



# RAPPORT

TRACTEBEL ENGIE

Plateforme 4000 T – La Ciotat

Mobilité du panache turbide

21 mars 2019 - version 3.2

---

## Colophon

---

International Marine & Dredging Consultants

Adres: Van Immerseelstraat 66, 2018 Antwerp, Belgium

☎: + 32 3 270 92 95

📠: + 32 3 235 67 11

Email: [info@imdc.be](mailto:info@imdc.be)

Website: [www.imdc.be](http://www.imdc.be)

---

## Document Identification

---

Titre	Mobilité du panache turbide
Project	Plateforme 4000 T – La Ciotat
Client	TRACTEBEL ENGIE -
Cahier des Charges	
Nom du document	I/RA/14261/18.146/LMI/JWA,
Réf. document	RA14261-18146-Sediment plume model_v3.2-PCE.docx

---

## Révision

---

Version	Date	Description	Auteur	Contrôle	Approuvé
2.0	03/12/18	Révision 1.0	JWA	TNE	JWA
3.0	07/01/2019	Révision 2.0	JWA	LMI	PCA
3.2	21/03/2019	Compléments	JWA	LMI	PCA

---

## Contrôle

---

Auteur	JWA	
Contrôle	LMI	
Approuvé	JWA	

---

## Liste de distribution

---

	Papier	-
1	Numérique	TEF

---

## Contact chez IMDC

---

Nom	Jan Walravens
Numéro de téléphone	+32 3 270 92 84 / +32 473 235 681
Email	Jan.walravens@imdc.be

---

## Table des matières

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>6</b>
<b>2. MODELISATION HYDRO-SÉDIMENTAIRE.....</b>	<b>7</b>
2.1 LE LOGICIEL TELEMAR .....	7
2.2 DONNÉES ET OUTILS DISPONIBLES .....	7
2.2.1 Modèle hydrodynamique de la Méditerranée .....	7
2.2.2 Conditions Météocéaniques .....	7
2.2.3 Bathymétrie .....	9
2.2.4 Étude géotechnique .....	10
<b>3. CONSTRUCTION DU MODÈLE DE LA CIOTAT.....</b>	<b>12</b>
3.1 DOMAINE DE CALCUL ET RÉSOLUTION DU MAILLAGE .....	12
3.2 PARAMÉTRAGE DU MODÈLE .....	14
<b>4. MOBILITÉ DU PANACHE TURBIDE .....</b>	<b>16</b>
4.1 INFLUENCE DU VENT .....	19
4.2 INFLUENCE DE LA VITESSE DE SÉDIMENTATION .....	21
4.3 POINT D'ÉMISSION DU PANACHE .....	21
4.4 PROFONDEUR DE LA SOURCE DE SÉDIMENT .....	21
<b>5. SIMULATION DU PANACHE TURBIDE EN RÉGIME DE TRAVAUX .....</b>	<b>22</b>
<b>6. CONCLUSIONS-RÉSUMÉ.....</b>	<b>24</b>
<b>7. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>26</b>

## Annexes

<b>ANNEXE A</b>	<b>RÉSULTATS POSITION « DRAGUE 1 » .....</b>	<b>27</b>
A.1	VENT D'OUEST (VITESSE 15 M/S) .....	28
A.2	VENT D'EST (VITESSE 15 M/S) .....	30
A.3	RÉGIME EN ATMOSPHÈRE CALME (VITESSE DU VENT 0) .....	32
A.4	VENT D'OUEST (VITESSE 15 M/S) AVEC VITESSE DE SÉDIMENTATION DE 0.001 M/S .....	34
A.5	VENT D'EST (VITESSE 15 M/S) AVEC PANACHE VENANT DU FOND MARIN ...	36
A.6	VENT D'EST (VITESSE 15 M/S) AVEC PANACHE VENANT DE LA SURFACE....	38
<b>ANNEXE B</b>	<b>RÉSULTATS POSITION « DRAGUE 2 » .....</b>	<b>41</b>
B.1	VENT D'OUEST (VITESSE 15 M/S) .....	42
B.2	VENT D'EST (15 M/S) .....	44
B.3	RÉGIME EN ATMOSPHÈRE CALME (VITESSE DU VENT 0) .....	46
<b>ANNEXE C</b>	<b>RÉSULTATS POSITION « DRAGUE 3 » .....</b>	<b>49</b>
C.1	VENT D'OUEST (VITESSE 15 M/S) .....	50



C.2	VENT D'EST (15 M/S) .....	52
C.3	ATMOSPHÈRE CALME (VITESSE DU VENT 0 M/S) .....	54
<b>ANNEXE D</b>	<b>SIMULATION DU PANACHE TURBIDE EN RÉGIME DE</b>	
<b>TRAVAUX</b>	<b>.....</b>	<b>57</b>
D.1	POSITION DE LA DRAGUE D1 .....	58
D.2	POSITION DE LA DRAGUE D2 .....	59
D.3	POSITION DE LA DRAGUE D3 .....	60

## Table des Figures

FIGURE 2-1 : BATHYMETRIE CONSTRUITE AVEC LE MNT DE LA MEDITERRANEE HOMONIM ET LES CARTES MARINES (SHOM, 2018). .....	9
FIGURE 2-2 : BATHYMETRIE DE LA CIOTAT OBTENUE GRÂCE À UNE CAMPAGNE DE MESURE RÉALISÉE PAR SEMANTIC ENTRE 2008 ET 2009. ....	9
FIGURE 2-3 : POSITION DES SONDAGES GÉOLOGIQUES SE4 (CERCLE ROUGE) ET SE5 (CERCLE VERT). ....	10
FIGURE 2-4 : COURBE GRANULOMÉTRIQUE ÉCHANTILLON 17E114378-001 (GÉOTEC, 2018). ....	11
FIGURE 2-5 : COURBE GRANULOMÉTRIQUE ÉCHANTILLON 17E114378-002 (GÉOTEC, 2018). ....	11
FIGURE 3-1 : MAILLAGE DU MODÈLE DE LA MÉDITERRANÉE.....	13
FIGURE 3-2 : MAILLAGE DU MODÈLE DU PORT DE LA CIOTAT.....	13
FIGURE 3-3 : MAILLAGE DU MODÈLE DU PORT DE LA CIOTAT.....	14
FIGURE 4-1 : PORT DE LA CIOTAT AVEC LES POSITIONS DE LA DRAGUE D1-3 ET LES POINTS D'ANALYSE À L'ENTRÉE DU PORT P1-5. ....	17
FIGURE 4-2 : INFLUENCE DU VENT SUR LE COURANT DE SURFACE À HAUTEUR DES DEUX POSITIONS DE DRAGAGE CONSIDÉRÉES ET À L'ENTRÉE DU PORT. SIMULATION EN ATMOSPHÈRE CALME (A), AVEC VENT D'EST (B) ET VENT D'OUEST (C). ....	20
FIGURE 5-1 : POSITIONS DE LA DRAGUE D1À3 ET LES POINTS D'ANALYSE À L'ENTRÉE DU PORT P1À5.....	23

## Table des Tableaux

TABEAU 2-1 : OCCURRENCE MOYENNE DES VENTS (EN %) PAR DIRECTION ET PAR VITESSE AU ROCHER DU BEC DE L'AIGLE ENTRE 1951 ET 1980 (BRL INGÉNIERIE, 2017). ....	8
TABEAU 2-2 : GRANULOMÉTRIE DES ÉCHANTILLONS.....	11
TABEAU 3-1 : VITESSES DE SEDIMENTATION EN FONCTION DE LA GRANULOMETRIE. ....	15
TABEAU 4-1 : INVENTAIRE DES SIMULATIONS EFFECTUEES. ....	18
TABEAU 5-1 : CONCENTRATIONS MAXIMALES AUX POINTS D'ANALYSE À L'ENTRÉE DU PORT.....	23

## 1. INTRODUCTION

La présente modélisation a pour objectif l'évaluation de l'impact des travaux de dragage en étude sur la dispersion de sédiments fins et de l'éventuelle pollution associée. Pour ce faire, une chaîne de modélisation TELEMAC a été développée. Elle se compose :

- D'un modèle hydrodynamique tridimensionnel (3D) ;
- D'un modèle (3D) de transport et dépôt de sédiments fins (vaseux).

## 2. MODELISATION HYDRO-SÉDIMENTAIRE

### 2.1 LE LOGICIEL TELEMATAC

Un modèle 3D de courant est utilisé pour la modélisation de la dispersion du panache turbide par transport en suspension. En effet, la mobilité de la matière en suspension est directement liée aux courants. Le calcul du transport se fait ensuite par advection-diffusion et le dépôt est obtenu grâce à la vitesse de chute des sédiments à travers la colonne d'eau, elle-même fortement influencée par la floculation, un processus d'agrégation et de désagrégation des particules en suspension.

Le port de La Ciotat étant protégé du large, les contraintes de cisaillement au fond devraient généralement être dominées par l'effet du courant et du vent. La mise en œuvre d'un modèle hydrodynamique TELEMATAC3D associé au module de transport sédimentaire SISYPHE a été proposé.

Le choix d'un modèle 3D (au lieu de seulement 2D) est surtout lié à la nécessité de modéliser en détail les processus de sédimentation et dispersion pour lesquels des échanges verticaux entre les différentes couches d'eau sont primordiaux.

La version hydrostatique du modèle TELEMATAC a été utilisée. Pour des modèles mondiaux ainsi que des modèles couvrant des distances supérieures à 10km on utilise en général des modèles hydrostatiques car ils fournissent des résultats plus rapidement.

### 2.2 DONNEES ET OUTILS DISPONIBLES

#### 2.2.1 Modèle hydrodynamique de la Méditerranée

Le domaine du modèle hydrodynamique utilisé pour le port de La Ciotat ne couvre qu'une partie de la Méditerranée (présentation du domaine voir Figure 3-2). Un modèle hydrodynamique, développé par IMDC en 2017, couvre l'ensemble de la Méditerranée. Les résultats de ce dernier sont utilisés comme conditions aux limites du modèle local pour le port La Ciotat.

#### 2.2.2 Conditions Météocéaniques

Le modèle de la Méditerranée développé par IMDC utilise les données de courants et de niveau d'eau fournies par TOPEX/Poseidon (Becker *et al.*, 2009). De plus, le modèle utilise les données de vent fournies par le Global Forecast System (GFS), elles varient dans le temps et dans l'espace sur la surface du maillage. Pour le modèle du port, différents scénarios ont été simulés avec des données de vent présentées dans le Tableau 2-1.

**Tableau 2-1 : Occurrence moyenne des vents (en %) par direction et par vitesse au rocher du Bec de l'Aigle entre 1951 et 1980 (BRL ingénierie, 2017).**

Beaufort	1 à 4	5 à 7	8 à 9	> 10 Total	Total
Vitesse (m/s)	0.5 à 6	8 à 17	18 à 24	>24	
20	11	4	*	0	15
40	21	7	*	*	29
60	37	20	2	*	60
80	61	57	7	*	125
100	46	35	4	*	85
120	23	10	*	*	33
140	14	5	*	*	19
160	11	2	*	0	13
180	10	1	*	0	12
200	7	*	*	0	8
220	14	2	*	*	16
240	24	4	*	*	28
260	48	23	1	*	72
280	62	44	2	*	109
300	49	75	6	*	131
320	33	65	9	*	108
340	18	21	3	*	42
360	16	12	*	*	29



### 2.2.3 Bathymétrie

Différentes sources ont été utilisées pour reconstituer la bathymétrie. La bathymétrie de la Méditerranée est montrée sur la Figure 2-1 et celle du port sur la Figure 2-2.

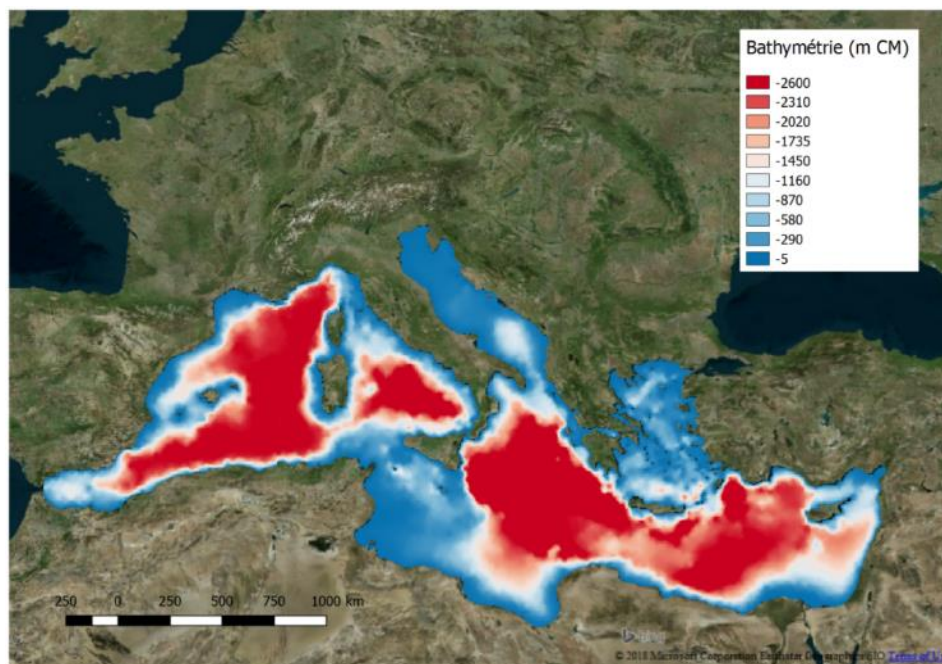


Figure 2-1 : Bathymétrie construite avec le MNT de la Méditerranée HOMONIM et les cartes marines (SHOM, 2018).

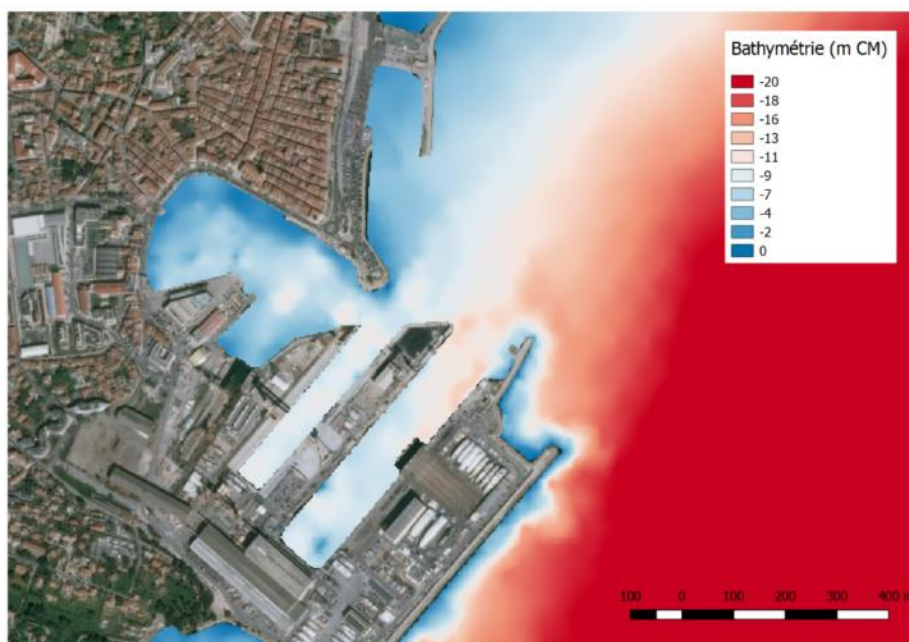


Figure 2-2 : Bathymétrie de La Ciotat obtenue grâce à une campagne de mesure réalisée par SEMANTIC entre 2008 et 2009.

## 2.2.4 Étude géotechnique

Une étude géotechnique a été réalisée dans le port de La Ciotat au niveau du Port Vieux et du chantier Naval. Des analyses granulométriques ont été réalisées (Géotec, 2018) pour deux sondages géologiques au Vibrocore (SE4 et SE5 – indiqués au Figure 2-3. Les résultats de cette analyse sont repris dans le Tableau 2-2 et les Figure 2-4 et Figure 2-5. Les conclusions montrent une fraction significative de matériaux fins (7% du volume) pour l'échantillon SE4 qui a été prélevé à l'intérieur du port. L'échantillon SE5, prélevé plus proche de la côte, présente une granulométrie plus grossière toujours composée d'une fraction significative de matériaux fins et argileux, mais également 30% de limons.

L'étude de modélisation prendra donc en compte les vitesses de sédimentation de l'argile et des limons (Tableau 3-1).

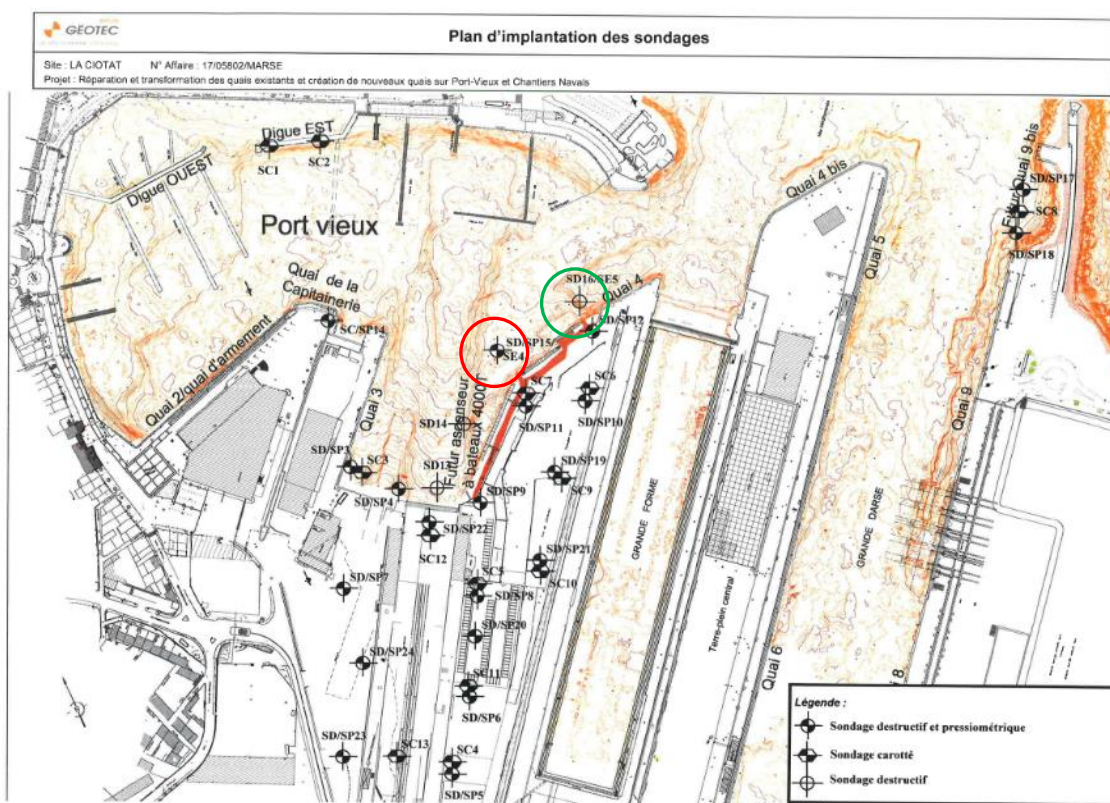
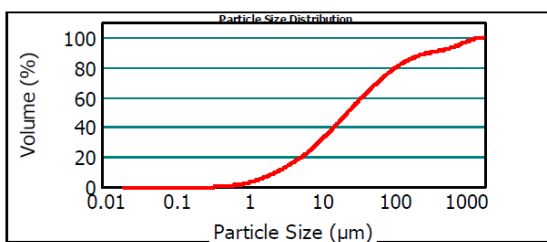
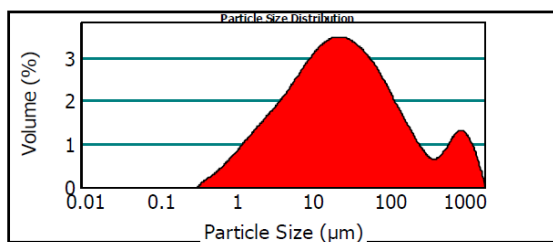


Figure 2-3 : Position des sondages géologiques SE4 (cercle rouge) et SE5 (cercle vert).

Tableau 2-2 : Granulométrie des échantillons.

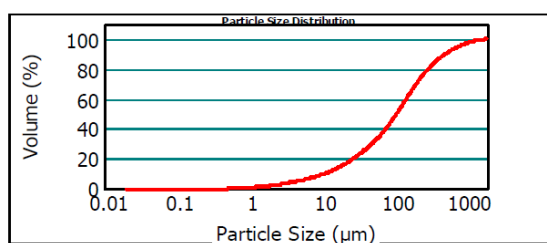
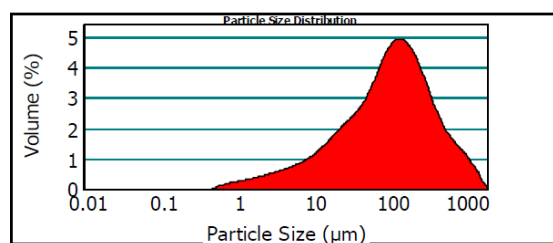
sondage	Bathymétrie Z (NGF)	Profondeur des pré- lèvements (m/fond)	Échantillon granulométrie	Fractions granulométriques (%)		
				Argile (< 2 mm)	Vase (< 63 mm)	Sable fin (< 200 mm)
SE4	-6.30	0.0-0.5	17e114378-001	7.22	69.09	85.91
SE5	-9.00	0.0-1.0	17e114378-002	2.08	34.57	68.82



■ 17e114378-001 (SED) - Average

lundi 4 décembre 2017 18:35:56

Figure 2-4 : courbe granulométrique échantillon 17e114378-001 (Géotec, 2018).



■ 17e114378-002 (SED) - Average

lundi 4 décembre 2017 18:43:14

Figure 2-5 : courbe granulométrique échantillon 17e114378-002 (Géotec, 2018).

### 3. CONSTRUCTION DU MODELE DE LA CIOTAT

#### 3.1 DOMAINE DE CALCUL ET RESOLUTION DU MAILLAGE

##### Résolution spatiale

Le logiciel permet de travailler avec des grilles non structurées. Ainsi la taille des mailles peut être ajustée en fonction de l'intérêt du lieu pour l'étude, avec de grosses mailles au large et dans les zones de moindre intérêt et un maillage beaucoup plus fin dans le port afin de suivre avec précision la complexité des écoulements aux abords des structures dans le Port.

