

La bathymétrie prise en compte dans l'avant-port et à proximité du site pour l'ensemble des simulations hydrodynamiques de cette phase 1 correspond à la bathymétrie levée pour la CCI en mars 2020 (dernière bathymétrie disponible au démarrage de l'étude).

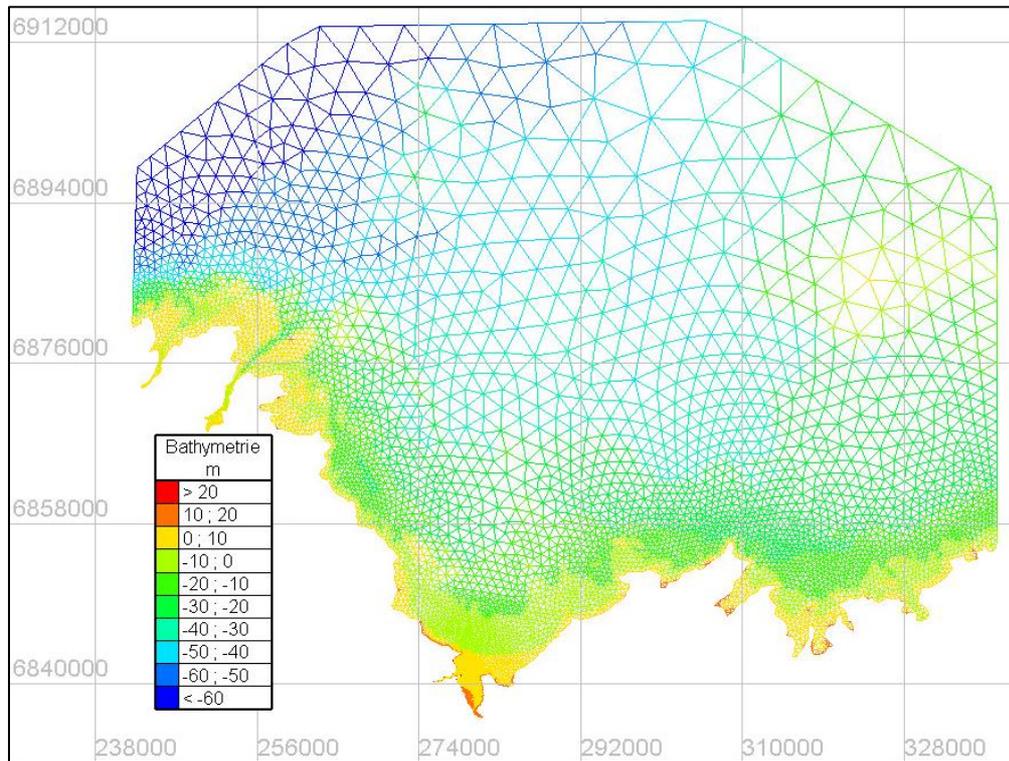


Figure 4-2. Maillage et bathymétrie du modèle : emprise globale

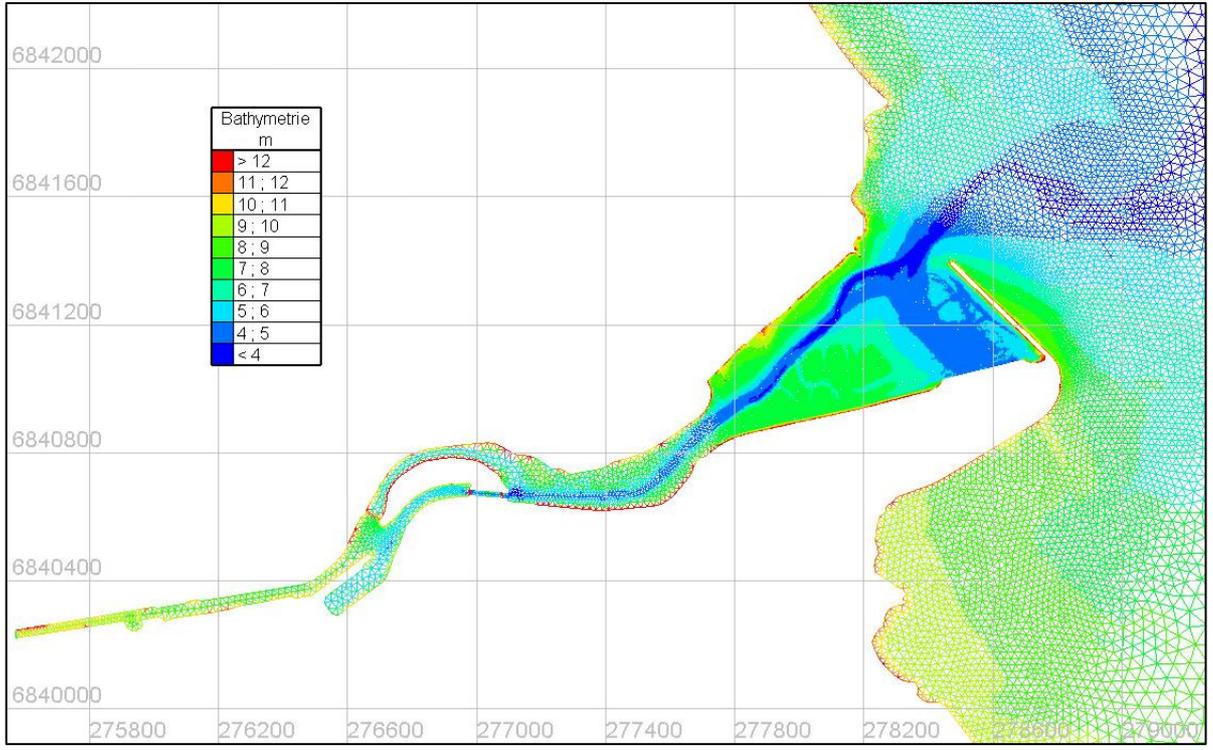


Figure 4-3. Maillage et bathymétrie du modèle pour les simulations courtes (maillage 1) : zoom sur la zone d'étude

