mois après la fin des travaux.

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

Série temporelle de l'évolution du panache en fonction du temps - Zone 1 - Échelle des abscisses entre 0 et 2 mg/l

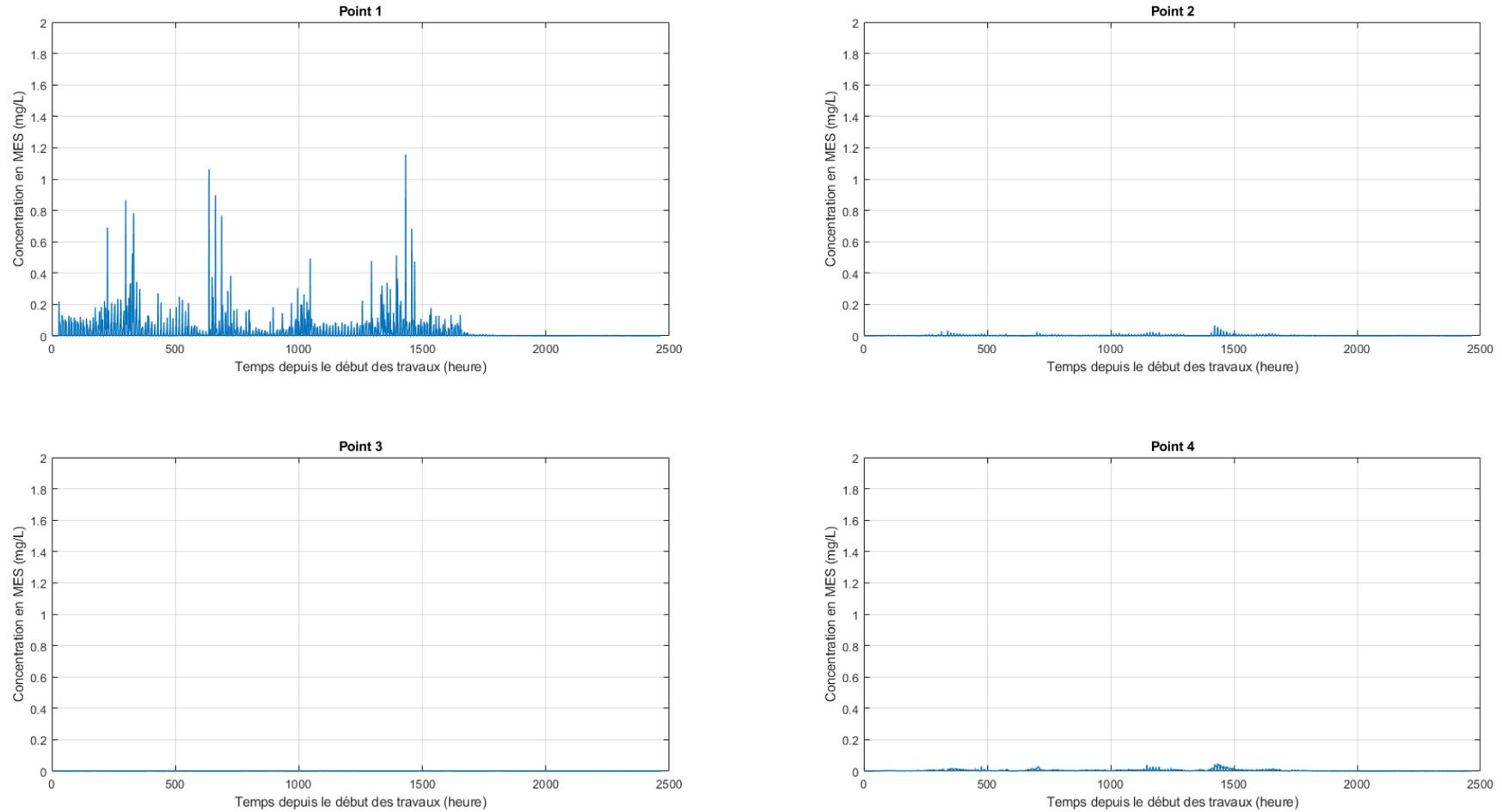


Figure 6.6: Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 1

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

Série temporelle de l'évolution du panache en fonction du temps - Zone 2 - Échelle des abscisses entre 0 et 200 mg/l