Deux domaines de modélisation ont été utilisés :

- Un modèle existant de la Méditerranée à maillage grossier, réalisé par IMDC en 2017 pour le calcul des marées et des courants induits par le vent. Le domaine du modèle de la méditerranée couvre toute la mer (voir Figure 3-1).
- Un modèle local du port et du littoral à maillage fin (voir Figure 3-2 et Figure 3-3).

##### Conditions aux limites

- Les résultats du modèle de la Méditerranée seront utilisés comme conditions aux limites/conditions d'entrée pour le modèle local de La Ciotat.
- Au niveau des quais une vitesse normale nulle a été considérée.

##### Résolution verticale

- Dans la direction verticale, le domaine de calcul est subdivisé en 10 couches réparties égales sur la profondeur.



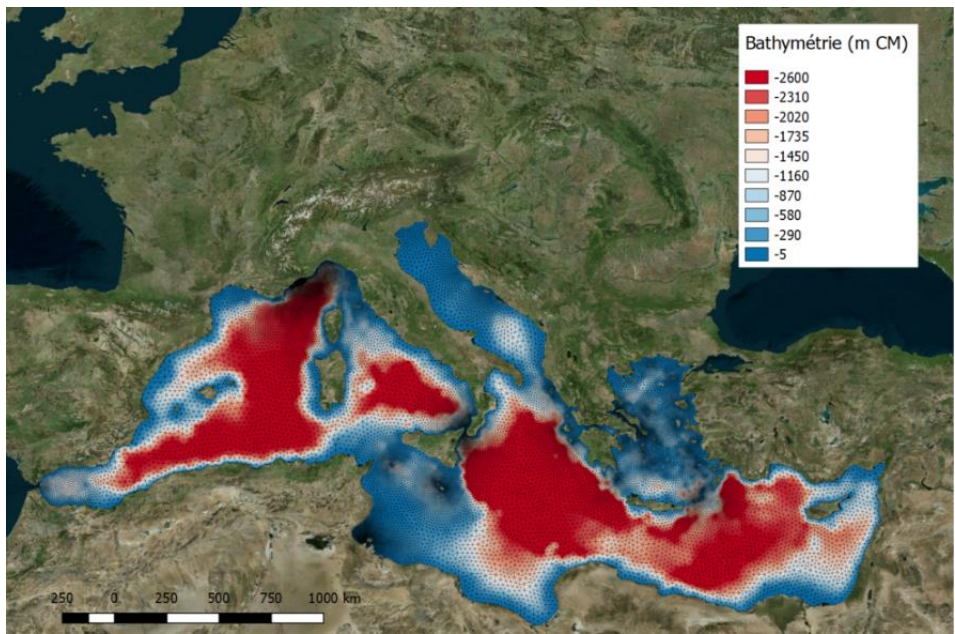
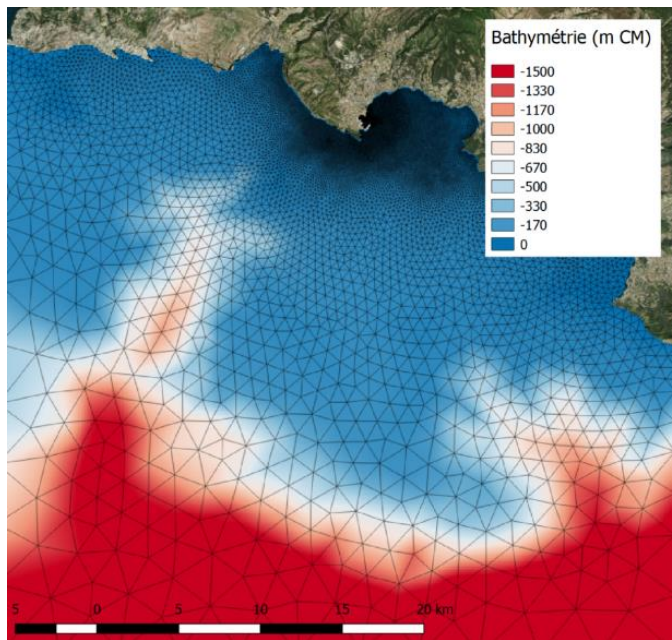


Figure 3-1 : Maillage du modèle de la Méditerranée.



**Conditions aux limites  
du modèle  
méditerranéen :**

Vélocité

Niveau d'eau

Sont appliqués aux  
entrées de ce maillage.

Figure 3-2 : Maillage du modèle du port de La Ciotat.

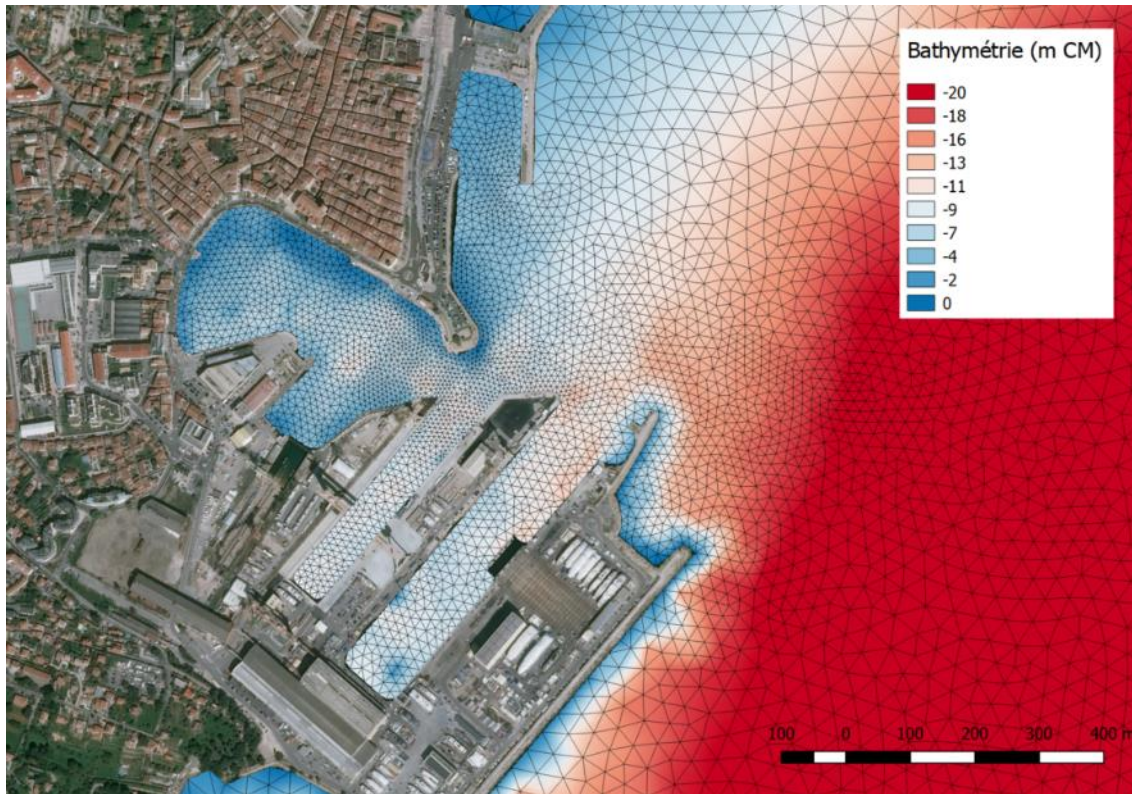


Figure 3-3 : Maillage du modèle du port de La Ciotat.

## 3.2 PARAMETRAGE DU MODELE

### Paramétrage du modèle hydrodynamique

En absence de mesures de courantologie et de marées dans le port, les valeurs, utilisés pour le modèle de la méditerranée sont utilisées.

- Coefficient de frottement du fond: Manning  $0.035 \text{ m s}^{-1/3}$
- Coefficient de frottement sur la surface libre selon Flather and Davies (1975) :

$$C_d = \begin{cases} 0.565 \cdot 10^{-3}, & U_{10} < 5 \text{ m/s} \\ (-0.12 + 0.137 \cdot U_{10}) \cdot 10^{-3}, & 5 \text{ m/s} \leq U_{10} < 19.22 \text{ m/s} \\ 2.51 \cdot 10^{-3}, & U_{10} \geq 19.22 \text{ m/s} \end{cases} \quad (3)$$

- Modèle de diffusion turbulente verticale : Modèle de longueur de mélange selon Nezu and Nakawaga avec une fonction d'amortissement selon Munk et Anderson .
- La diffusion horizontale n'a pas été prise en compte dans le modèle.



Paramétrage du modèle de transport et dépôt de sédiments fins

La vitesse de sédimentation est liée à la granulométrie des sédiments considérés. Pour l'estimation des vitesses de sédimentation la méthode van Rijn (van Rijn, 1989) est utilisée pour les sédiments sableux et la méthode Stokes pour les sédiments fins (Tableau 3-1).

*Tableau 3-1 : Vitesses de sédimentation en fonction de la granulométrie.*

Nature géologique	Diamètre (μm)	Méthode	Vitesse de sédimentation (m/s)
Sable fin	125 - 250	Van Rijn	0.1
Vase	2 - 50	Stokes (non-linéaire)	0.001
Argile	0.01 - 2	Stokes (non-linéaire)	0.00001

## 4. MOBILITE DU PANACHE TURBIDE

Pour les besoins des simulations, une quantité arbitraire de 1,5 kg par seconde de sédiments mis en suspension a été prise en compte pendant une opération d'une heure (soit un total de 5400 kg de sédiments mis en suspension pendant une heure de dragage). Cette quantité est proche de la quantité de sédiments mise en suspension par une pelle creusant un fond marin constitué de 30% de matériaux fins avec un cycle de 2 minutes et 10% de pertes.

Plusieurs facteurs ayant une influence sur la dispersion du panache turbide ont été étudiés :

### **Influence de la granulométrie :**

Les simulations préliminaires ont été réalisées en considérant une vitesse de sédimentation de limon (i.e. 0.001 m/s - Tableau 3-1). Les résultats montraient qu'avec de telles vitesses, la sédimentation se faisait très rapidement à l'intérieur du port à cause des faibles courants qu'on y trouve. Les simulations suivantes ont donc été réalisées avec des vitesses de sédimentations beaucoup plus faibles voir négligeables comme celle de l'argile (0.00001 m/s - Tableau 3-1).

### **Influence du vent :**

Le marnage dans le port est limité à 30 cm limitant les échanges de masse d'eau entre l'intérieur et l'extérieur du port. Les simulations montrent de très faibles courants induits dans le port entraînant une faible mobilité des matières en suspension même pour les sédiments qui ne se déposent pas. Seules les simulations avec des vents dominants d'Est et d'Ouest montrent la génération d'un courant significatif.

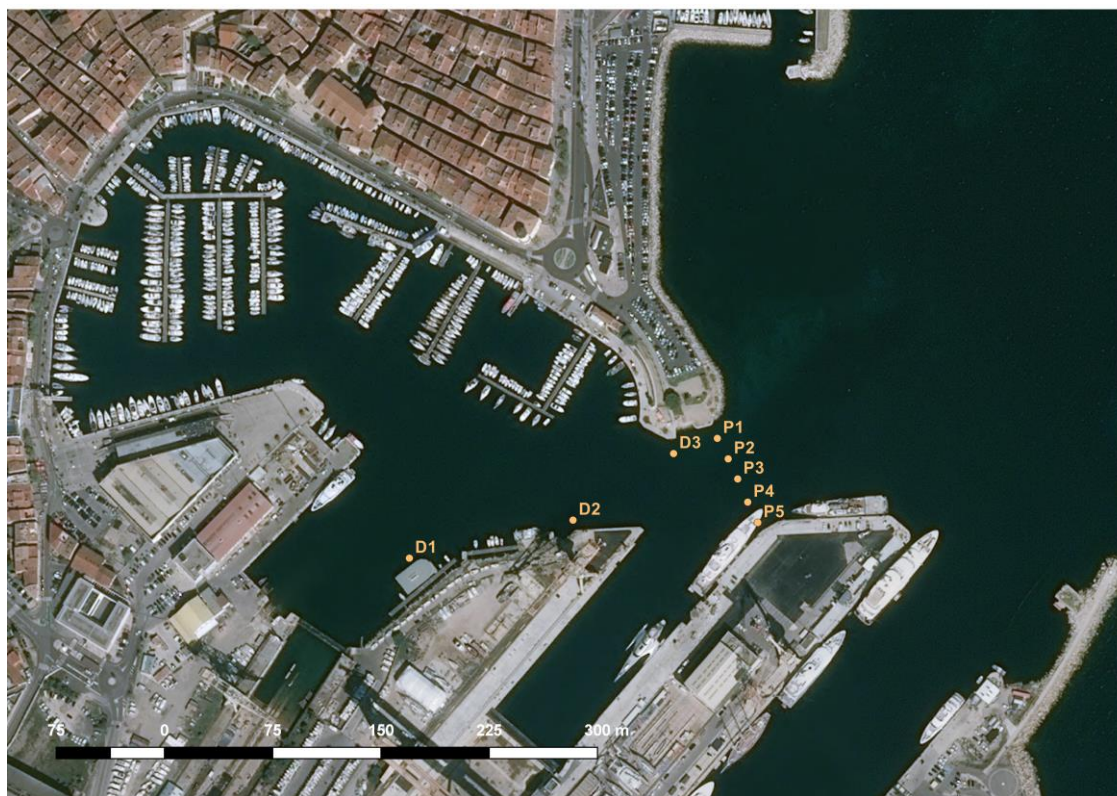
### **Influence de la position verticale de la source de sédiments :**

La rugosité du fond et l'influence du vent font que les courants en surface sont généralement plus importants que les courants au fond. Ainsi, Les sédiments mis en suspension à proximité du fond seront moins mobiles et se déposeront à proximité de leur lieu de mise en suspension. A l'inverse, les sédiments mis en suspension à proximité de la surface (par débordement du godet par exemple) seront très mobiles et se déposeront plus loin du lieu de mise en suspension en cas de courants.

### **Position de la drague :**

Trois positions de mise en suspension de sédiments ont été considérées (Figure 4-1) :

- La position 1 est située dans le bassin intérieur dans une zone plus protégée ;
- La position 2 est située proche de l'entrée du port dans une zone influencée par les courants de marée ;
- La position 3 se trouve à l'entrée du port à proximité du môle Bérourard.



*Figure 4-1 : Port de la Ciotat avec les positions de la drague D1-3 et les points d'analyse à l'entrée du port P1-5.*

Le Tableau 4-1 montre un résumé des simulations ayant été réalisées incluant les conditions aux limites ayant été étudiées. Les résultats des différentes simulations sont présentés en annexe sous forme de cartes de concentration des sédiments respectivement 1, 2, 3, 6, 9 et 12 heures après la mise en suspension.

La dispersion du panache a été analysée en calculant la concentration des sédiments à l'entrée du port (concentration maximale sur les 5 points 1 à 5 – voir Figure 4-1) afin de s'assurer que les résultats soient comparables.

Tableau 4-1 : Inventaire des simulations effectuées.

Simulation / voir annexe	Vitesse de sédimentation [m/s]	Vent	Profondeur de mise en suspension	Concentration maximale (mg/l)	Concentration moyenne pendant 24h après (mg/l)
Position de la drague 2 – proche entrée					
A1	0.00001	Ouest - const. 15 m/s	Uniforme dans la colonne d'eau	0.9	0.2
A2		Est - const. 15 m/s		12.0	0.6
A3		atmosphère calme		0.7	0.04
A4	0.001	Ouest - const. 15 m/s		0.1	0.002
A5	0.00001	Est - const. 15 m/s	fond	4.0	0.5
A6			surface	26.0	0.7
Position de la drague 1 – bassin intérieur					
B1	0.00001	Ouest - const. 15 m/s	Uniforme dans la colonne d'eau	0.9	0.2
B2		Est - const. 15 m/s		2.1	0.4
B3		atmosphère calme		0 (6.3 x 10 <sup>-13</sup> )	0 (2.5 x 10 <sup>-14</sup> )
Position de la drague 3 – môle Bérouard					
C1	0.00001	Ouest - const. 15 m/s	Uniforme dans la colonne d'eau	1.4	0.3
C2		Est - const. 15 m/s		14.0	0.6
C3		atmosphère calme		4.3	0.2

## 4.1 INFLUENCE DU VENT

Les courants liés à la marée étant négligeables, le facteur ayant l'effet le plus prononcé sur le mouvement du panache turbide est le vent. Quatre scénarios ont été analysés. Le Tableau 2-1 montre que les vents dominants viennent de l'Est et de l'Ouest. En conséquence, le modèle prend en compte un vent venant de l'Ouest (270°) et venant de l'Est (90°) de 15 m/s. Le vent a été considéré spatialement et temporellement uniforme dans le modèle de la Ciotat. Un scénario pour lequel il n'y a pas de vent a aussi été simulé et un autre avec des données de vent (voir 2.2.2).

La Figure 4-2 montre la vitesse des courants de surface induits par des vents calmes ou forts à certains points de références dans le port. Les graphes montrent l'évolution sur deux jours commençant un jour avant la mise en suspension de sédiments et se terminant un jour après. Sans vent, la vitesse des courants, principalement liés à la marée, reste inférieure à 1 cm/s. Par vent fort des tourbillons pourront être générés dans le port avec des courants résultants pouvant atteindre 10 cm/s.

### **Vent d'ouest (vitesse 15 m/s) – position initiale « dragage 2 »**

Avec un vent d'Ouest de 15 m/s appliqué uniformément sur la grille, la concentration maximale à l'entrée du port est de 0.9 mg/l. Les diagrammes présentés en annexe montrent que ce vent fort amplifie la circulation dans le port. (Voir annexe A.1).

### **Vent d'est (vitesse 15 m/s) – position initiale « dragage 2 »**

Un vent d'Est augmente fortement la concentration maximale à l'entrée du port jusqu'à 12 mg/l. Les figures dans l'annexe A.2 montrent que ce vent amplifie les courants dans le port et en conséquence répand le panache dans tout le port.

### **Régime en atmosphère calme (vitesse 0 m/s) – position initiale « dragage 2 »**

Quand la simulation est soumise à une atmosphère calme la concentration maximale (0.7 mg/l) à l'entrée du port est équivalente à celle par vent d'Ouest bien que la concentration moyenne soit bien inférieure aux simulations précédentes (0.07 mg/l). L'annexe A.3 montre que sans vent le panache ne se déplace quasiment pas.

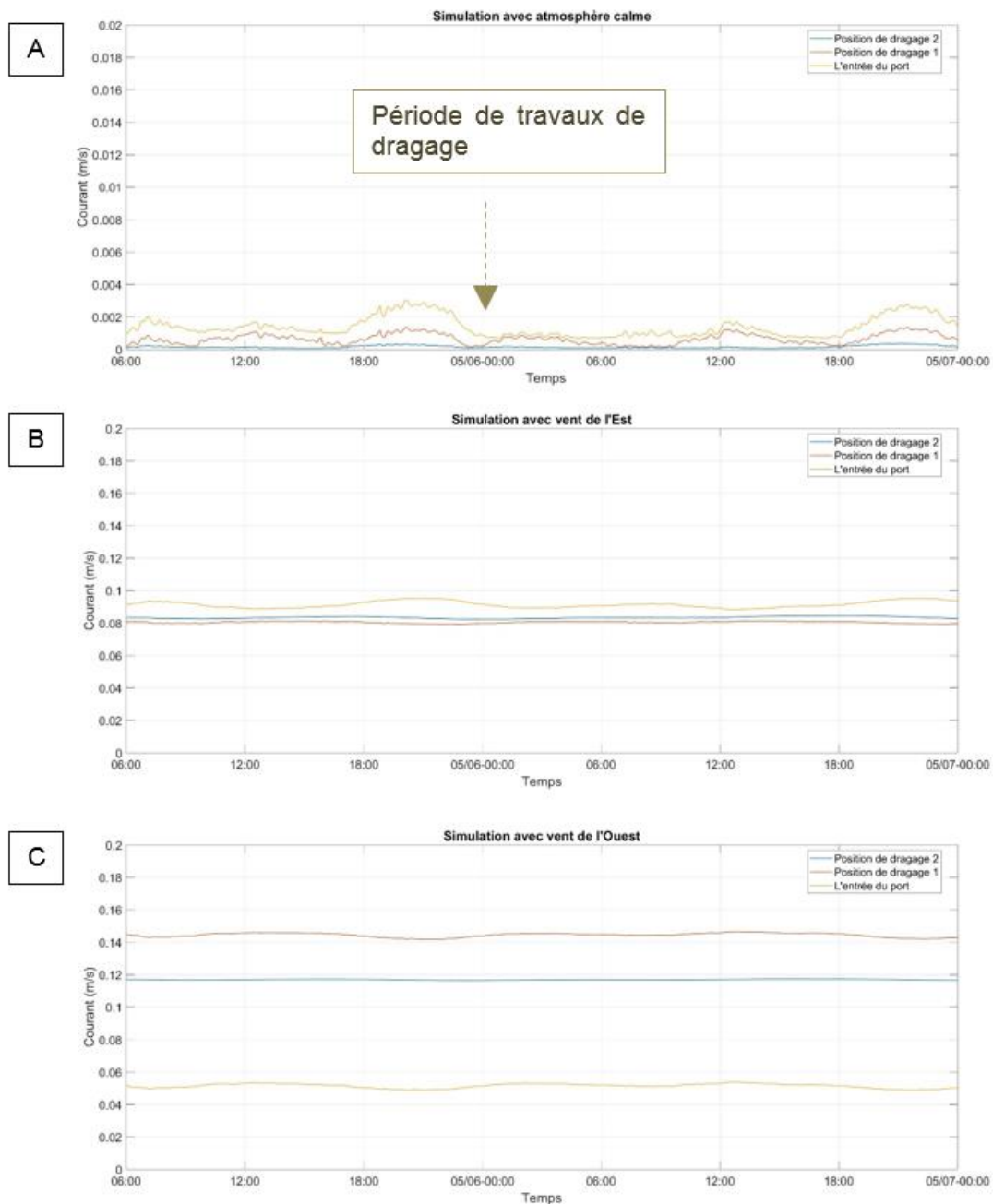


Figure 4-2 : Influence du vent sur le courant de surface à hauteur des deux positions de dragage considérées et à l'entrée du port. Simulation en atmosphère calme (A), avec vent d'est (B) et vent d'ouest (C).