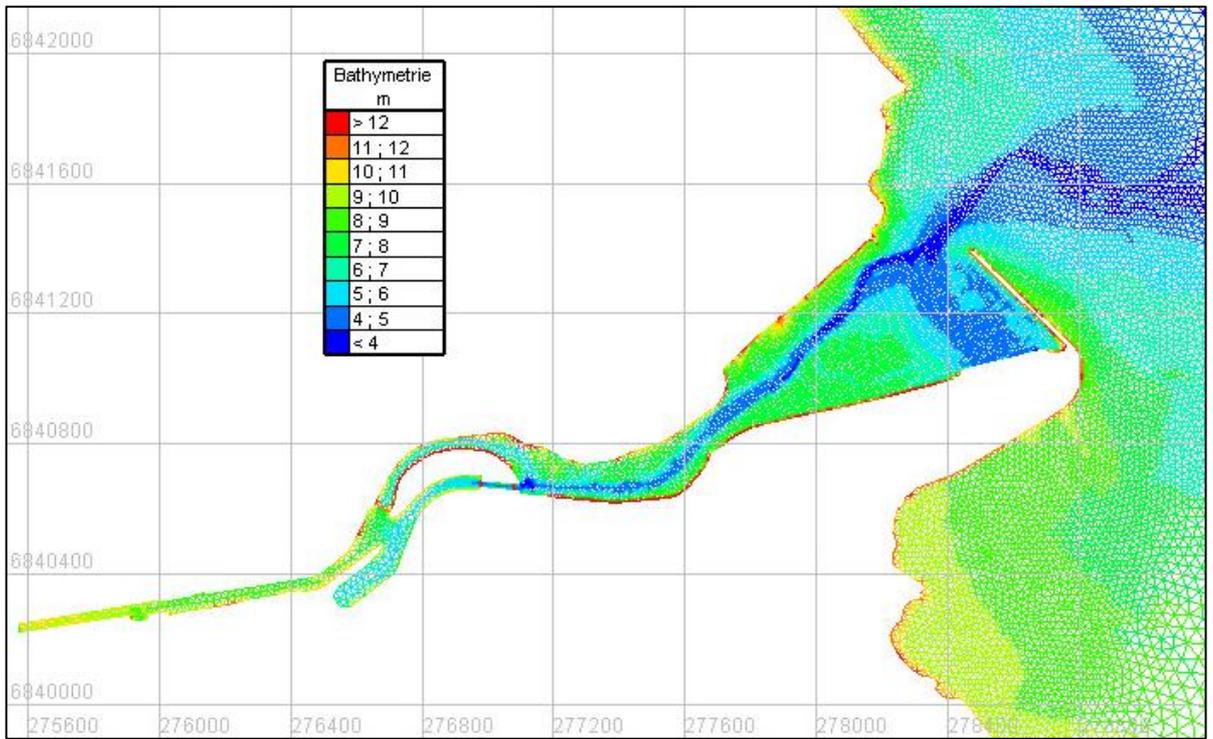


Figure 4-4. Maillage et bathymétrie du modèle pour les simulations longues (maillage 2) : zoom sur la zone d'étude

#### 4.3 MISE EN PLACE DES MODELES HYDRODYNAMIQUE ET D'ETATS DE MER

##### 4.3.1 PARAMETRAGE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE ET D'ETATS DE MER

Le paramétrage adopté pour l'étude est le suivant :

- Conditions aux limites de marée, les variations temporelles du niveau d'eau sont calculées à partir de l'atlas FES2014 et imposées en chaque point de la frontière maritime du modèle à chaque pas de temps ;
- Conditions atmosphériques, les champs horaires de vent (intensité et direction) et de pression atmosphérique sont imposés en chaque point de la grille de calcul et à chaque pas de temps (interpolations spatio-temporelles) à partir de la base de données CFSR ;
- Frottement sur le fond : la loi de Nikuradse est utilisée avec un coefficient de rugosité (ks) de 10 mm.

Le paramétrage du modèle d'états de mer est le suivant :

- Conditions aux limites : les paramètres synthétiques  $H_s$ , direction et période de pic horaires sont imposés en chaque point de la frontière maritime du modèle et à chaque pas de temps, à partir de la base de données HOMERE ou MARC NORGAS-UG (interpolations spatio-temporelles) ;
- Conditions atmosphériques : les champs horaires de vent (intensité et direction) sont imposés en chaque point de la grille de calcul et à chaque pas de temps (interpolations spatio-temporelles) à partir de la base de données CFSR. Les échanges atmosphériques incluent la génération des états de mer par le vent, les interactions non-linéaires et la dissipation par moutonnement ;
- Frottement sur le fond ;
- Déferlement bathymétrique ;

La Figure 4-5 présente le schéma du système de modélisation mis en place.

La fréquence de couplage entre les modèles hydrodynamique et d'états de mer est de 1 minute.