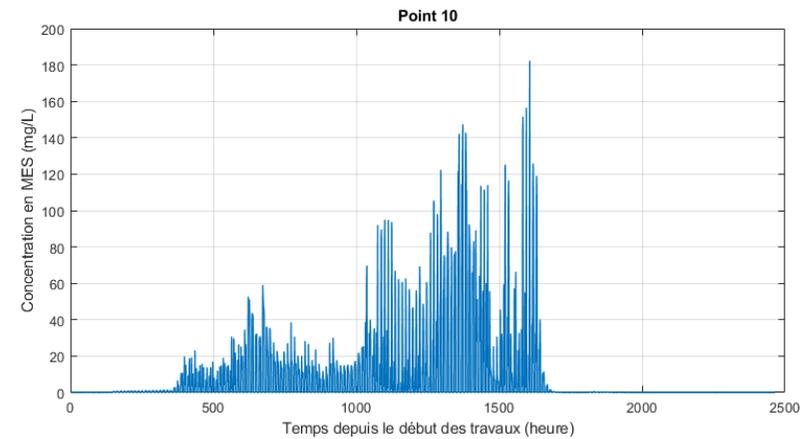
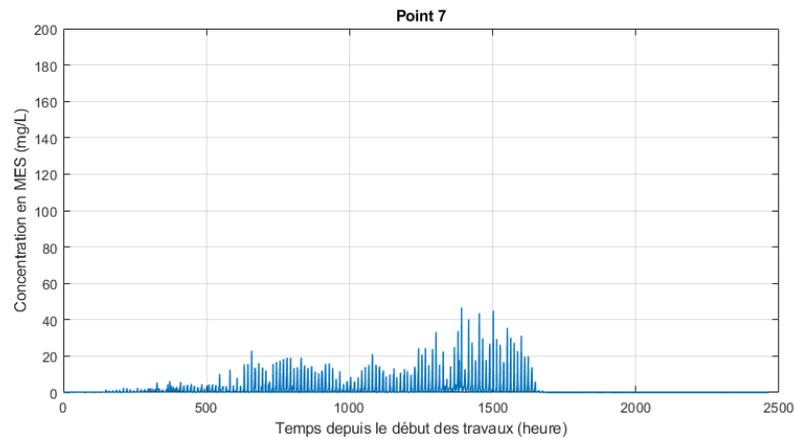
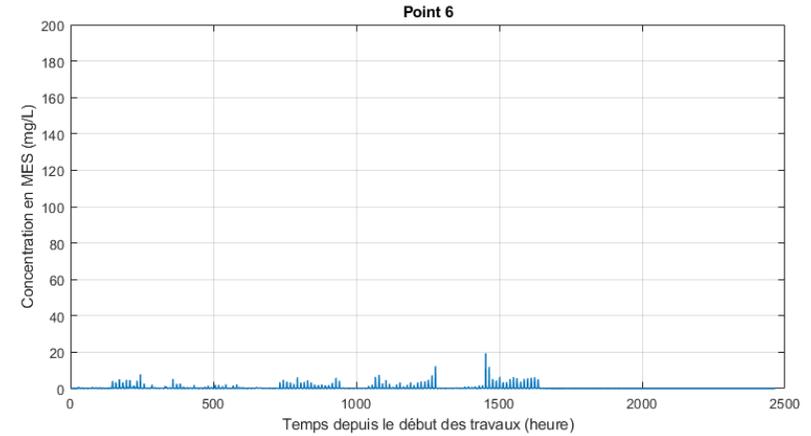
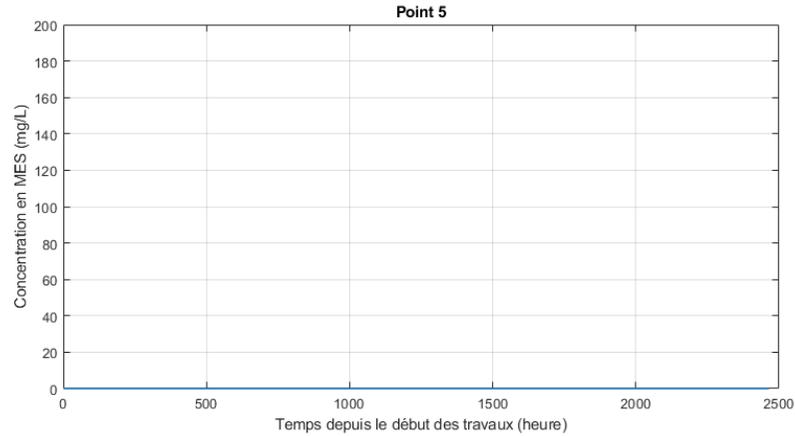