## 4.2 INFLUENCE DE LA VITESSE DE SÉDIMENTATION

La vitesse de sédimentation a aussi un effet sur la dispersion du panache. Par exemple, quand une vitesse de sédimentation de  $1 \times 10^{-3}$  m/s est prise en compte, le panache a du mal à se déplacer comme illustré dans l'annexe A.4. La concentration maximale à l'entrée du port est de 0.1 mg/l à comparer à 0.9 mg/l quand une vitesse de sédimentation de  $1 \times 10^{-5}$  m/s est considérée avec un vent d'Ouest de 15 m/s.

## 4.3 POINT D'ÉMISSION DU PANACHE

Plus le dragage se fait à proximité de l'entrée du port (« Dragage 2 ») plus la concentration de matière en suspension à l'entrée du port sera importante. Lorsque le dragage se fait dans le bassin intérieur (« Dragage 1 ») la concentration du panache à l'entrée du port est plus faible. Par exemple :

- Avec un vent d'Ouest la concentration est équivalente (0,9 mg/l) mais se réduit légèrement de 0,89mg/l à 0.87 mg/l (voir annexe B.1).
- Quand le vent vient de l'Est la concentration se réduit de 12,0 mg/l à 2.1 mg/l (voir annexe B.2).
- Avec le régime de sans vent, la concentration diminue (voir annexe B.3) jusqu'à 0 mg/l ( $6.3 \times 10^{-13}$  mg/l).

Lorsque que la zone de dragage est située à l'entrée du port (« Dragage 3 »), le panache turbide est soumis à des courants plus importants proches de l'entrée du port. En conséquence, les sédiments se dispersent en dehors du port et partiellement à l'intérieur (voir 0).

## 4.4 PROFONDEUR DE LA SOURCE DE SÉDIMENT

Quand la génération du panache se fait à proximité du fond marin la concentration obtenue à l'entrée du port est légèrement moindre (4 mg/l) que quand la génération se fait dans toute la colonne d'eau (12 mg/l) (voir annexe A.5). Quand la dispersion commence à la surface la concentration à l'entrée du port est plus élevée avec 26 mg/l (voir annexe A.6).

## 5. SIMULATION DU PANACHE TURBIDE EN RÉGIME DE TRAVAUX

L'exercice de sensibilité du panache turbide en chapitre 4 démontre l'effet du vent, de la granulométrie et de la position de la drague sur la mobilité de panache et les risques de dispersion en dehors de la zone de travaux. Cependant, les hypothèses permettant d'identifier les différents effets de chacun des paramètres sont très pessimistes.

**La modélisation panache turbide en régime de travaux sont fait en adaptant les hypothèses suivantes :**

- Le vent d'Est avec vitesse de 15 m/s en haute mer, impliquant une circulation défavorable dans le bassin du port, est maintenu.
- La granulométrie des sédiments dragués est affinée et correspond au résultat d'analyse du sondage géologique SE4 avec une fraction significative d'argile (7% du volume) et de silt (32 % du volume)
- Le régime de travaux de dragage est porté à 10 heures par jour
- L'utilisation qu'une benne environnementale est prise en compte. Celle-ci relargue 5 kg de sédiments par m<sup>3</sup> dragué. Cette hypothèse est basée le guide BPE de GEODE (Groupe d'Etude et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement, 2018). En régime de travaux de 80 m<sup>3</sup> par heures une quantité de de 400 kg/h de sédiments est donc mis en suspension.

Les calculs sont faits pour les 3 positions de drague D 1-2-3 sans et avec un barrage anti-MES.

Un écran anti-MES sera utilisé afin de réduire les rejets de MES. On considère un taux d'abattement des MES de 90% qui correspond à un écran couvrant 90% de la colonne d'eau. Les 10% de MES restantes sont relâchés à travers la partie non couverte (située en dessous de l'écran).

La dispersion du panache est analysée en calculant la concentration des sédiments à l'entrée du port (concentration maximale sur 5 points – Figure 5-1). La position des 5 points est légèrement différente au 5 points choisi lors de l'exercice de mobilité du panache turbide en chapitre 4. Ils sont positionnés 100 mètres plus avancé que les points d'analyse a la Figure 4-1, représentant de manière plus objective les impacts de dragage à l'extérieur du port.

Les résultats sont présentés en 0. Les figures présentent la concentration [g/l] à la fin des 10 heures, le moment ou la concentration atteint son maximum.

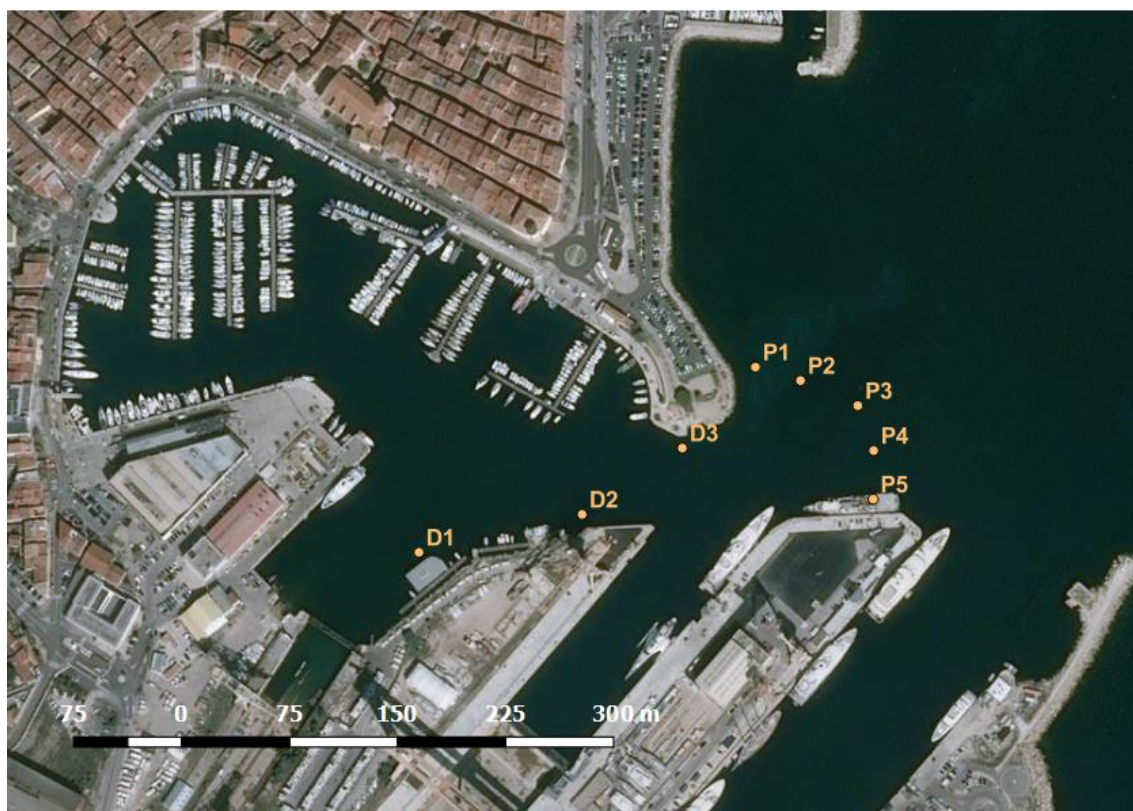


Figure 5-1 : Positions de la drague D1à3 et les points d'analyse à l'entrée du port P1à5.

Tableau 5-1 : Concentrations maximales aux points d'analyse à l'entrée du port

Position de la drague	benne environnemental <u>sans</u> écran anti-MES	benne environnemental <u>avec</u> écran anti-MES
<b>D1</b>	0.4 mg/l	0.04 mg/l
<b>D2</b>	1.6 mg/l	0.07 mg/l
<b>D3</b>	1.4 mg/l	0.13 mg/l

## 6. CONCLUSIONS-RESUME

Ce document présente les calculs réalisés afin de simuler le comportement des sédiments mis en suspension durant les opérations de dragage et de mettre en évidence les augmentations de leur concentration liée à ces dernières ainsi que leur éventuelle diffusion à l'extérieur du port.

Dans un premier temps, différents paramètres pouvant influencer le comportement du nuage turbide ont été pris en compte. Les études de sensibilité à ces paramètres permettent de conclure que :

- Les matériaux ayant une vitesse de sédimentation correspondant aux limons ne resteront pas en suspension plus de trois à six heures et ne pourront pas être transporté hors du port par les courants considérés ;
- Pour que les courants soient suffisamment forts pour emporter des sédiments hors du port, ils doivent être générés par un vent d'Est générant des tourbillons. Les sédiments doivent de plus être suffisamment fins pour rester en suspension ;
- Les courants favorisant l'homogénéisation de la colonne d'eau, le fait que les sédiments soient mis en suspension à proximité de la surface ou au fond a peu d'influence sur le résultat final.

Dans un deuxième temps, la situation la plus critique avec vent d'Est est de nouveau étudiée mais avec des hypothèses sur les matériaux et sur la quantité relarguée plus proche de la réalité des travaux avec notamment :

- L'emploi d'une benne environnementale dans le premier calcul,
- La mise en œuvre d'un rideau anti-MES autour de l'atelier en plus de la benne environnementale dans le deuxième calcul.

Avec le seul emploi de la benne environnementale les concentrations maximales à l'entrée du port sont très largement diminuées :

- De 2,1 à 0,4 mg/l pour la position de drague n°1.
- De 12 à 1,6 mg/l pour la position de drague n°2.
- De 14 à 1,4 mg/l pour la position de drague n°3.

La mise en place d'un rideau anti-MES vient parfaire encore le dispositif. A titre indicatif, en méditerranée, les concentrations en MES varient entre 0,1 et 5 mg/l à l'Est des Bouches du Rhône et les concentrations calculées avec le rideau anti-MES sont toutes inférieures à 0,2 mg/l.

Ces derniers résultats montrent que les effets du dragage sur la quantité de matières en suspension dans le port sont très limités dans le temps et les quantités de matières en suspension générées restent faibles. Il a également pu être montré que lorsque le dragage a lieu dans le port, le panache turbide est cantonné à l'intérieur du port et n'en sort pas. Enfin, il faut noter que les simulations ont été réalisées sans prendre en compte de mesures complémentaire à l'entrée du port de type rideau à bulles qui permettrait de

réduire encore plus l'impact des opérations sur les matières en suspension à l'extérieur du port.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

Becker J.J., Sandwell D.T., Smith W.H.F., Braud J., Binder B., Depner J., Fabre D., Factor J., Ingalls S., Kim S.-H., Ladner R., Marks K., Nelson S., Pharaoh A., Trimmer R., Von Rosenberg J., Wallace G. & Weatherall P. (2009). Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30\_PLUS. *Marine Geodesy*, 32(4), 355–371, doi: 10.1080/01490410903297766.

BRL ingénierie (2017). Etude d'Agitation du port de La Ciotat. SEMIDEP, Département DES Bouches-du-Rhône, A00069\_Agitation\_LaCiotat.

Géotec (2018). Réparation et transformation des quais existants et création de nouveaux quais sur le Port Vieux et les Chantiers Navals. Agence de Marseille, 17/05802/MARSE/01.

Groupe d'Etude et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement (2018). Dragages et immersions en mer et en estuaire Revue des bonnes pratiques environnementales.

Meteoblue (2018). Télécharger données historiques Toulon. [https://www.meteoblue.com/fr/meteo/archive/export/toulon\\_france\\_2972328](https://www.meteoblue.com/fr/meteo/archive/export/toulon_france_2972328).

SHOM (2018). SHOM Data Portal. Accessed 16 January 2018, .

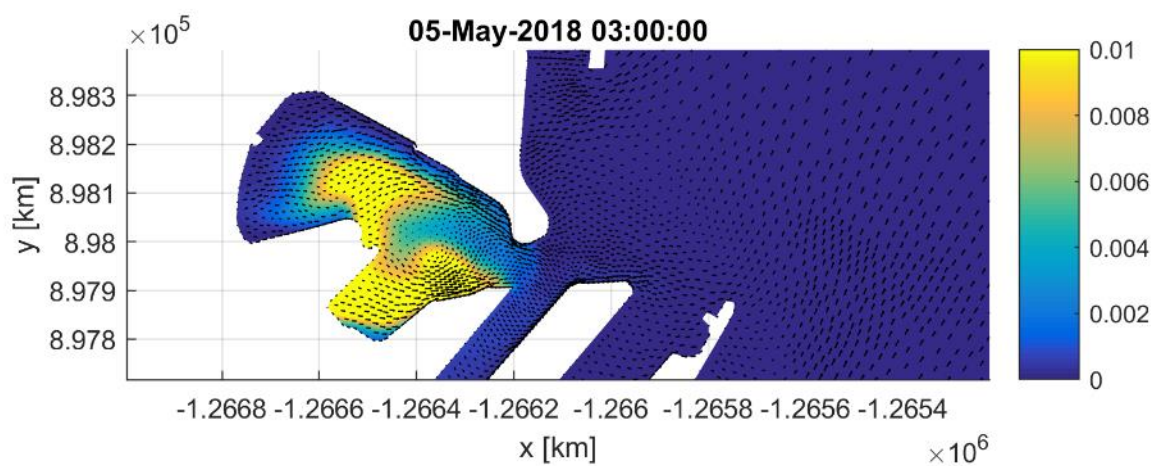
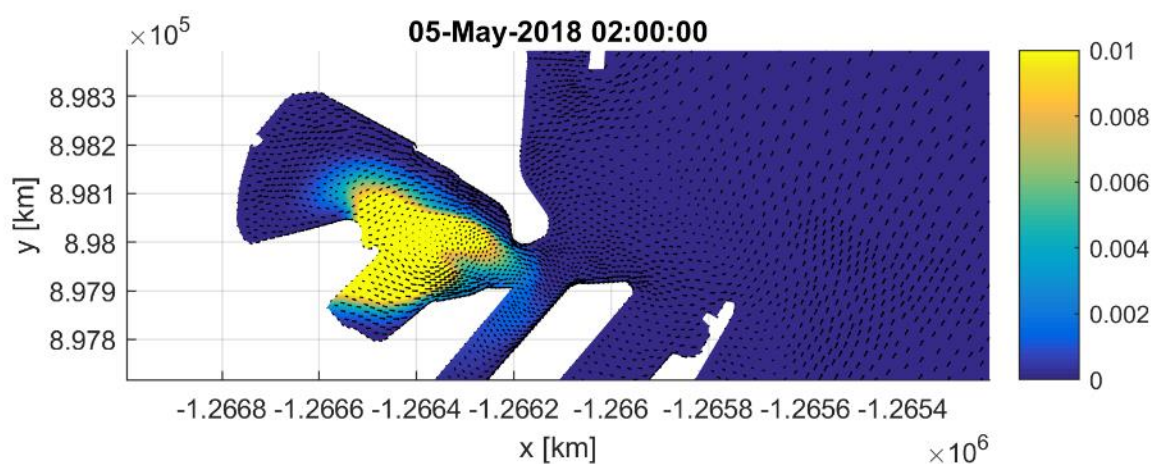
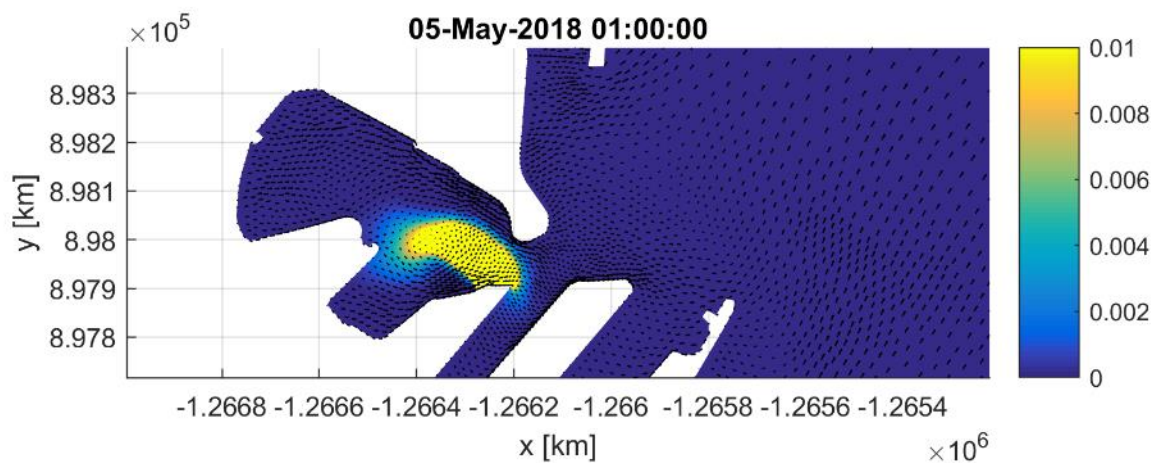
van Rijn (1989). Handbook Sediment transport by currents and waves.

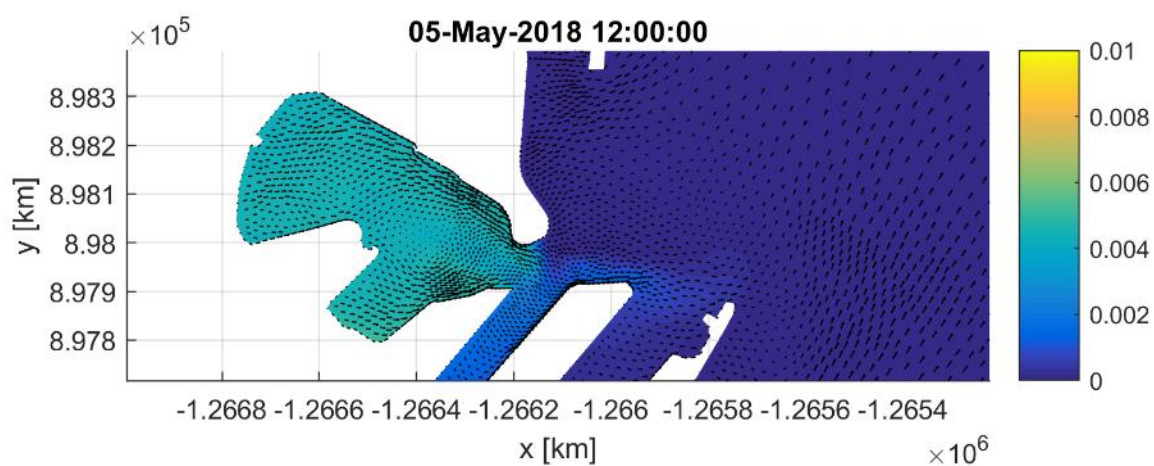
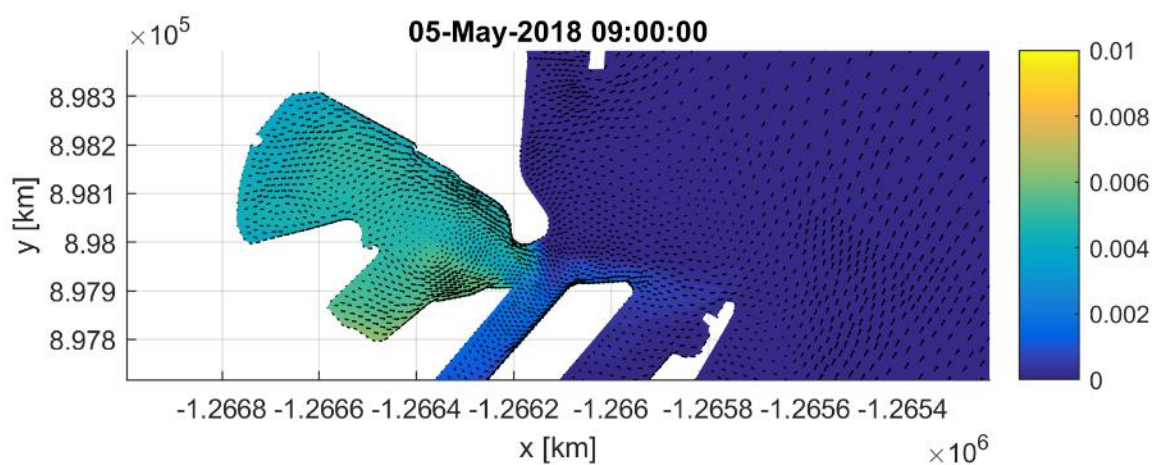
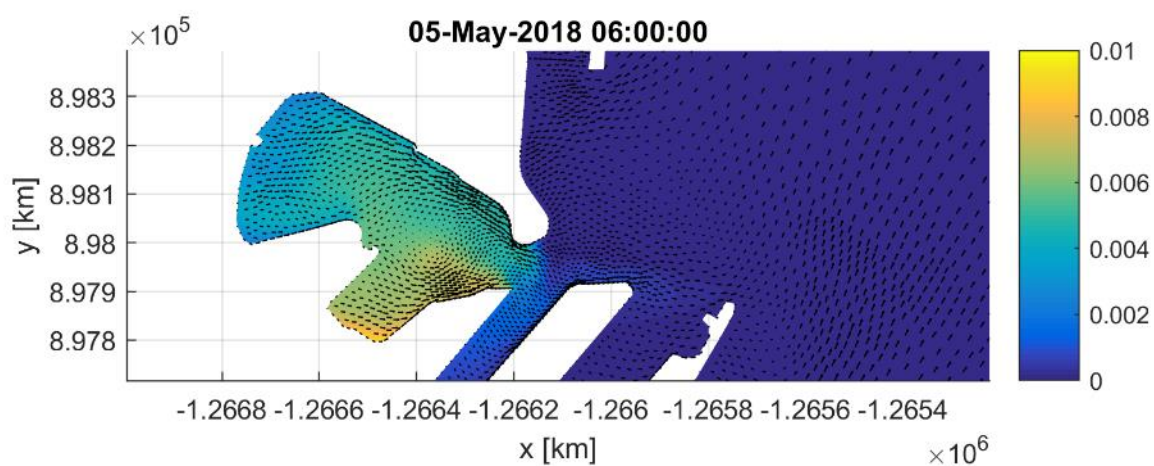
[https://www.meteoblue.com/fr/meteo/archive/export/toulon\\_france\\_2972328](https://www.meteoblue.com/fr/meteo/archive/export/toulon_france_2972328)