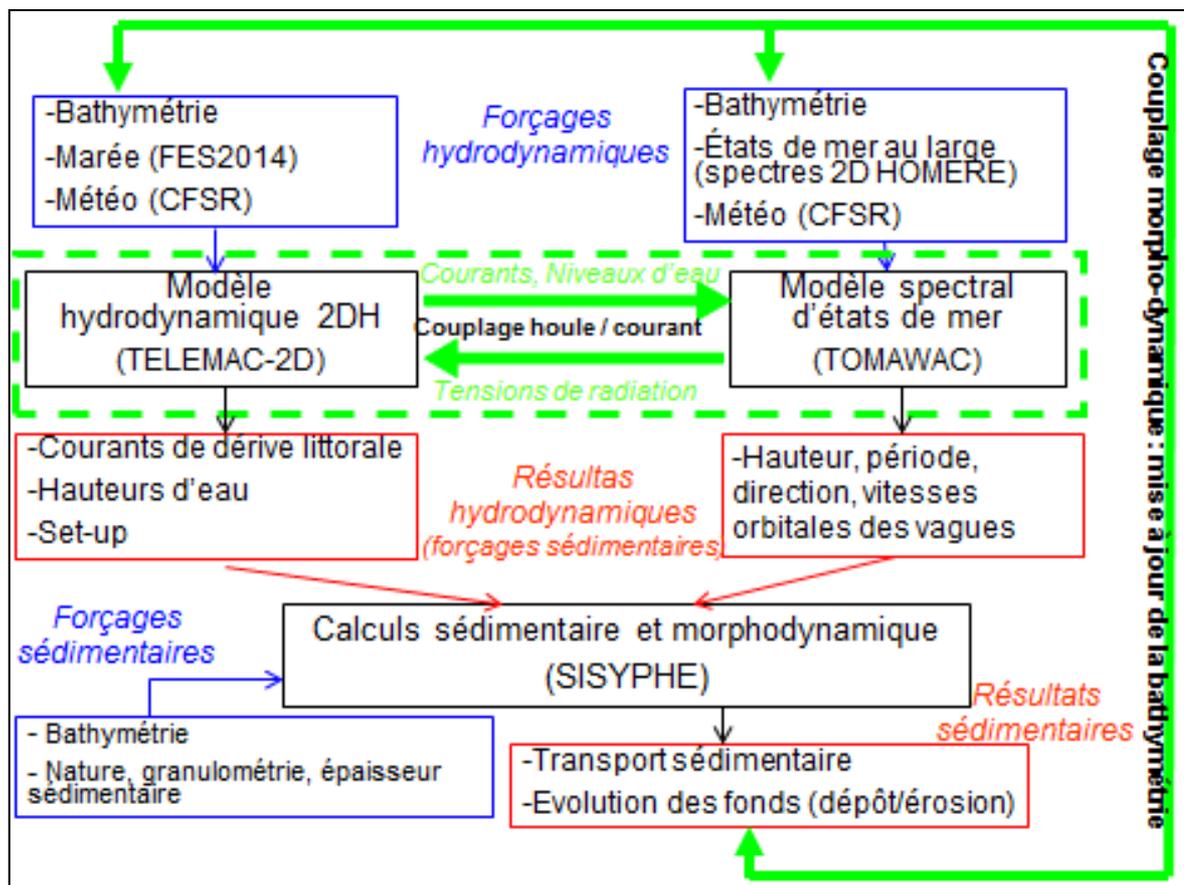


Figure 4-5 Schéma de principe du système de modélisation, illustrant les couplages (en vert) entre les différents modèles (en noir), les données nécessaires à leur fonctionnement (en bleu) et les résultats produits (en rouge).

### 4.3.2 VERIFICATION / CALIBRATION

#### 4.3.2.1 Niveaux et Courant

Dans un premier temps, les niveaux d'eau en situation de marée seule modélisés sont comparés aux niveaux d'eau prédits par le SHOM en 3 ports sur un cycle vive-eau/morte-eau de 14 jours au Légué et en 2 ports aux alentours. La Figure 4-6 montre une très bonne reproduction de ces niveaux de marée par le modèle.

Dans un deuxième temps, les niveaux d'eau et les courants modélisés sont comparés à ceux mesurés au point équipé d'un ADCP lors de la campagne de mesure de l'UBS (cf.4.2.2.3). Le modèle reproduit très correctement les courbes de marée (en intensité comme en phasage) ainsi que les courants (intensité et directions). Les asymétries flot/jusant caractéristiques dans la zone sont en particulier très bien reproduites.