Figure 6.7: Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 2

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

Série temporelle de l'évolution du panache en fonction du temps - Zone 3 - Échelle des abscisses entre 0 et 2 mg/l

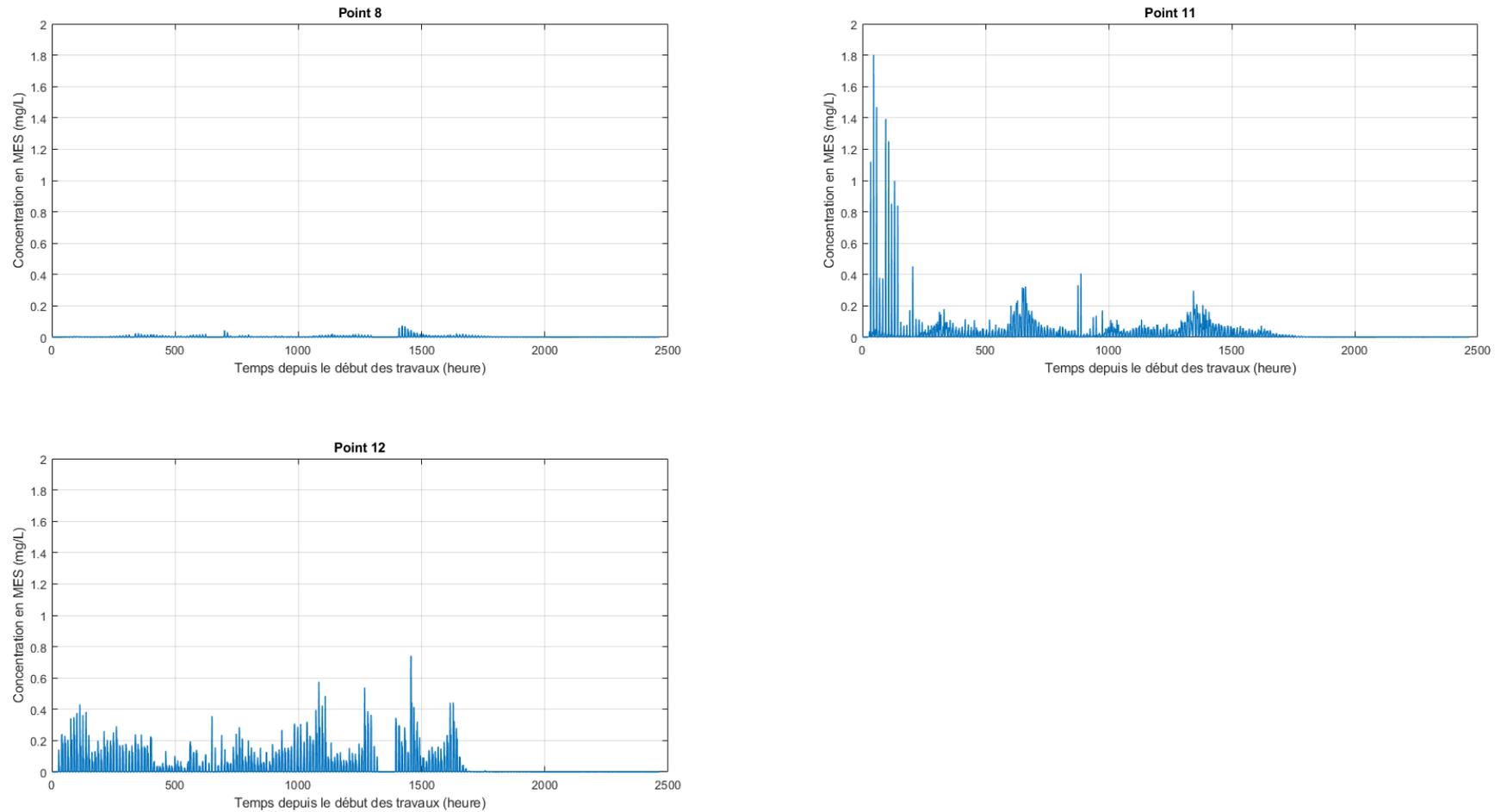


Figure 6.8: Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 3

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

Série temporelle de l'évolution du panache en fonction du temps - Zone 4 - Échelle des abscisses entre 0 et 1 mg/l