## **Annexe A    Résultats position « drague 1 »**

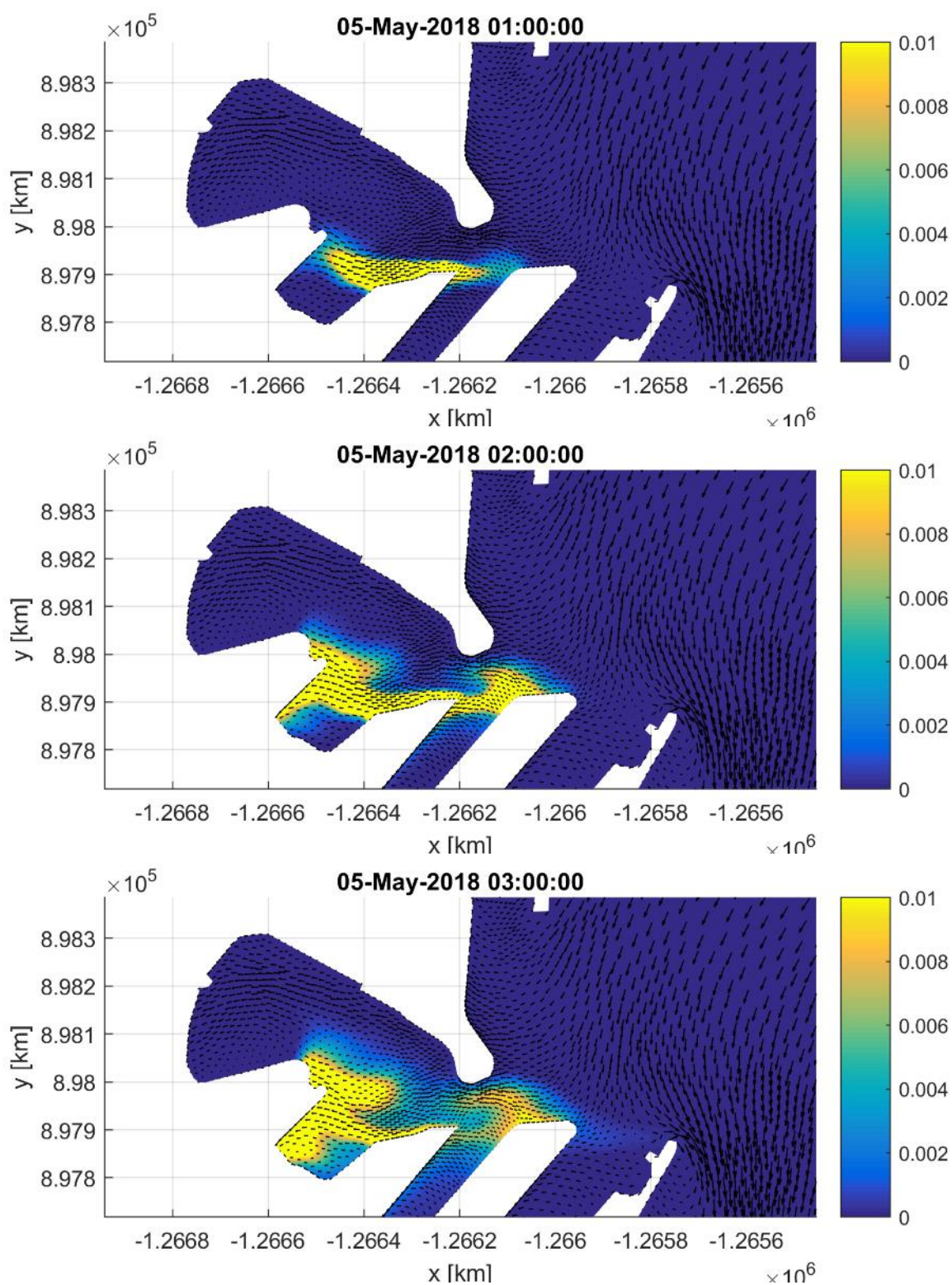
## A.1 Vent d'ouest (vitesse 15 m/s)

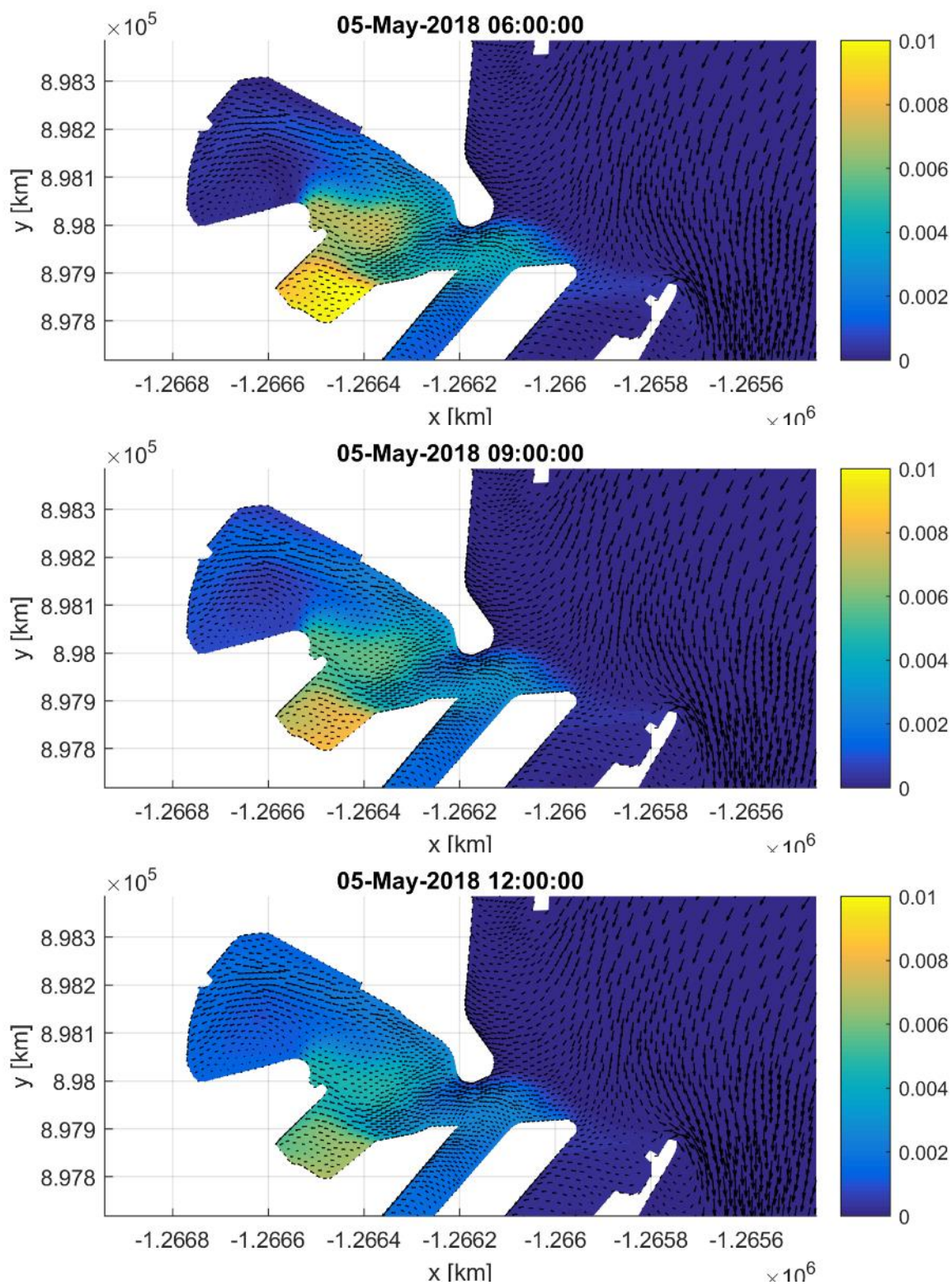




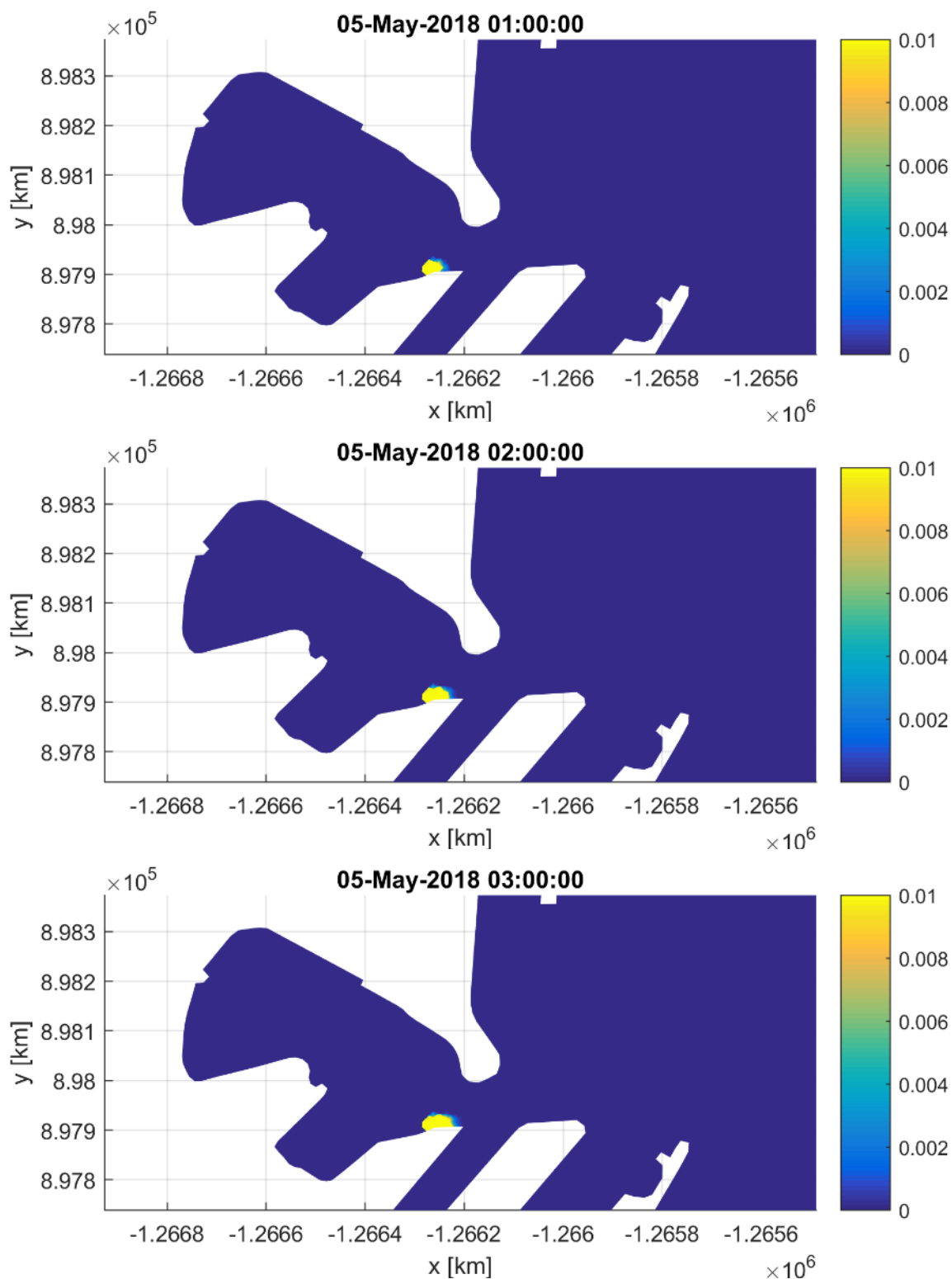


## A.2 Vent d'est (vitesse 15 m/s)

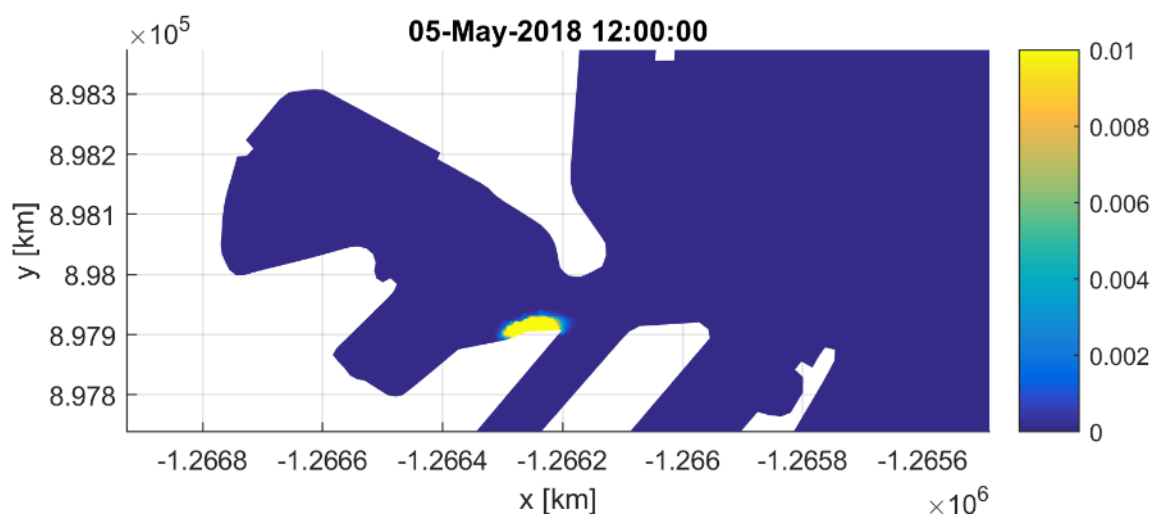
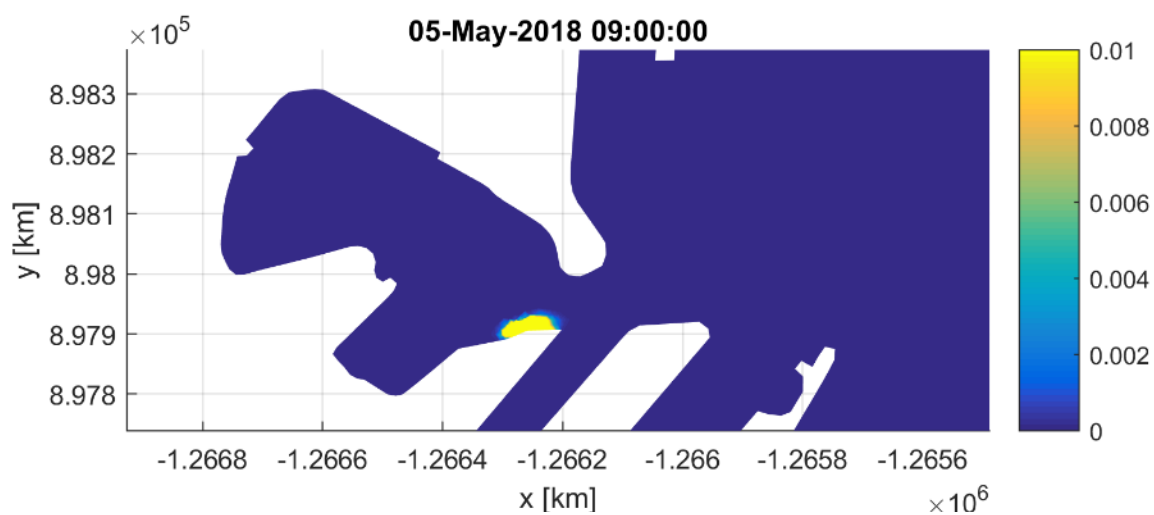
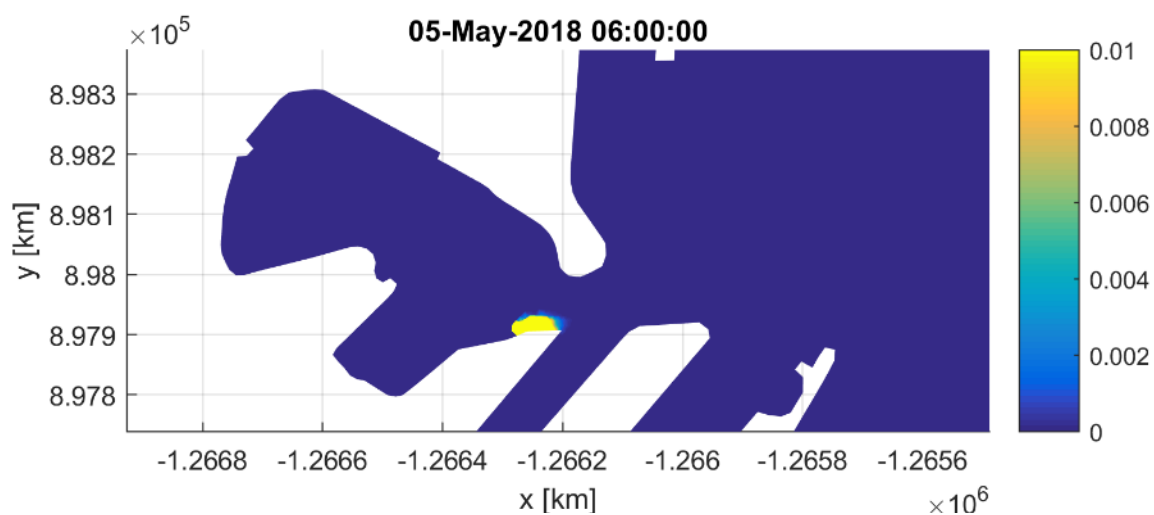




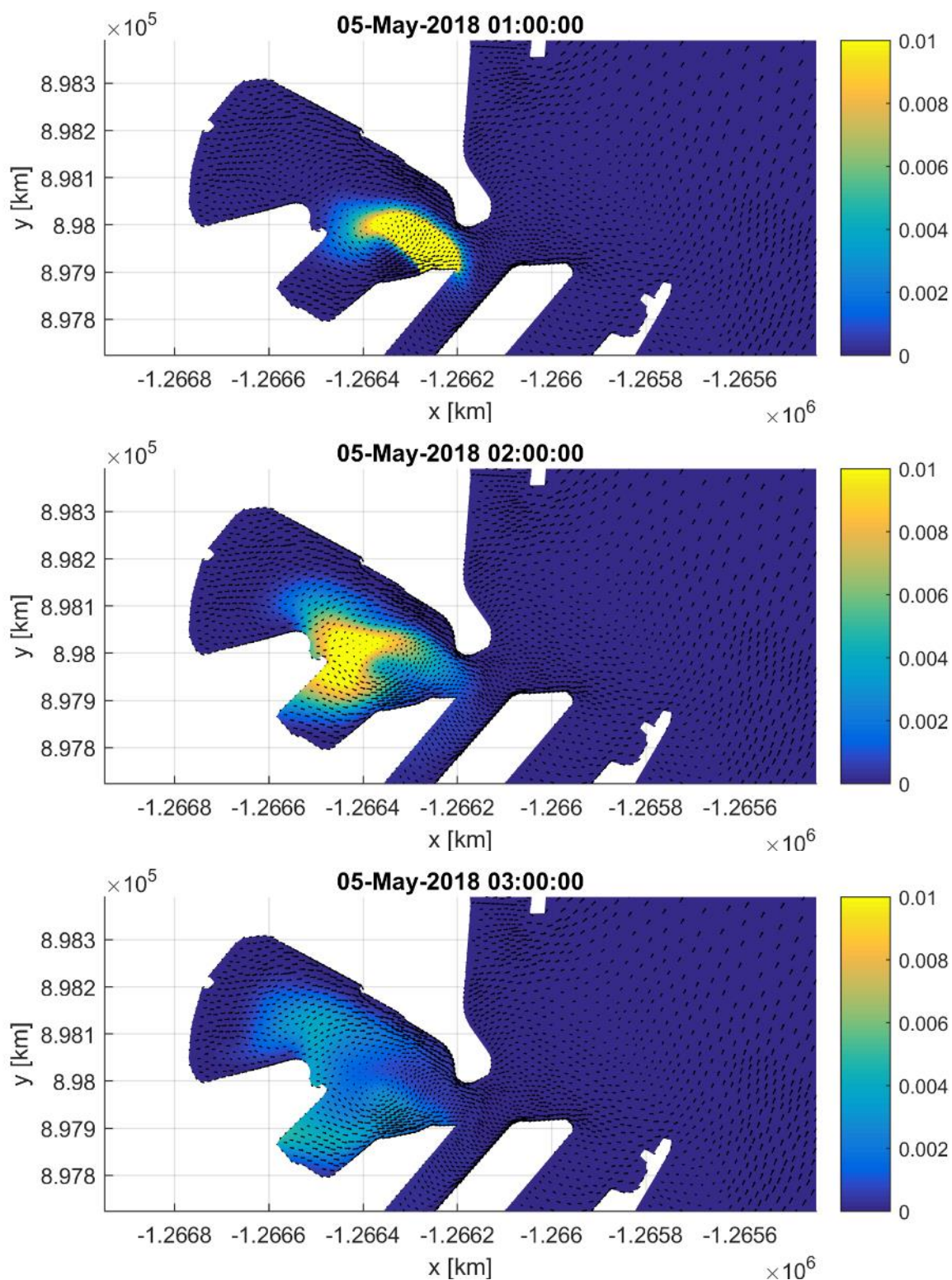
### A.3 Régime en atmosphère calme (vitesse du vent 0)