# Rapport de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

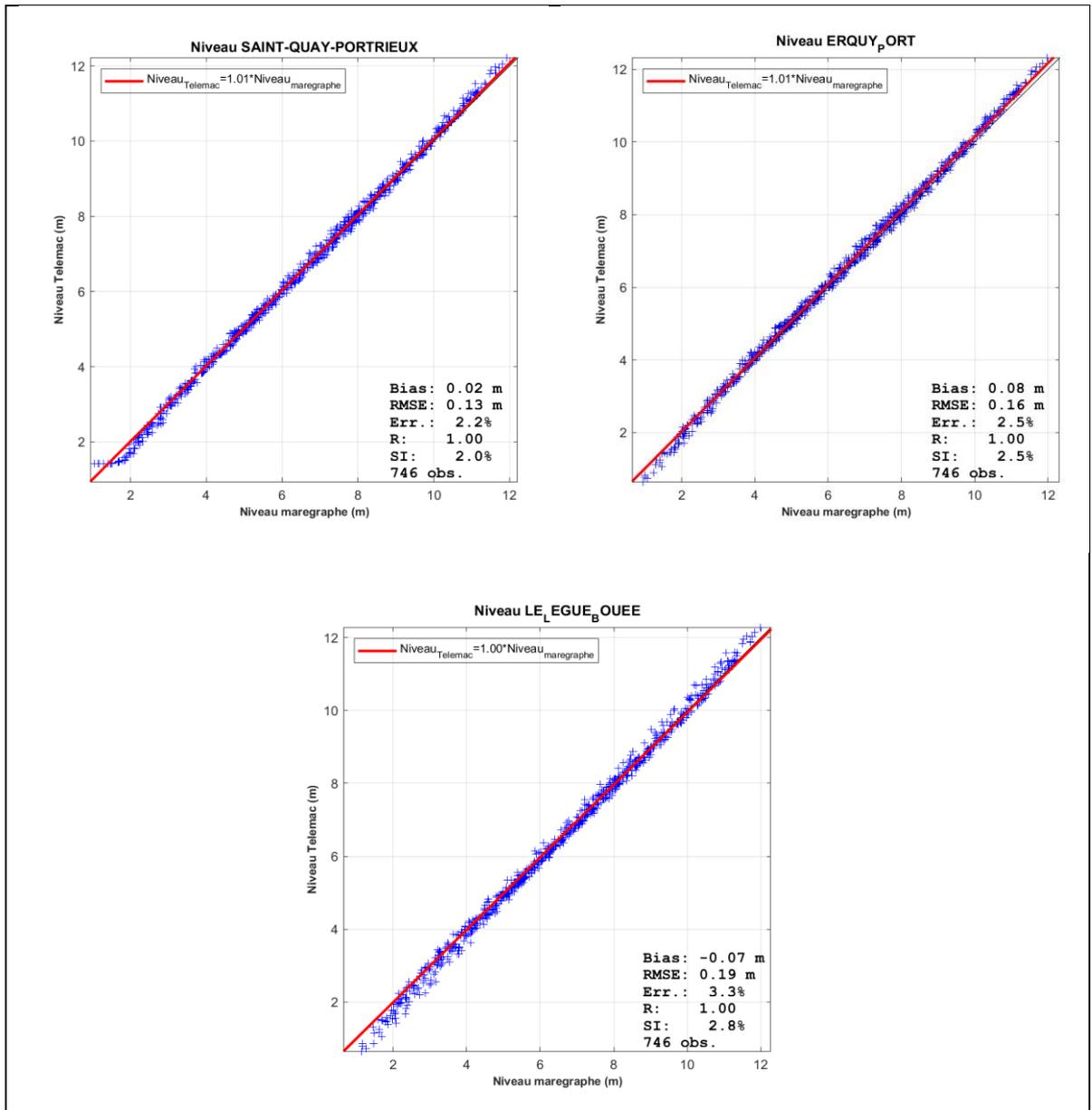


Figure 4-6. Comparaison des niveaux d'eau prédits par le SHOM et par le modèle en 3 ports