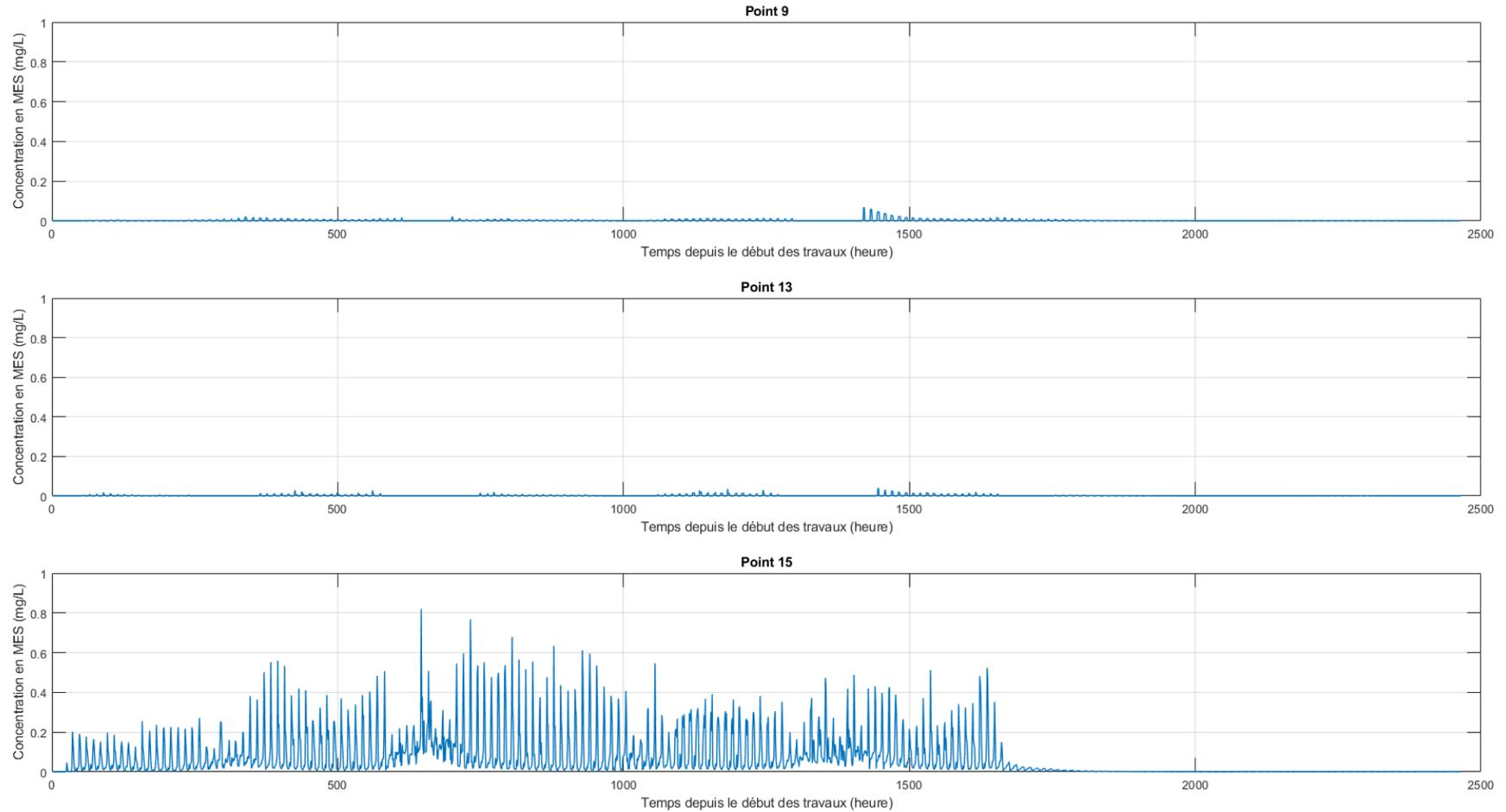


Figure 6.9: Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 4

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

Série temporelle de l'évolution du panache en fonction du temps - Zone 5 - Échelle des abscisses entre 0 et 1 mg/l