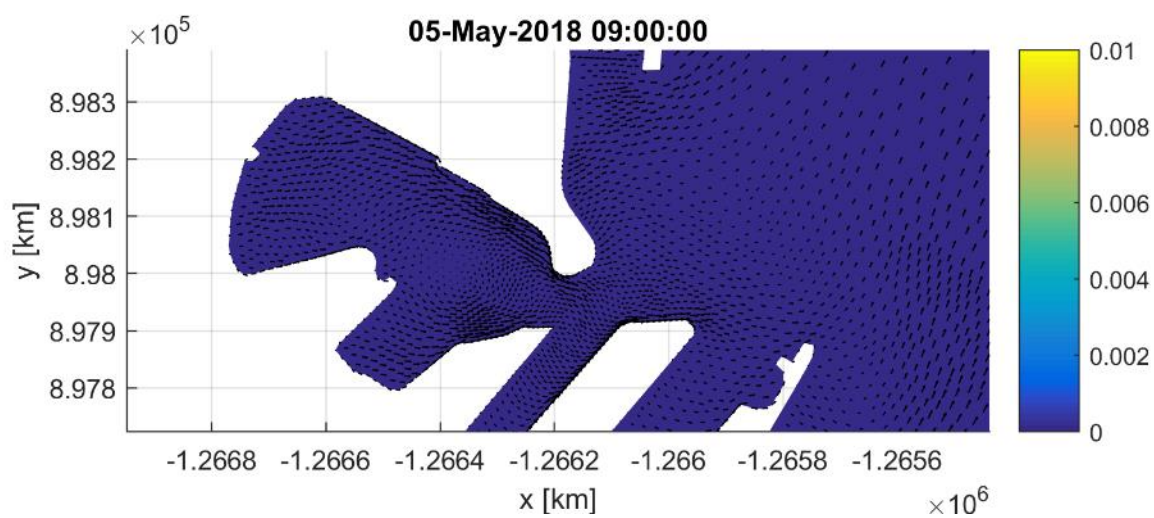
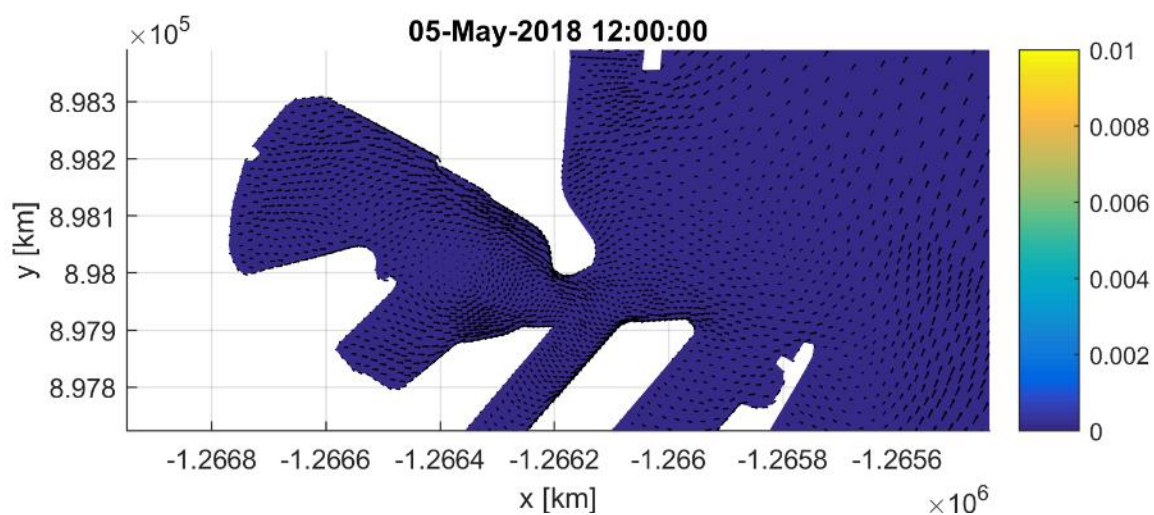
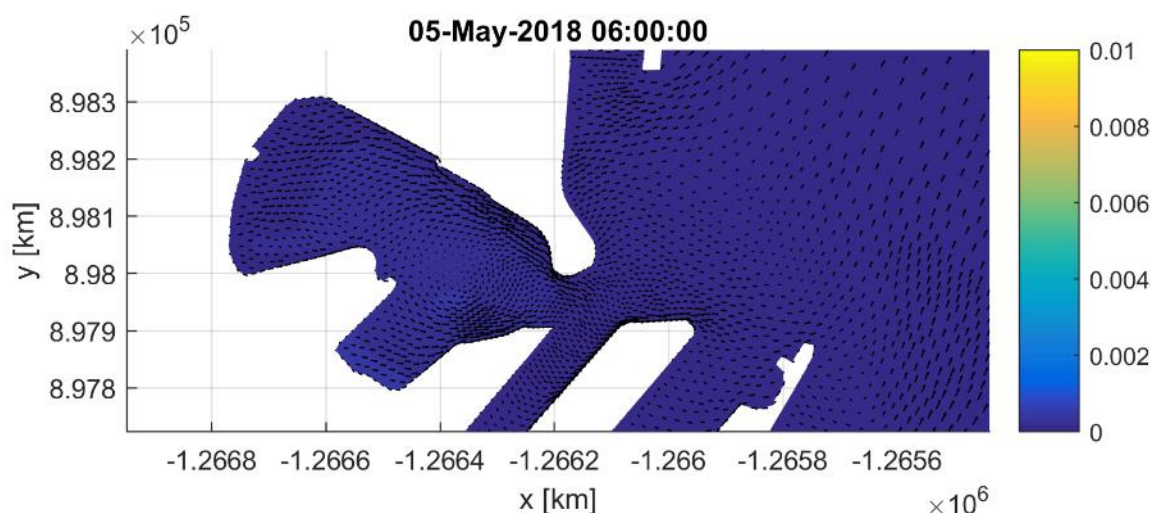






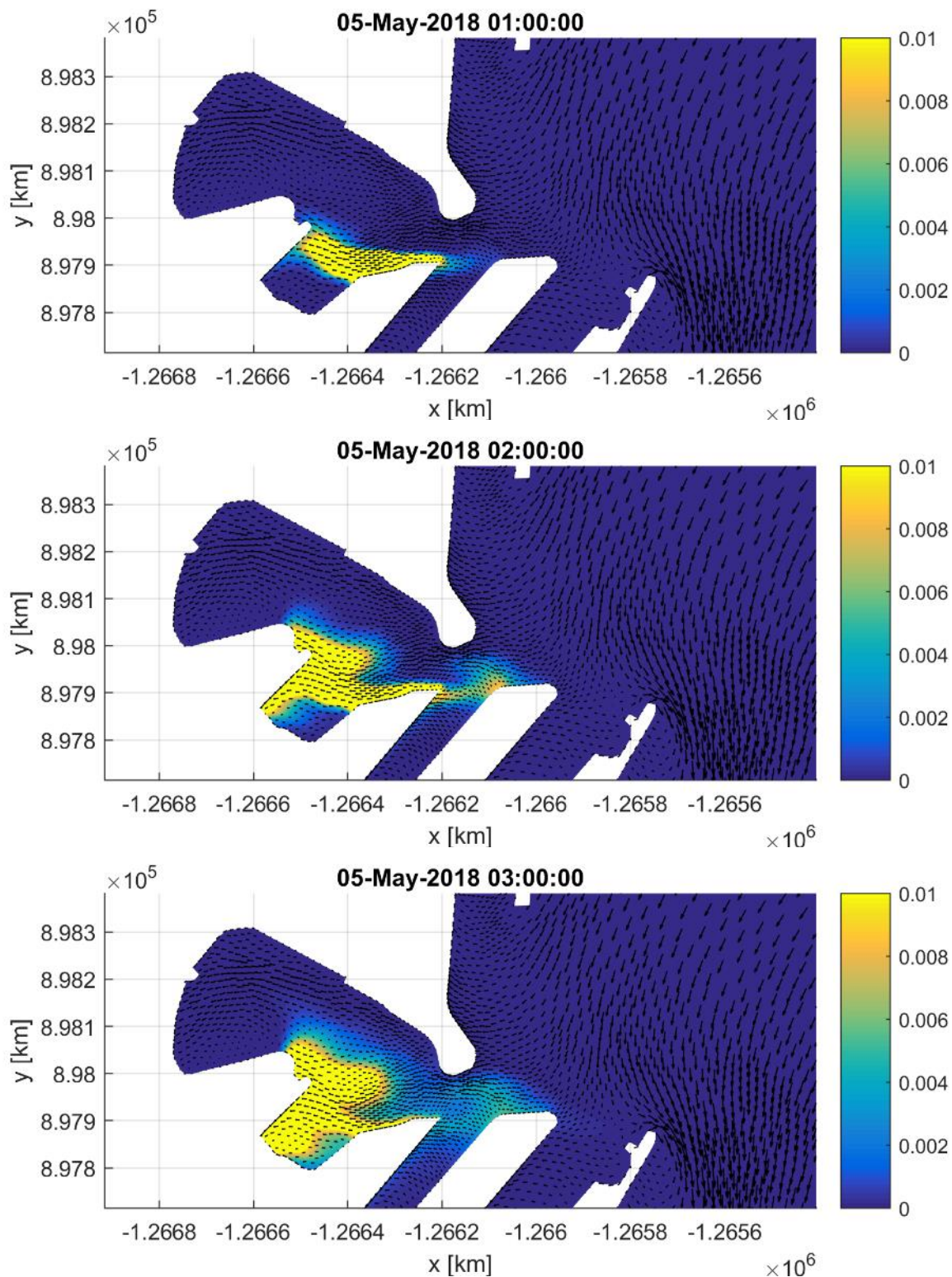
## A.4 Vent d'ouest (vitesse 15 m/s) avec vitesse de sédimentation de 0.001 m/s

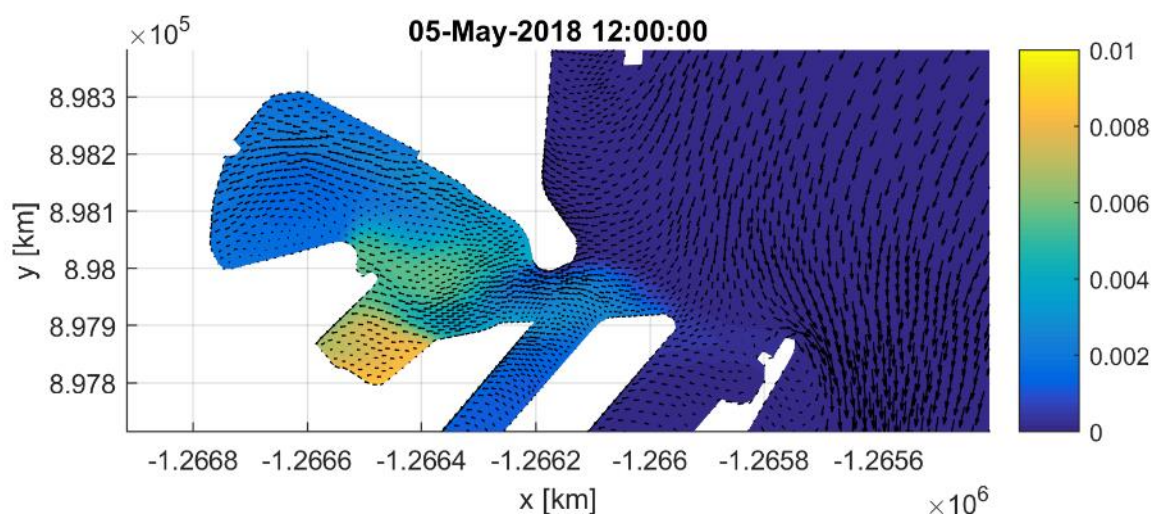
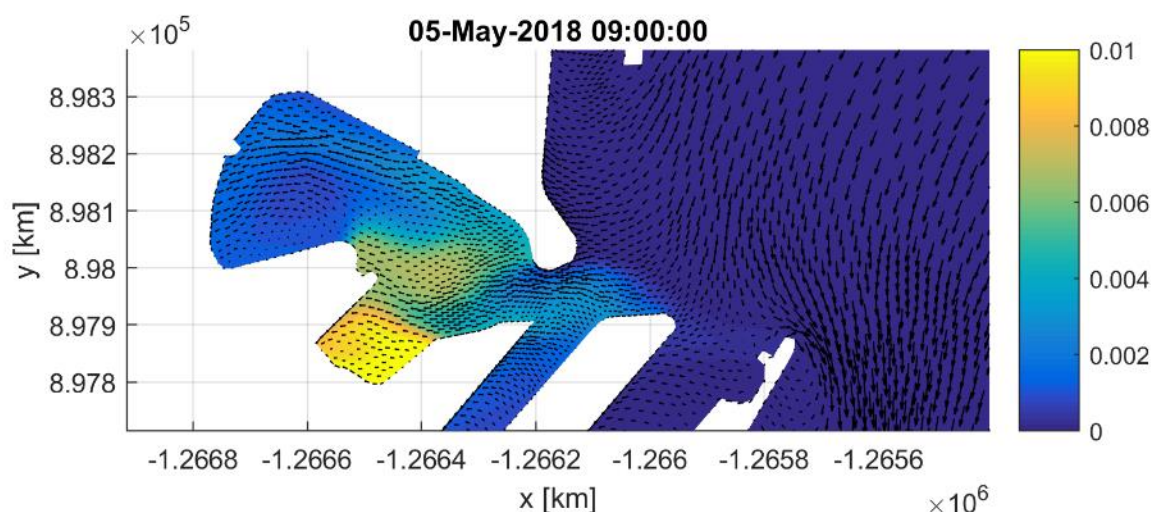
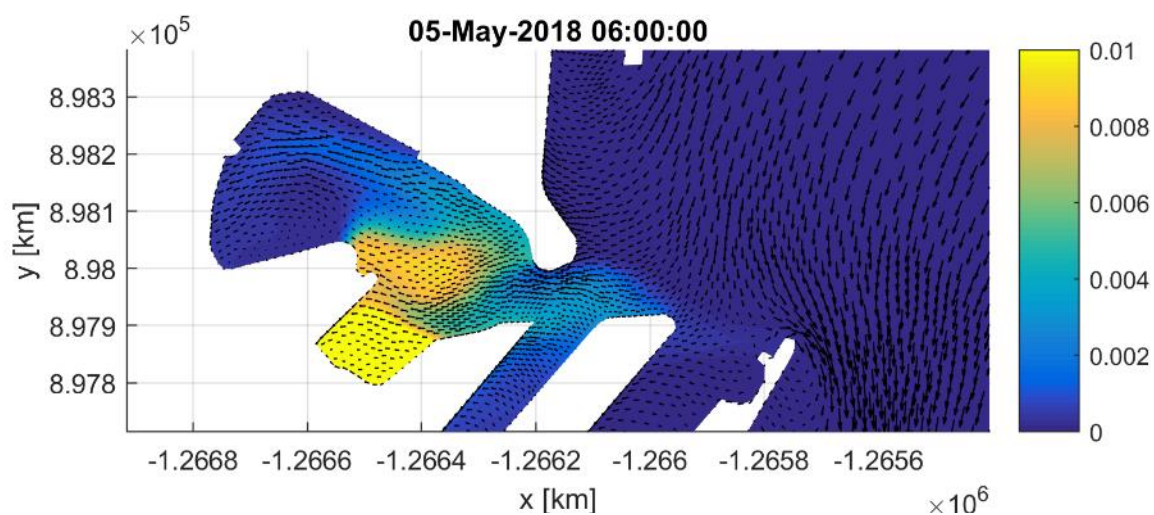






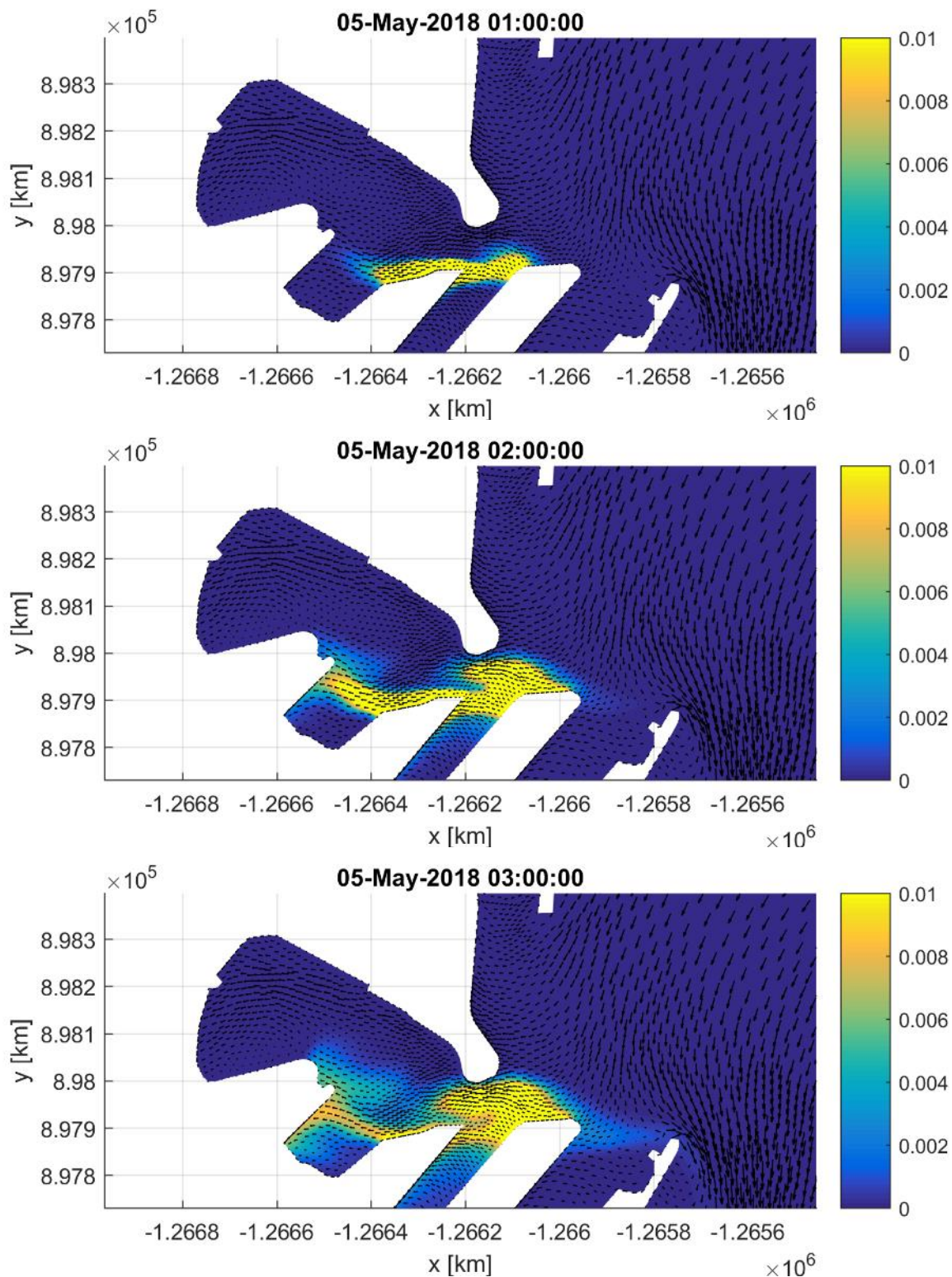
## A.5 Vent d'est (vitesse 15 m/s) avec panache venant du fond marin

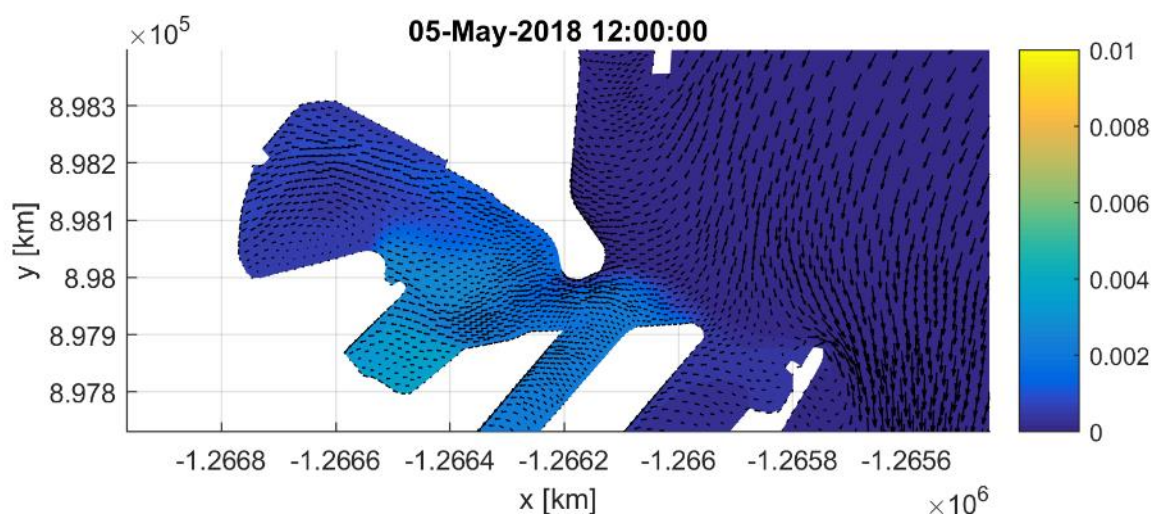
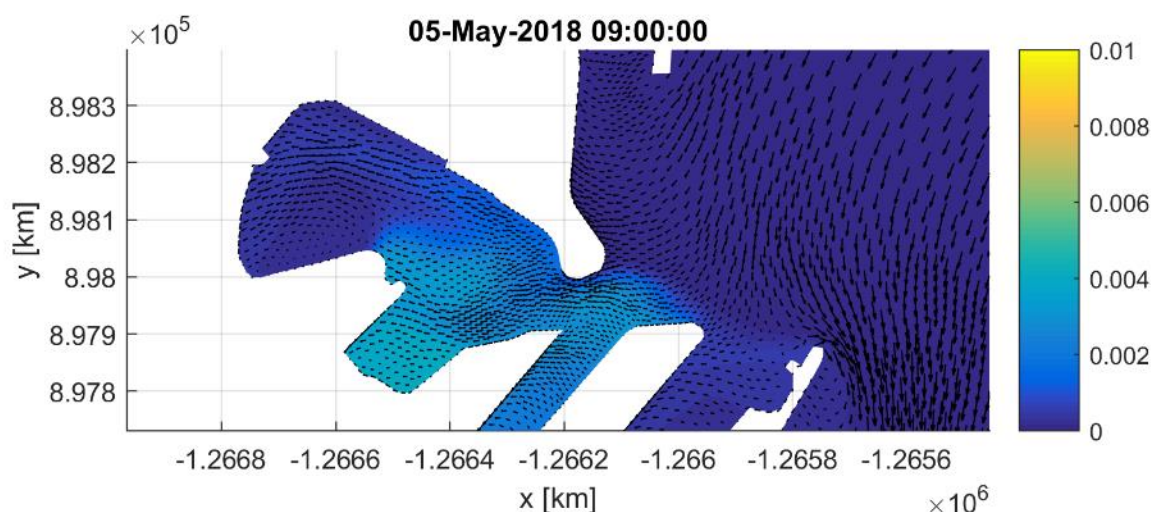
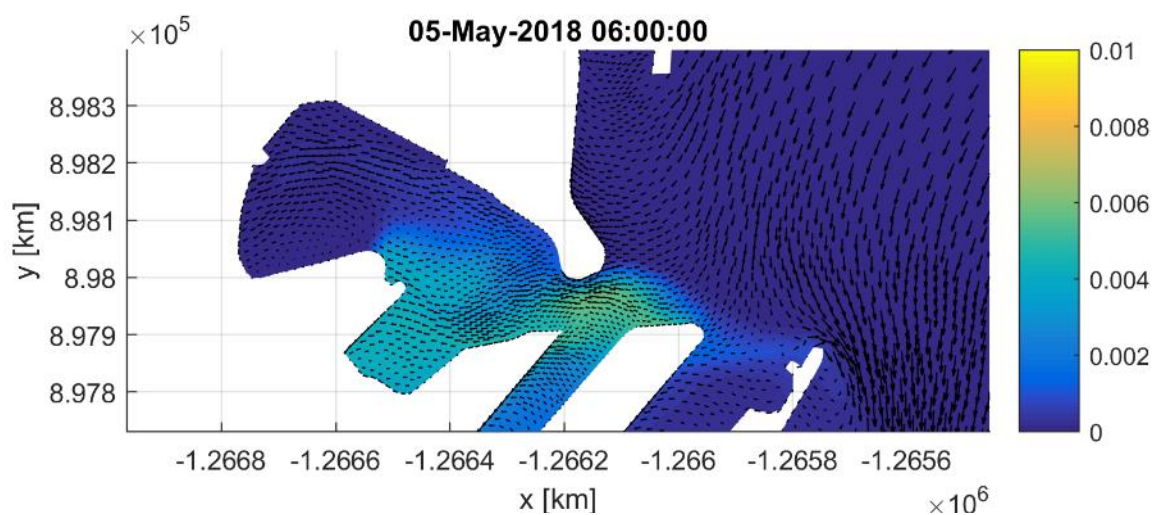