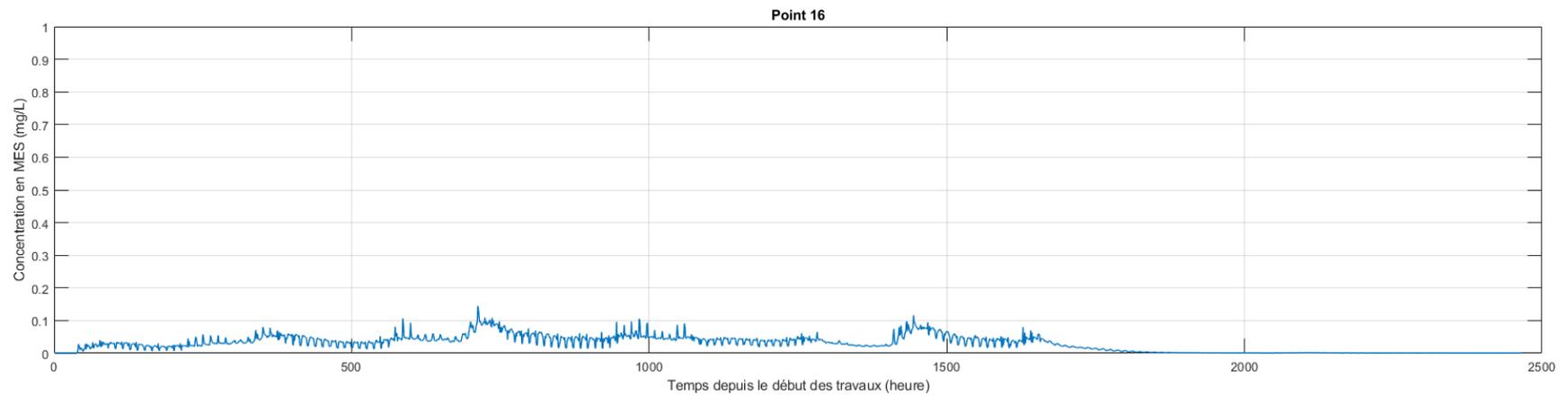
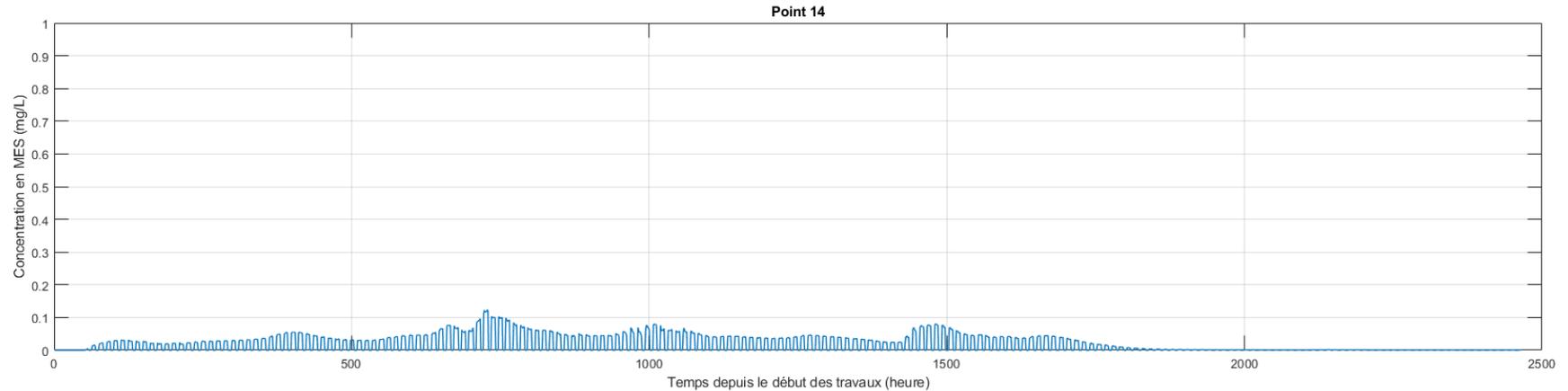


Figure 6.10 : Visualisation de l'évolution de panache au niveau de la zone 5

6.3.2. Analyse des temps de dépassements de la valeur-seuil du taux de MES

Le traitement du résultat consiste, en chaque nœud de calcul, à incrimer le compteur temps dès que la valeur du taux de MES est supérieure à 5mg/l. Finalement, est affiché, en chaque nœud le cumul des temps pendant lequel le panache a dépassé la valeur seuil sur la durée globale du dragage.

Dans l'ensemble, la durée de dépassement la plus importante est observée à l'intérieur de l'enceinte portuaire, où la durée maximale enregistrée atteint 55 jours. Sur le reste de la zone d'étude, la durée de dépassement de la valeur seuil (5mg/l) est inférieure à 5 jours.

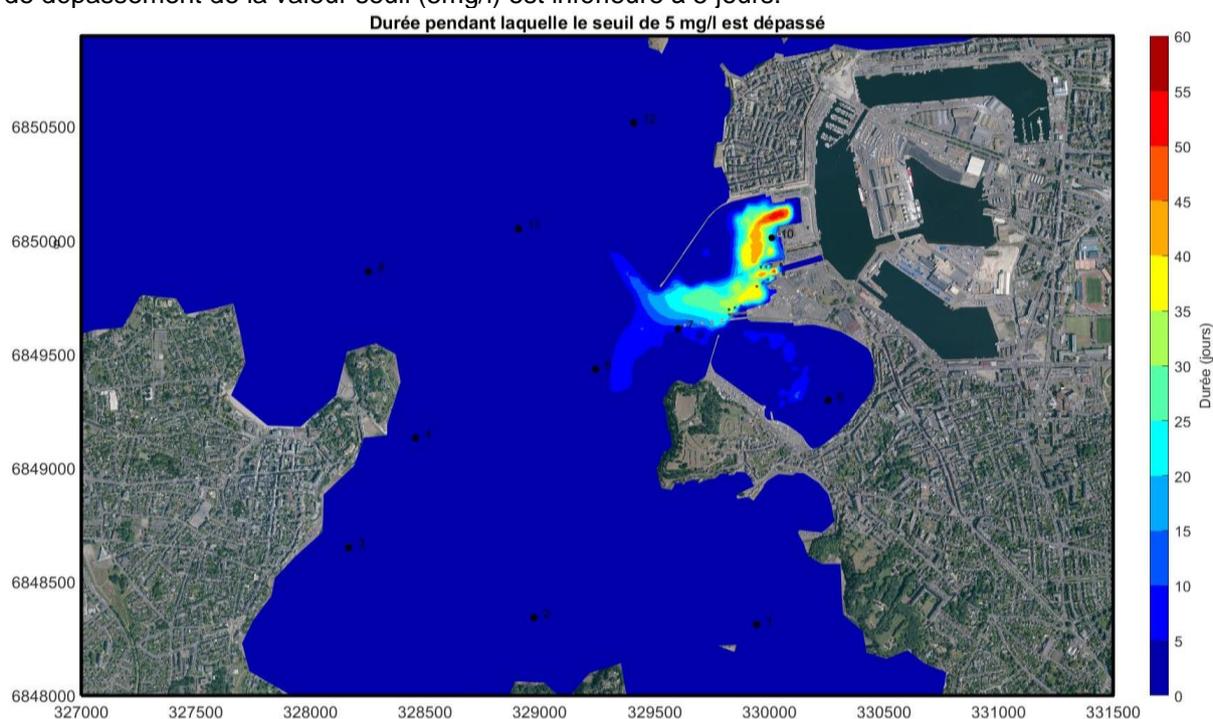


Figure 6.11: Visualisation de la durée pendant laquelle le seuil de 5 mg/l est dépassé

6.3.3. Analyse des dépôts

La figure 6.11 illustre l'épaisseur des dépôts engendrés par le dragage des vases à la fin des travaux, les premières observations montrent que le dépôt est localisé principalement au niveau du port, l'épaisseur de dépôt peut atteindre 60 cm notamment à proximité du ponton de la bourse. Parallèlement, l'épaisseur de la vase varie entre 2 et 10 cm dans les autres parties du port.

Mise à part cette observation, il n'est observé aucun dépôt conséquent en dehors de l'avant-port (>1cm), ceci est dû à l'hydrodynamique et à la courantologie locale qui dispersent efficacement les panaches turbides.