## A.6 Vent d'est (vitesse 15 m/s) avec panache venant de la surface



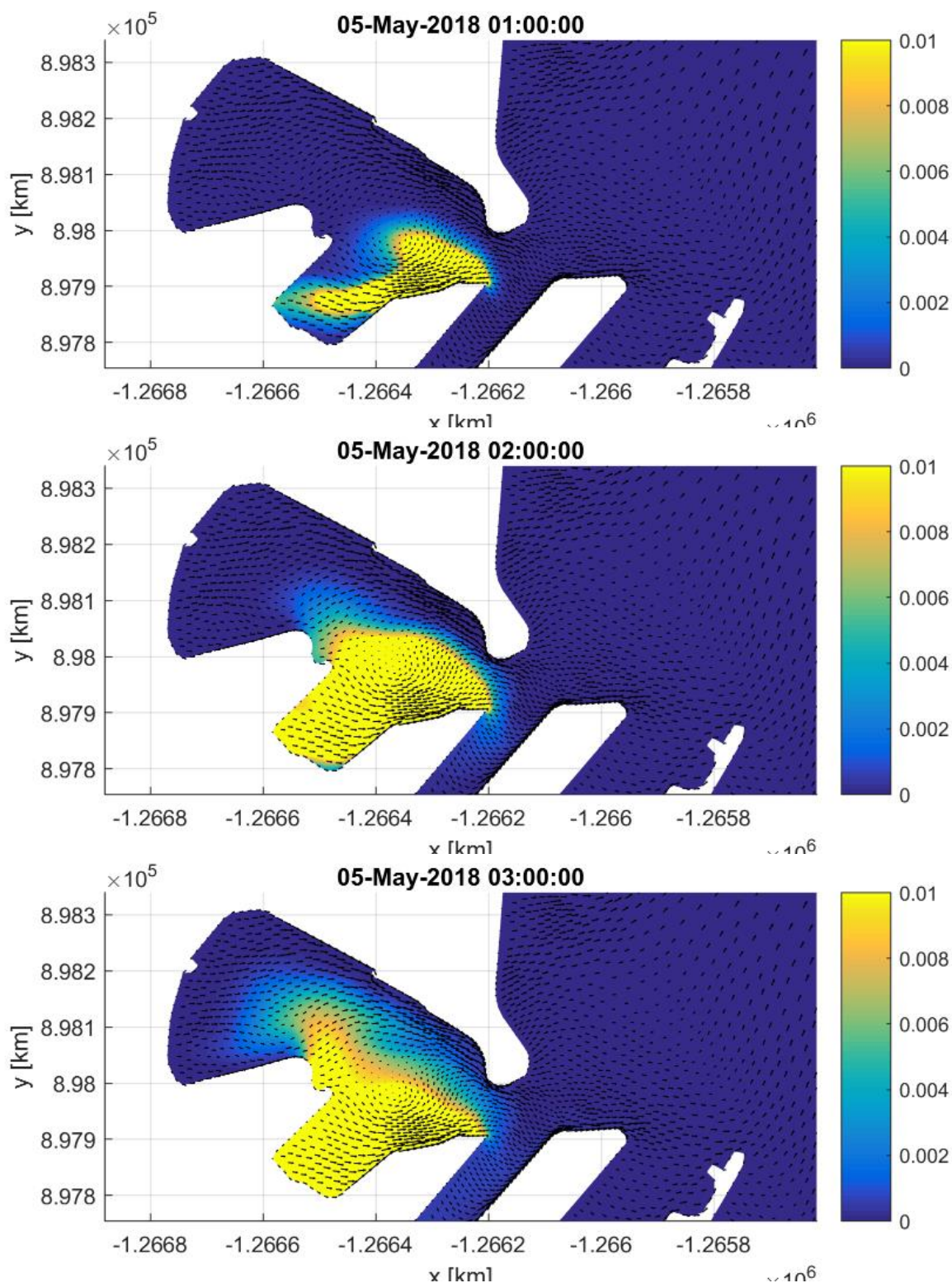


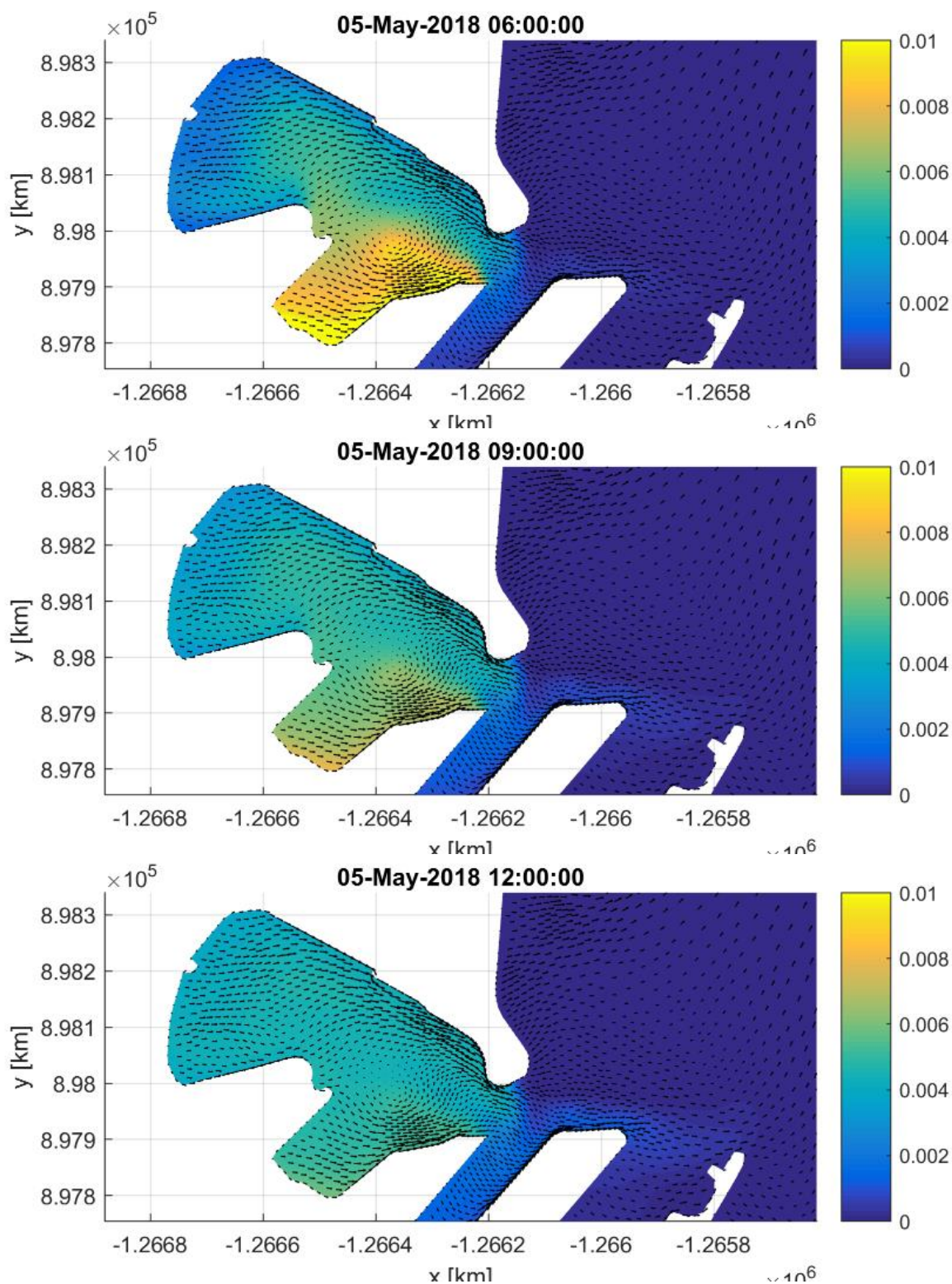




## **Annexe B    Résultats position « drague 2 »**

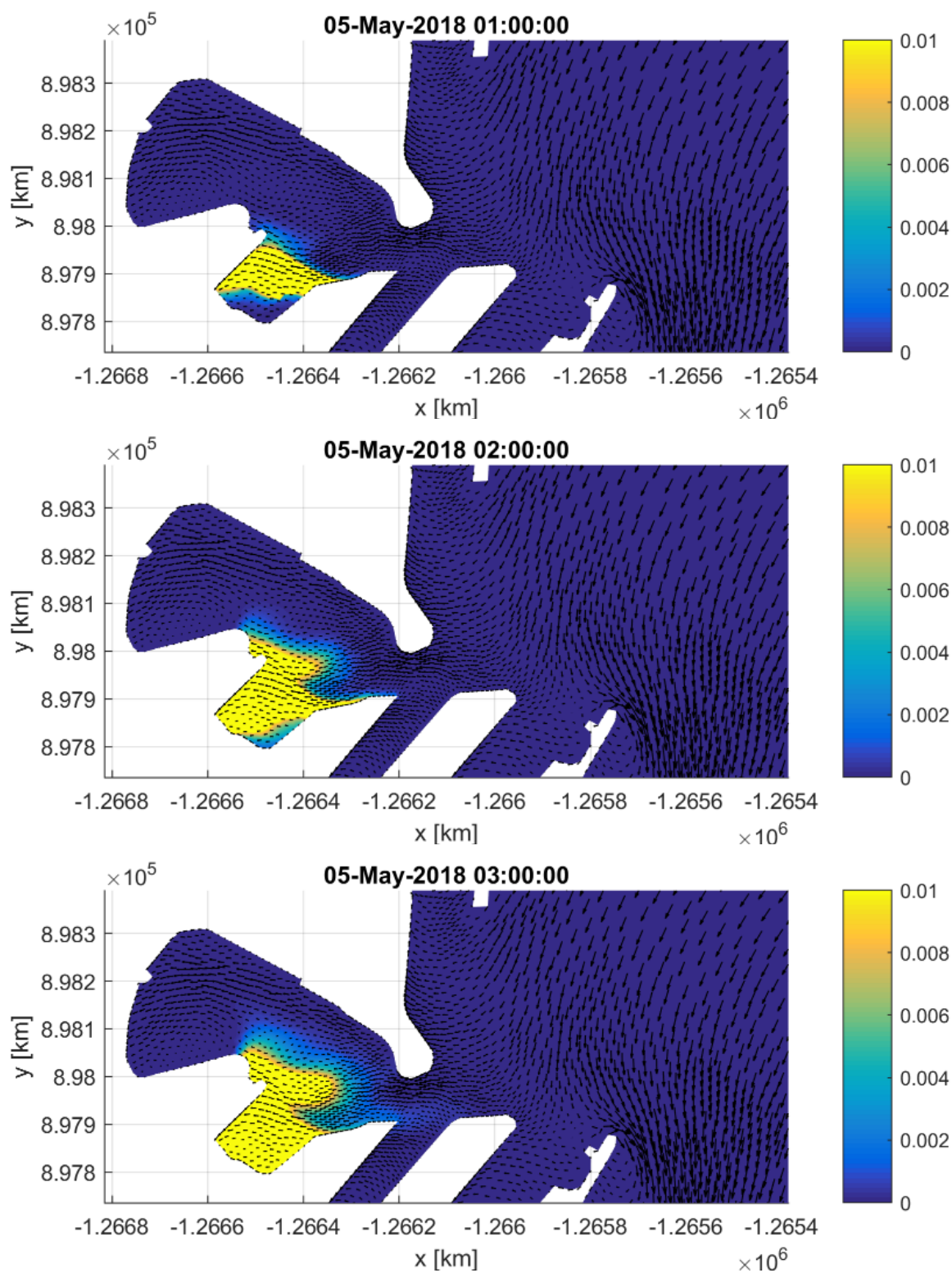
## B.1 Vent d'ouest (vitesse 15 m/s)

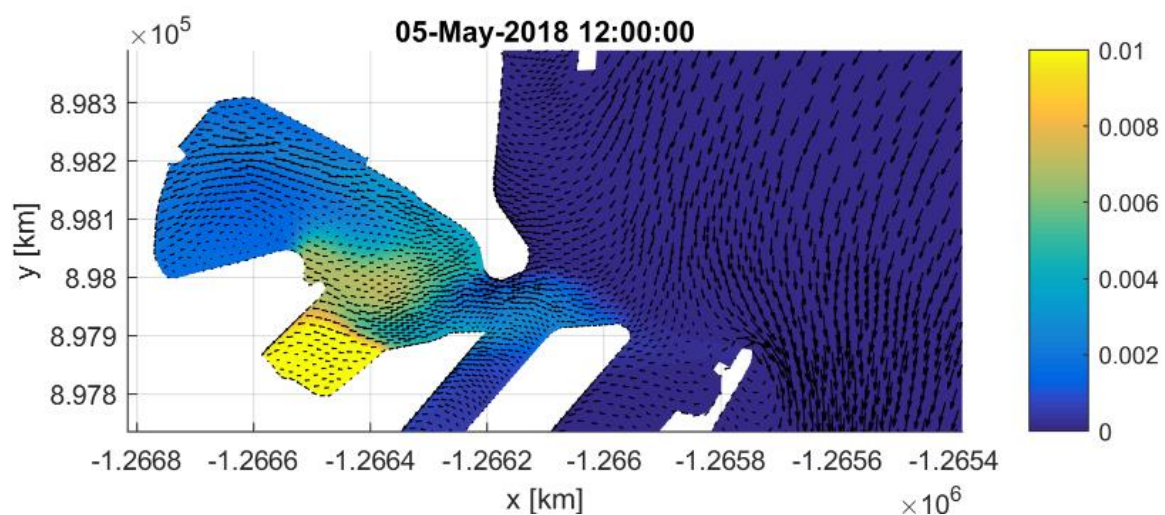
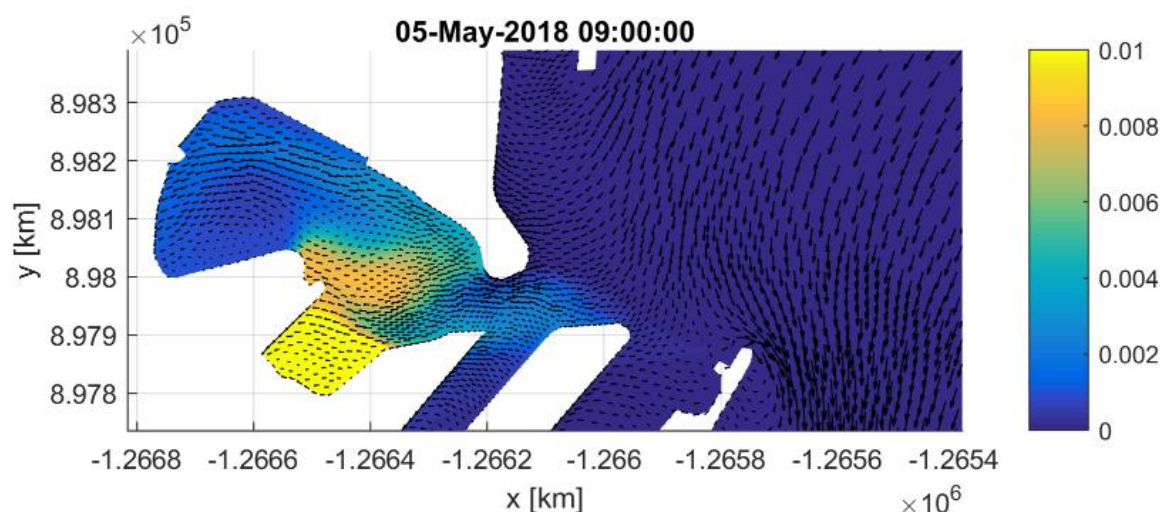
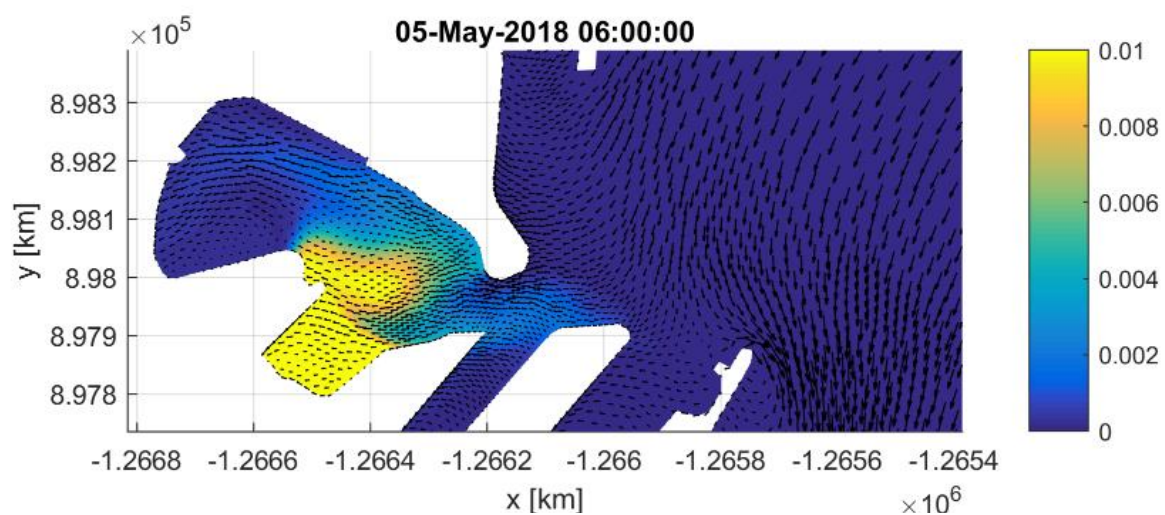