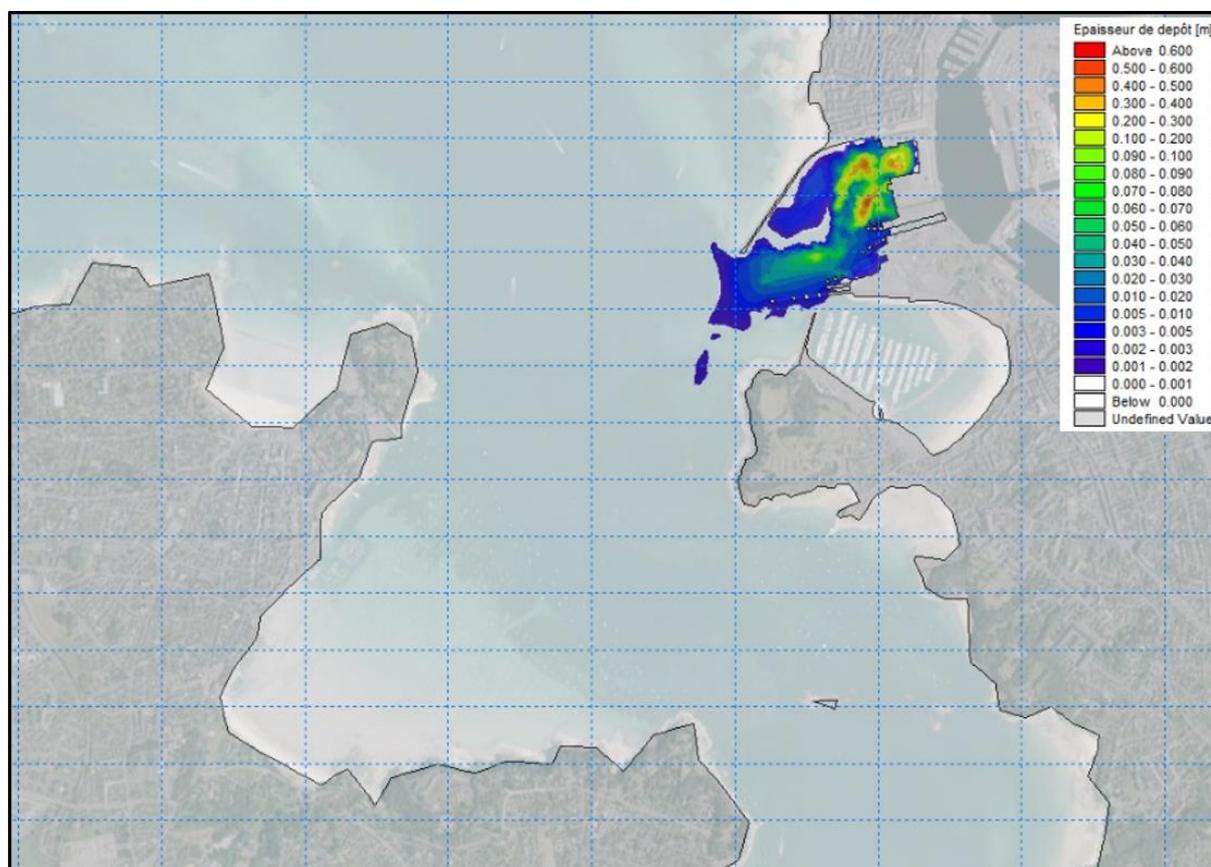


Figure 6.12: Visualisation du dépôt de vase après la fin des travaux

La figure 6.11 illustre l'épaisseur des dépôts un mois après la fin des travaux, l'épaisseur de dépôt à proximité du ponton de la bourse atteint 30 cm. Ce qui fait une diminution de plus de 50 % par rapport au dépôt à la fin des travaux. Les épaisseurs au niveau des autres zones du port ne dépassent pas 10cm.

REGION BRETAGNE
ETUDES HYDRODYNAMIQUES – REAMENAGEMENT DU TERMINAL DU NAYE ET EXTENSION DU PORT DE
PLAISANCE DES BAS SABLONS

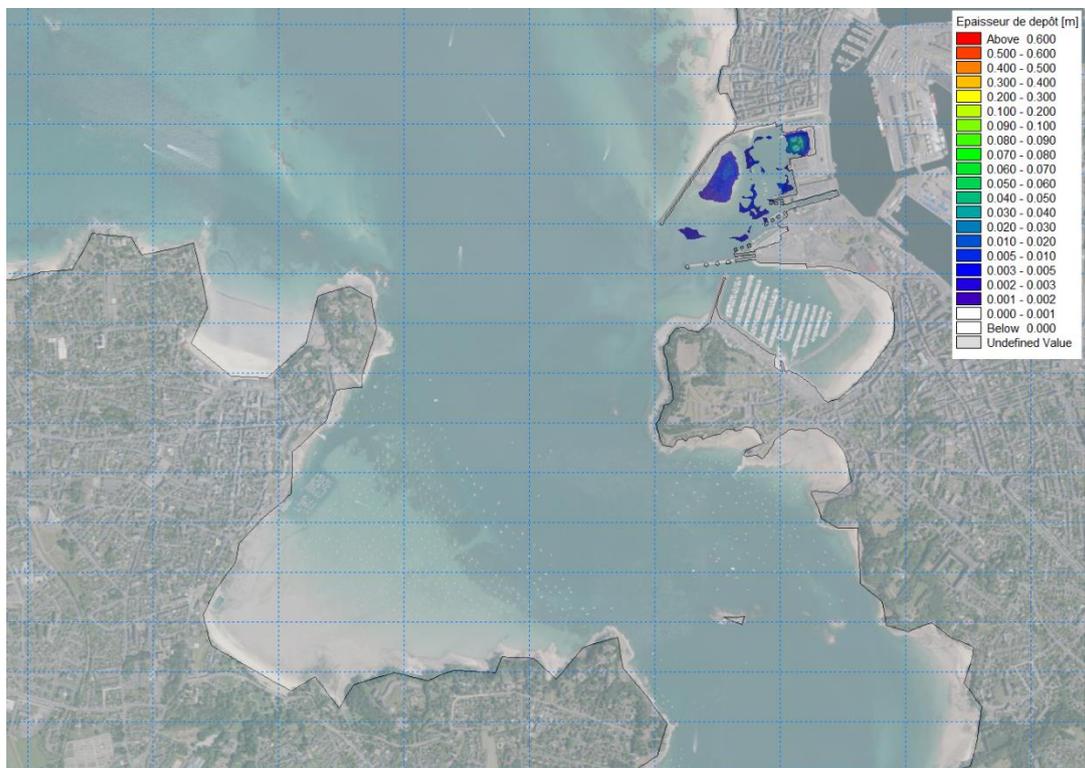


Figure 6.13 : Visualisation du dépôt de vase un mois après la fin des travaux

7. Fonctionnement du modèle vis-à-vis du barrage

Comme vu précédemment, le fonctionnement du barrage joue un rôle important dans le fonctionnement hydrodynamique au niveau de la zone d'étude, et par conséquent le comportement du panache de MES dans la zone.

Une partie du panache se voit en situation des courants de flot, se diriger vers le sud et passe en amont du barrage. Le modèle est paramétré de façon à prendre en charge les débits du barrage et le comportement du panache de MES suivant ce débit.

Néanmoins, le barrage ne fait pas partie du domaine de calcul du modèle, le comportement du panache de MES en amont du barrage n'est pas étudié, ce qui fait qu'en situation de courant de jusant (ou le débit du barrage est dirigé vers le nord), le panache de MES n'aura pas la capacité de retourner dans le domaine de calcul.

Après observation détaillée du "budget" de concentration en MES dans le modèle, nous estimons que 20 à 25 % des concentrations du panache de MES passent au-delà du barrage et sortent du domaine de calcul. Sur un volume de dragage de 66 537 m³, il a été estimé un volume total de particules fines remises en suspension de 1480 m³. Nous estimons qu'il y a entre 300 et 400 m³ de particules fines qui passent au-delà du barrage, ce qui représente environ 20 à 25% des particules fines remises en suspension, mais seulement 0.4 à 0.6% du volume total dragué.

8. Conclusion

La simulation longue durée a été effectuée sur une période février à mi-avril représentative d'une année typique pour la phase travaux, ainsi qu'un mois complémentaire pour la période post-travaux, il en ressort :

- ▶ Les courants de flot et de jusant jouent un rôle important dans la dissipation du panache ;
- ▶ L'influence du débit du barrage de la Rance sur la dissipation du panache est visible quand l'écoulement est en direction de la mer ;
- ▶ En situation de marée montante, le débit du barrage est inversé, les courants du flot génèrent un transport résiduel du panache vers le barrage ;
- ▶ Une partie du panache se voit en situation des courants de flot, se diriger vers le sud et passe en amont du barrage.

En ce qui concerne les points de sensibilité, mis à part les points 6,7 et 10 (dans l'enceinte portuaire) où la concentration du panache observée est importante, la concentration au niveau des autres points de sensibilité est très faible.

La valeur seuil de 5mg/l n'est dépassée que de manière très localisée sur la zone d'étude et la zone de travaux. Il n'est observé aucun dépassement important de ce seuil en dehors du port.



www.creocean.fr



[GROUPE KERAN](#)