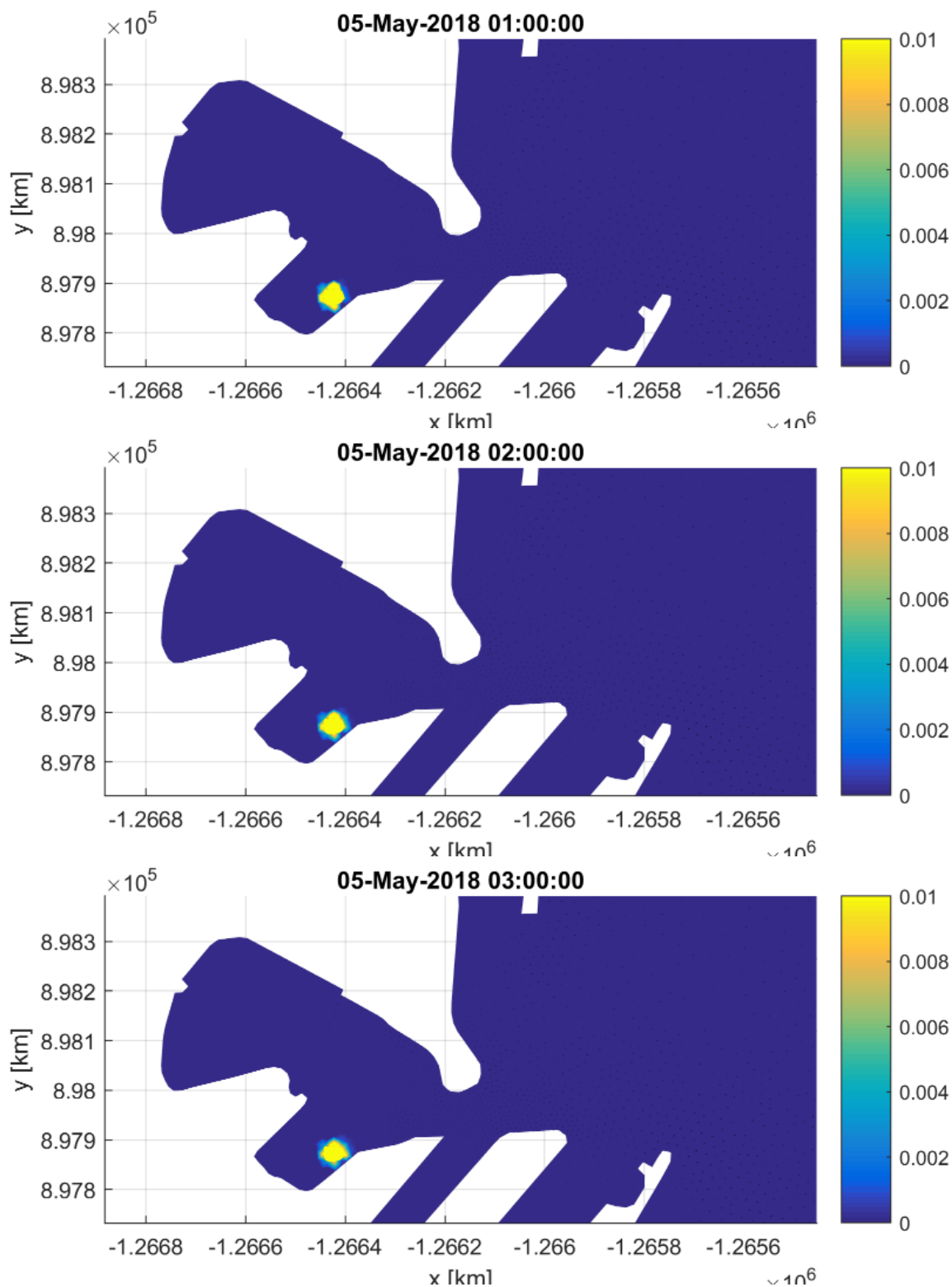


## B.2 Vent d'est (15 m/s)

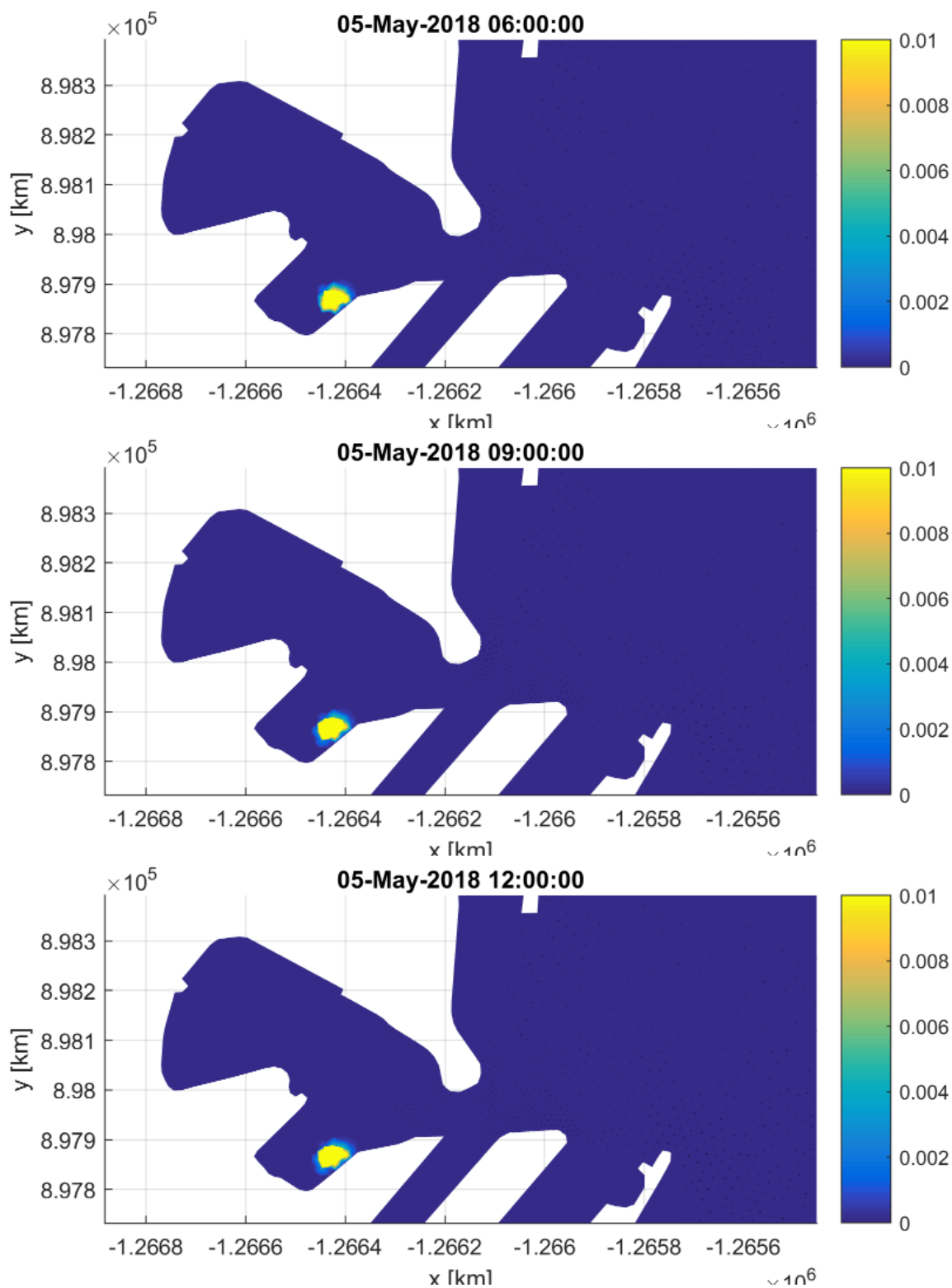




### B.3 Régime en atmosphère calme (vitesse du vent 0)



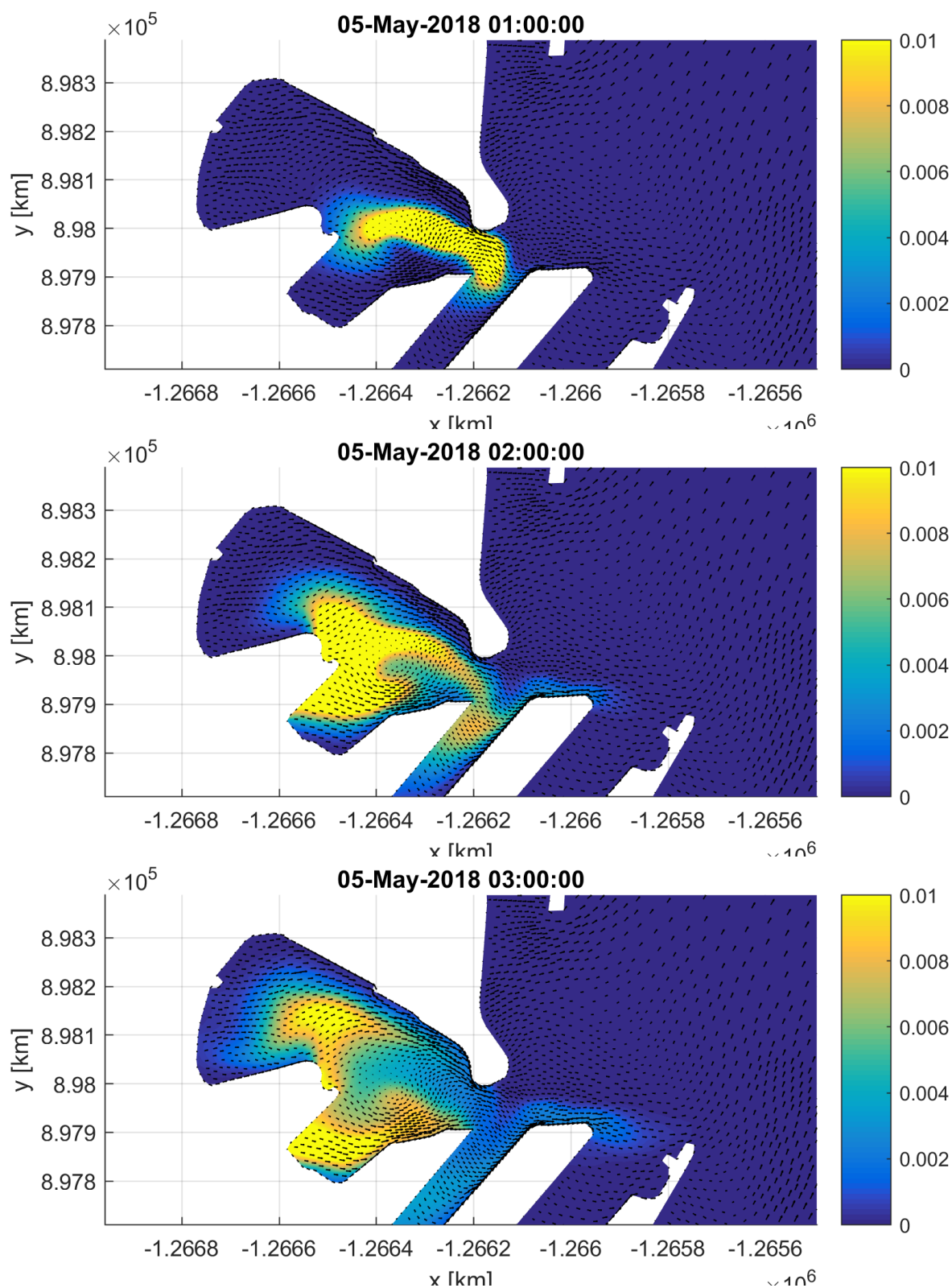


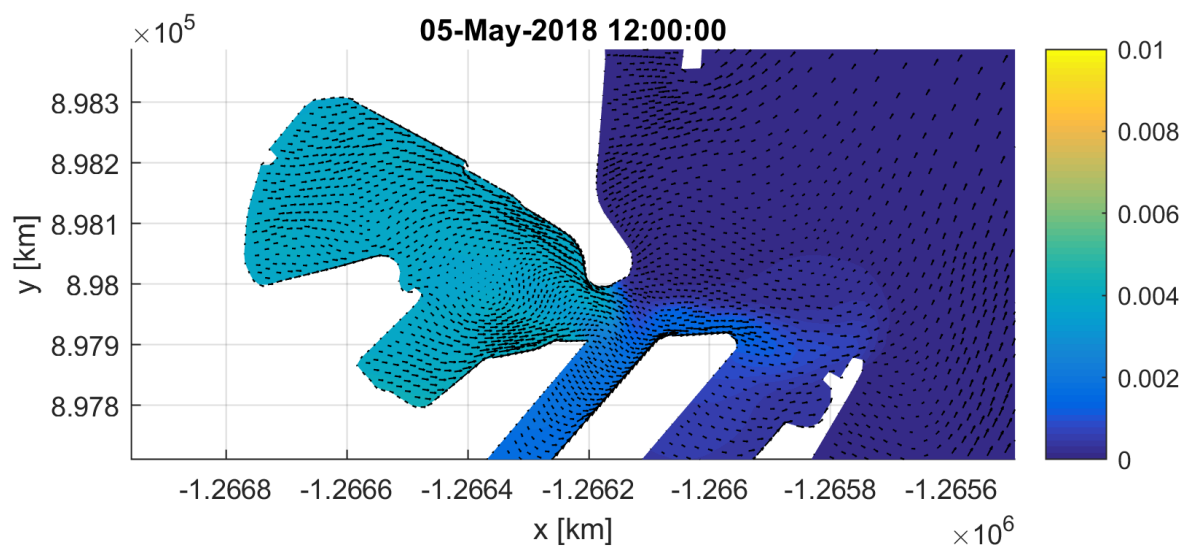
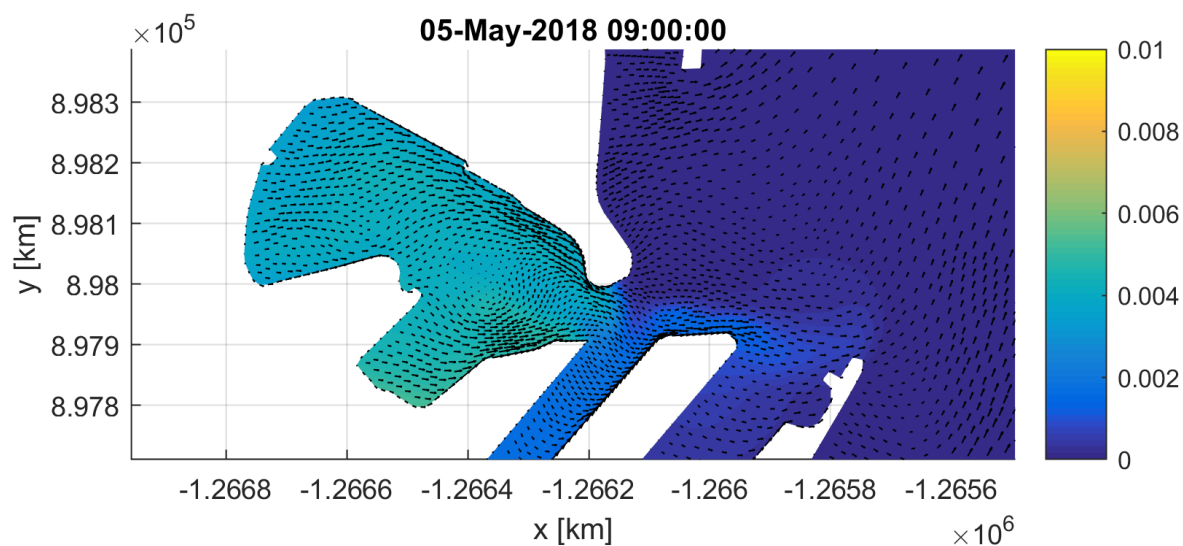
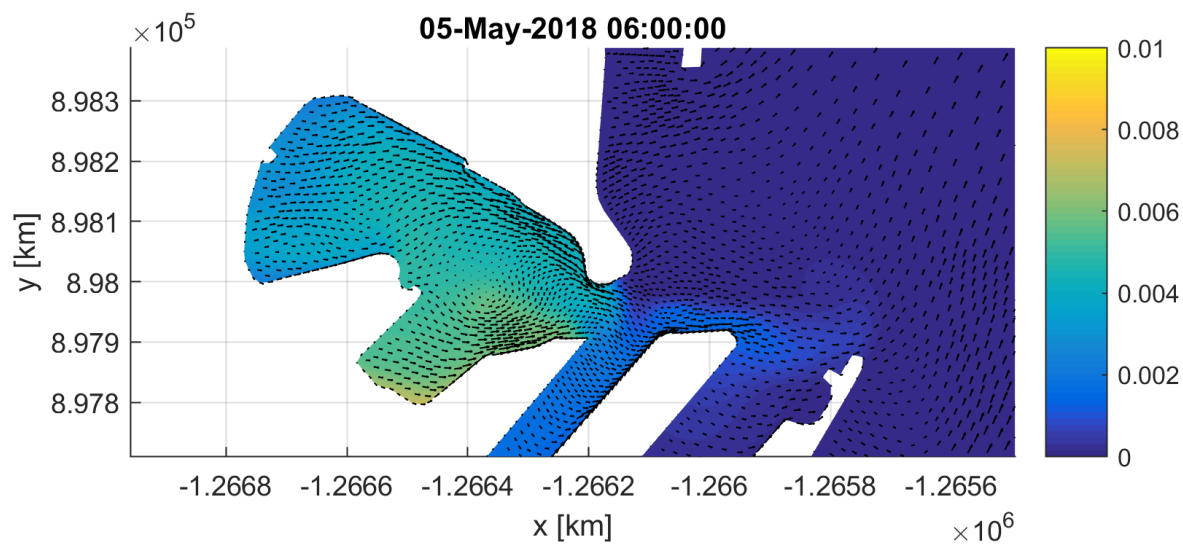




## **Annexe C    Résultats position « drague 3 »**

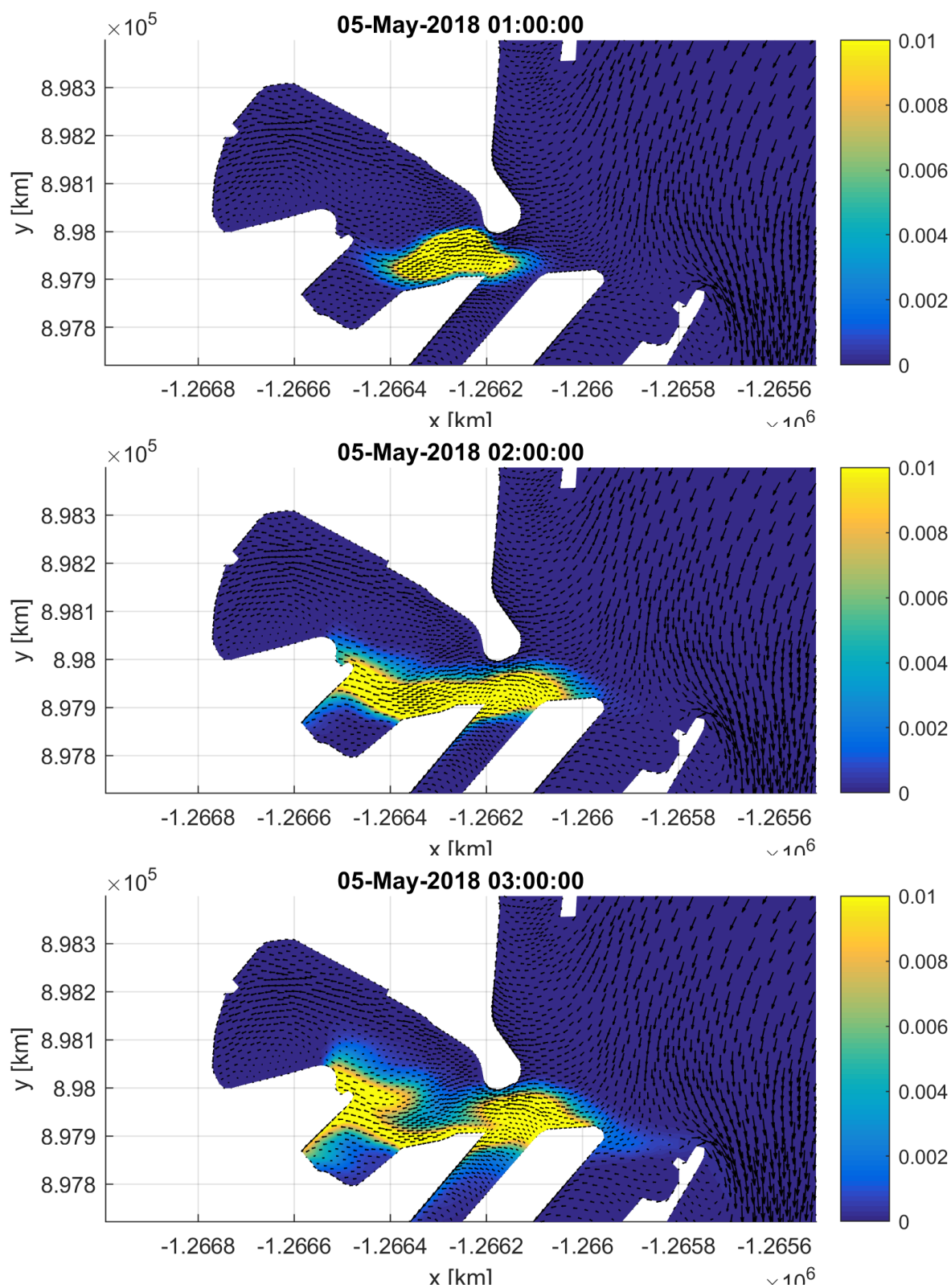
## C.1 Vent d'ouest (vitesse 15 m/s)

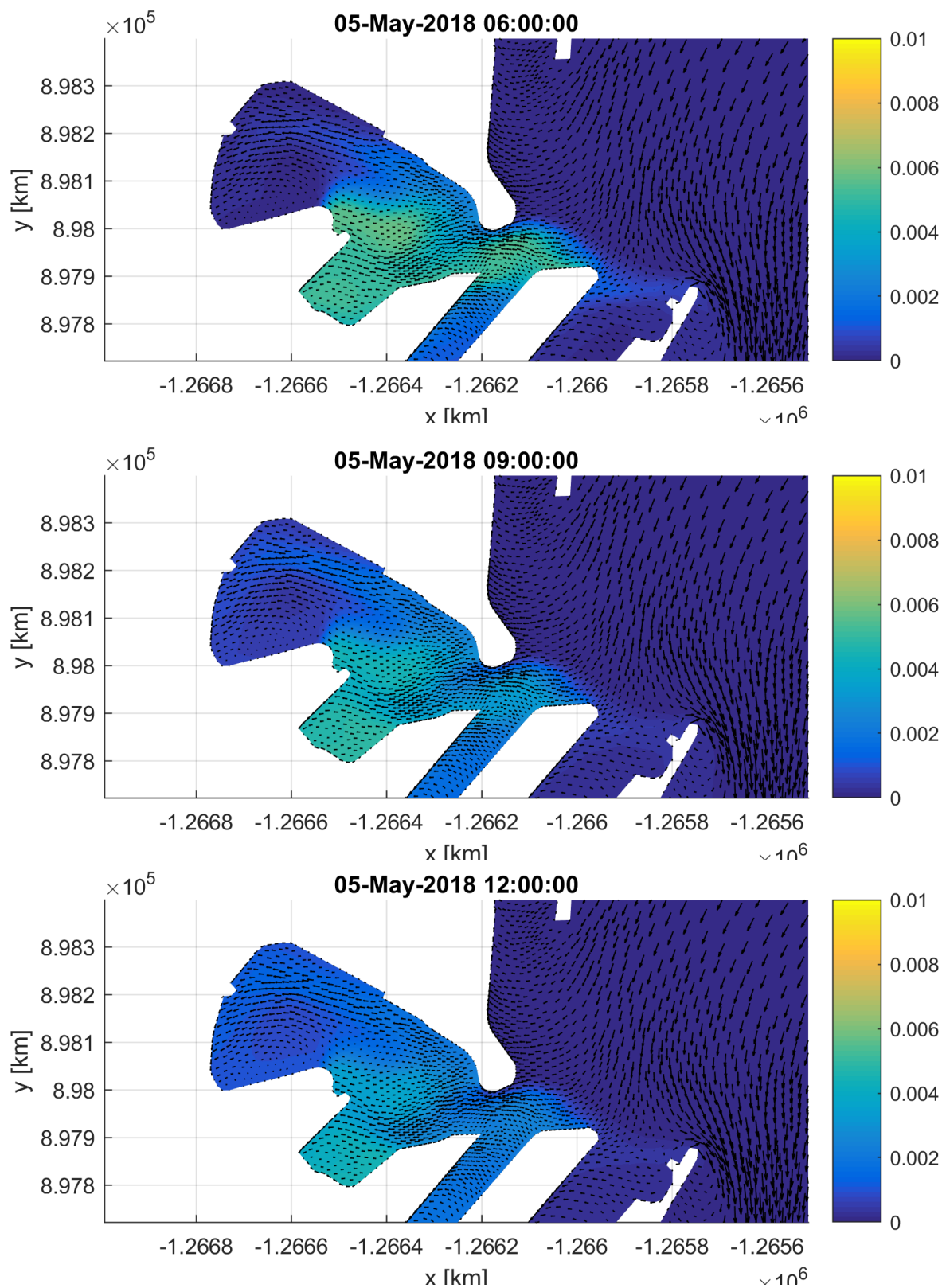




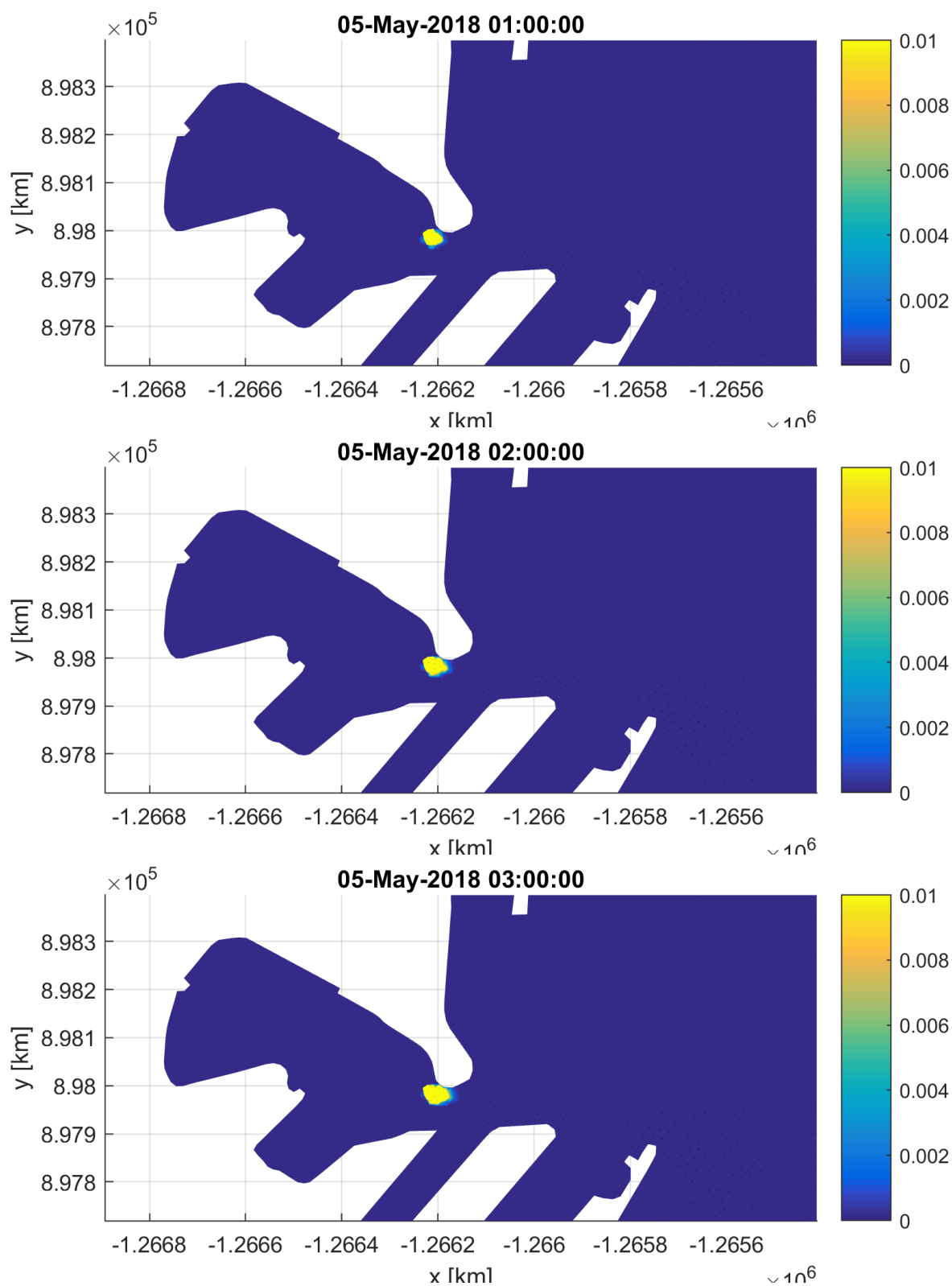


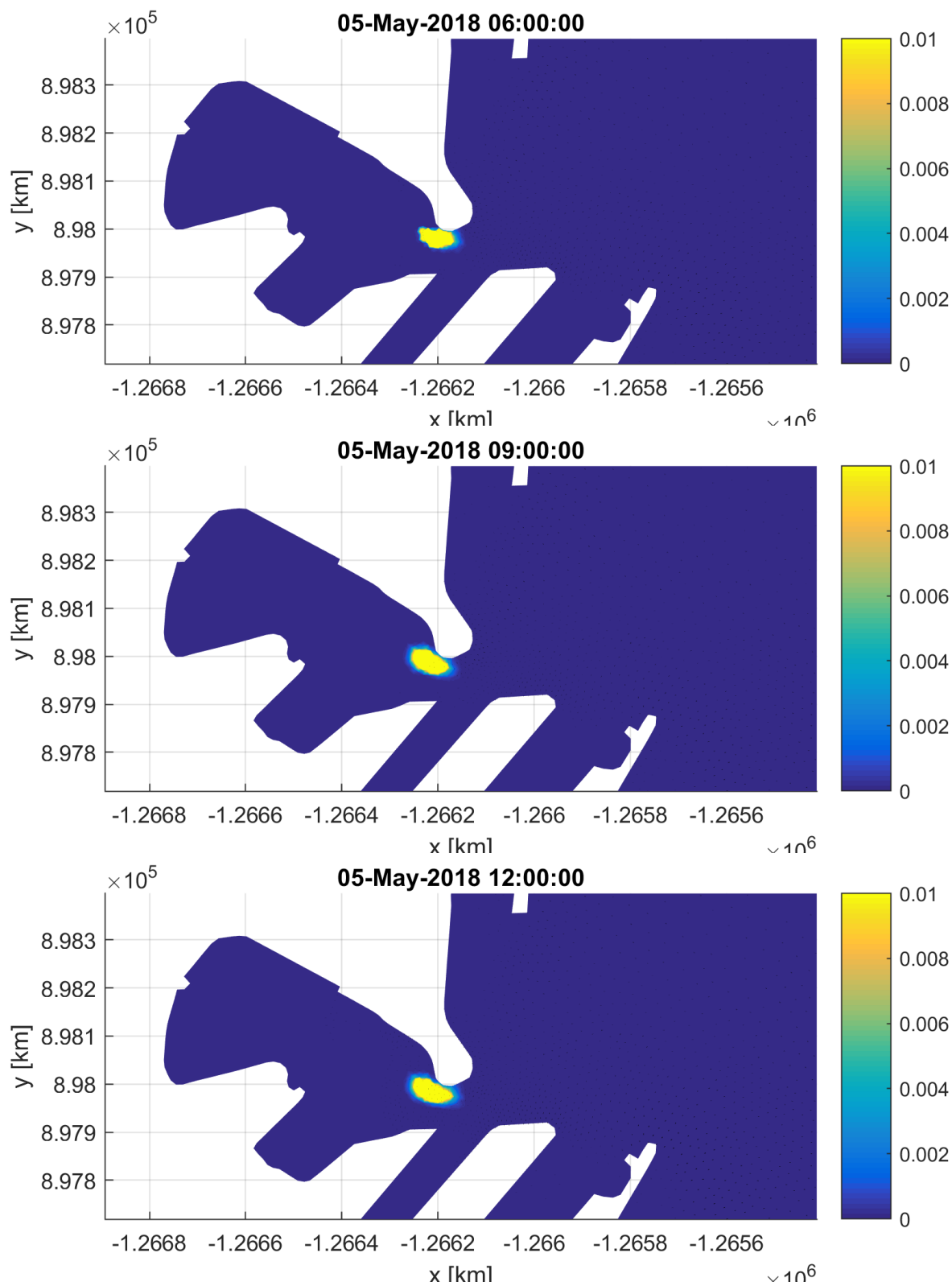
## C.2 Vent d'est (15 m/s)





### C.3 Atmosphère calme (vitesse du vent 0 m/s)









## **Annexe D    Simulation du panache turbide en régime de travaux**

## D.1 Position de la drague D1

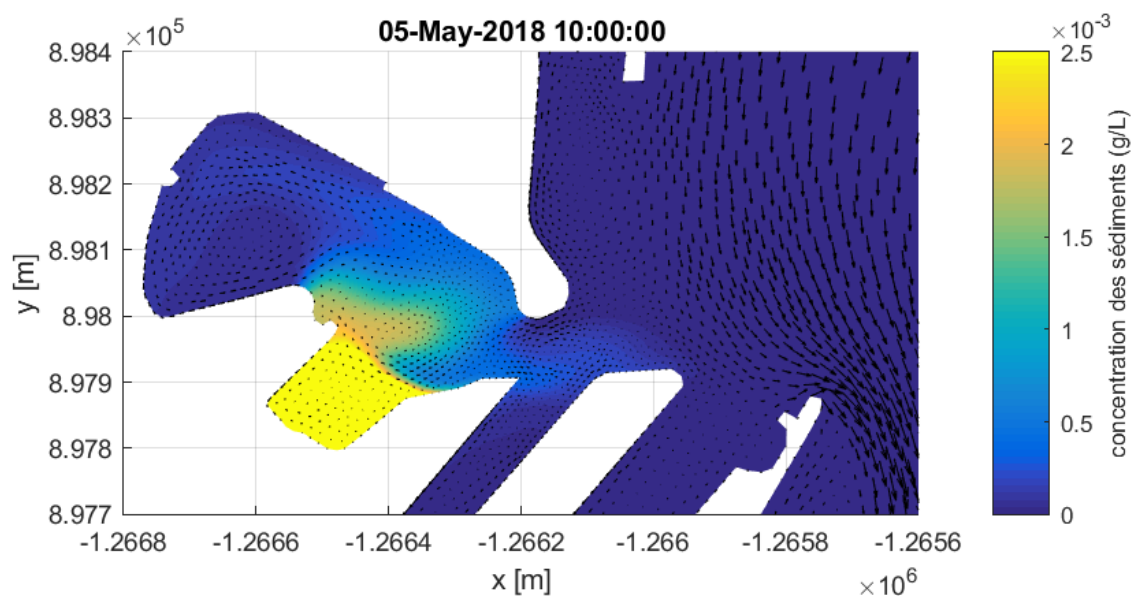


Figure Annexe D-1: Position de la drague 1 - benne environnemental sans écran anti-MES  
-concentration en MES [g/l] à la fin de travaux

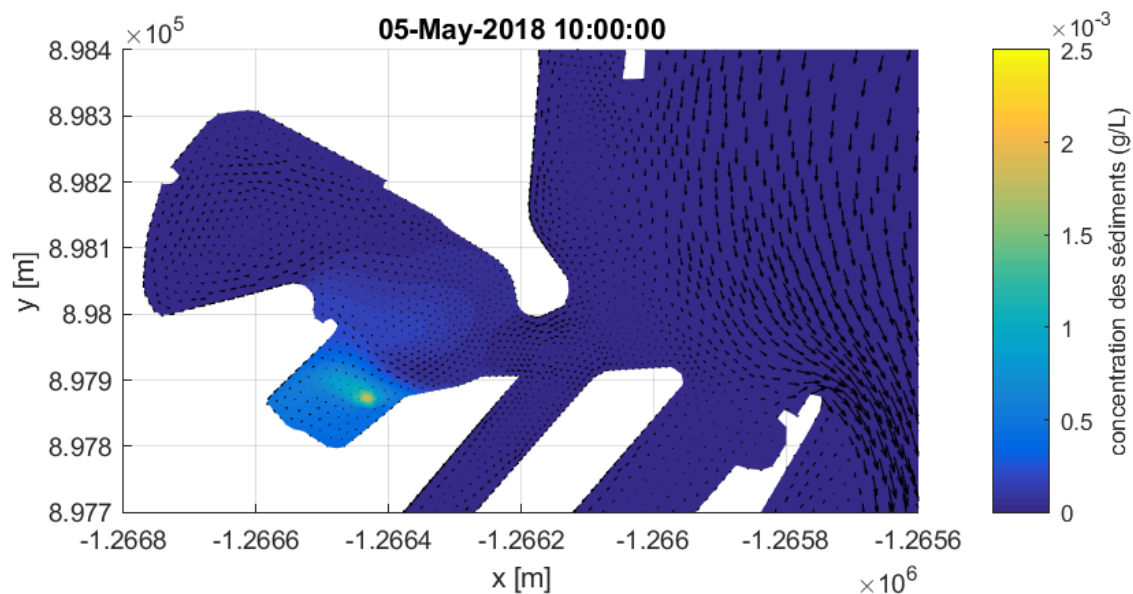


Figure Annexe D-2: Position de la drague 1 - benne environnemental avec écran anti-MES  
-concentration en MES [g/l] à la fin de travaux

## D.2 Position de la drague D2

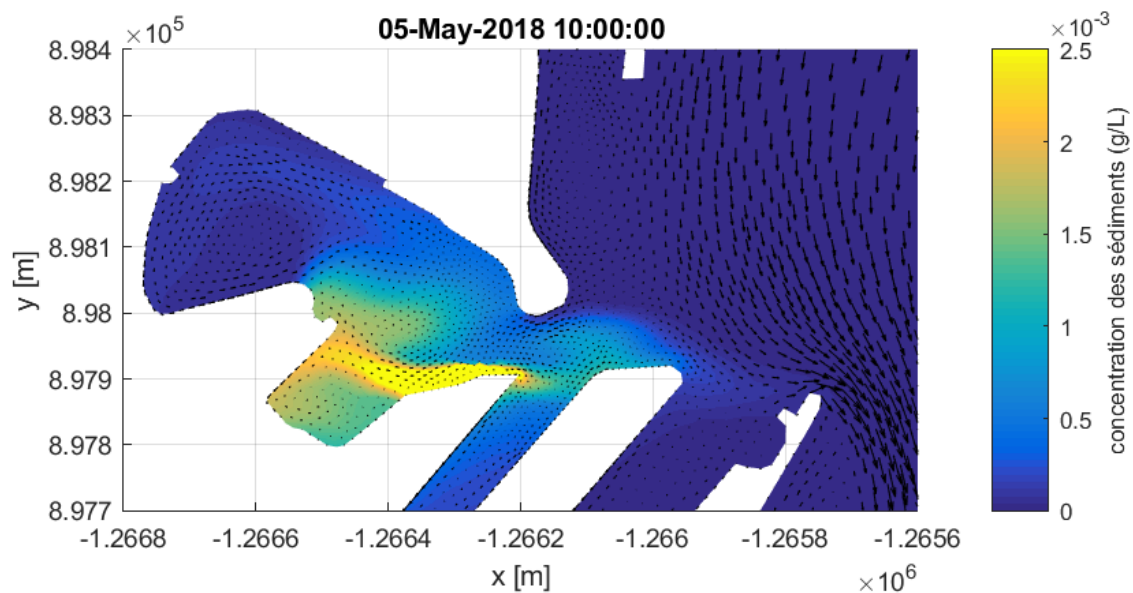


Figure Annexe D-3 : Position de la drague 2 - benne environnemental sans écran anti-MES  
-concentration en MES [g/l] à la fin de travaux

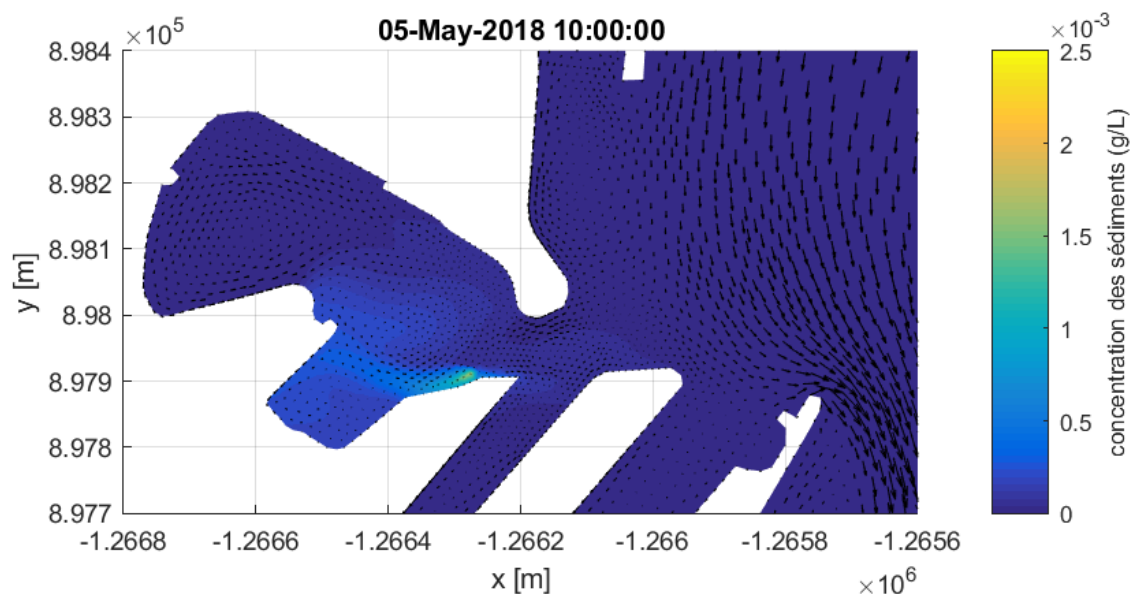


Figure Annexe D-4: Position de la drague 2 - benne environnemental avec écran anti-MES  
-concentration en MES [g/l] à la fin de travaux

### D.3 Position de la drague D3

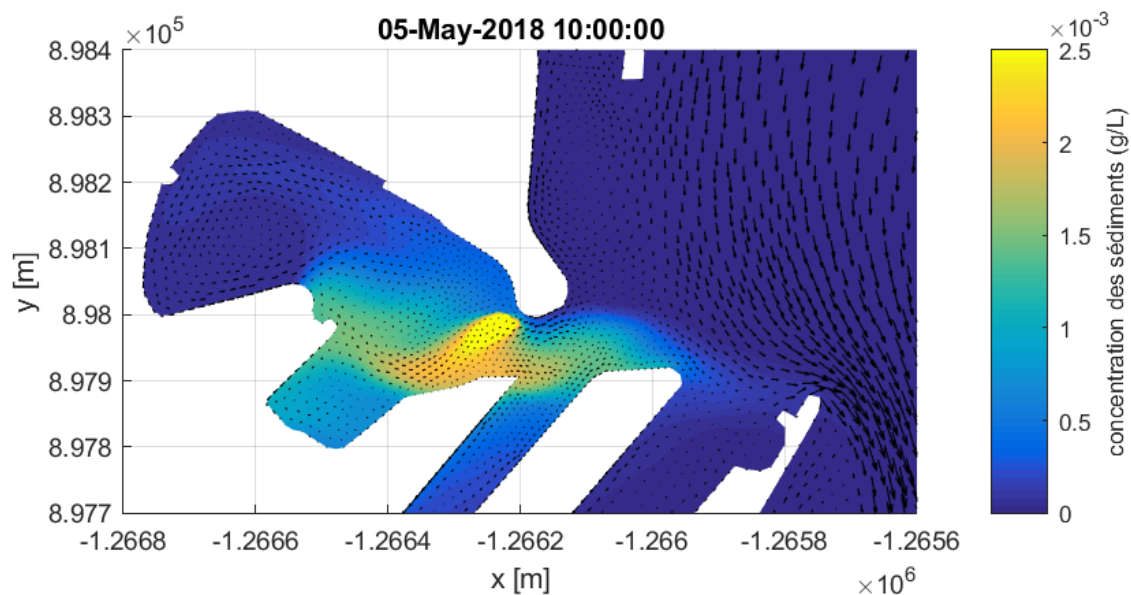


Figure Annexe D-5: Position de la drague 3 - benne environnemental sans écran anti-MES  
-concentration en MES [g/l] à la fin de travaux

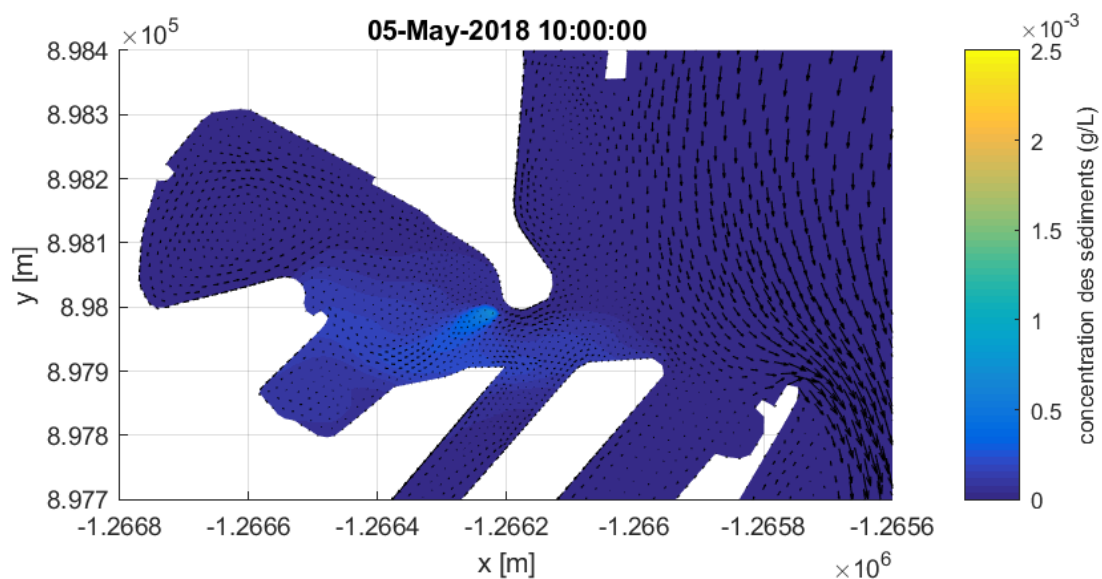


Figure Annexe D-6: Position de la drague 3 - benne environnemental avec écran anti-MES  
-concentration en MES [g/l] à la fin de travaux