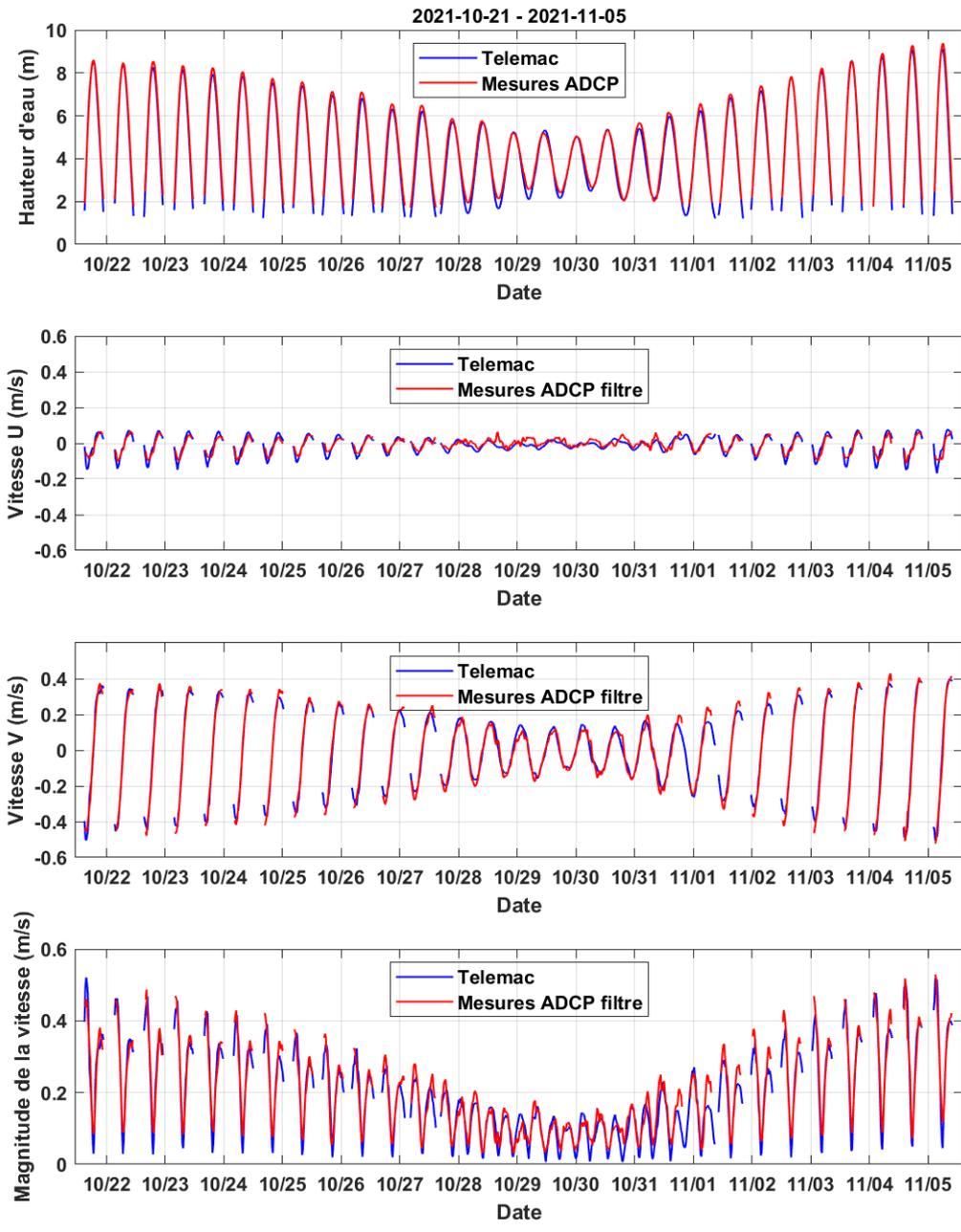


Figure 4-7. Comparaison modèle-mesures pendant la campagne de mesures au point ADCP.

### 4.3.2.2 Etats de Mer

Les hauteurs significatives des états de mer (Hs) mesurées et prédites par le modèle sont juxtaposées sur les figures ci-dessous. On démontre ainsi la capacité du modèle à reproduire avec beaucoup de justesse les états de mer en fonction de la marée et de la position dans la baie et le port.

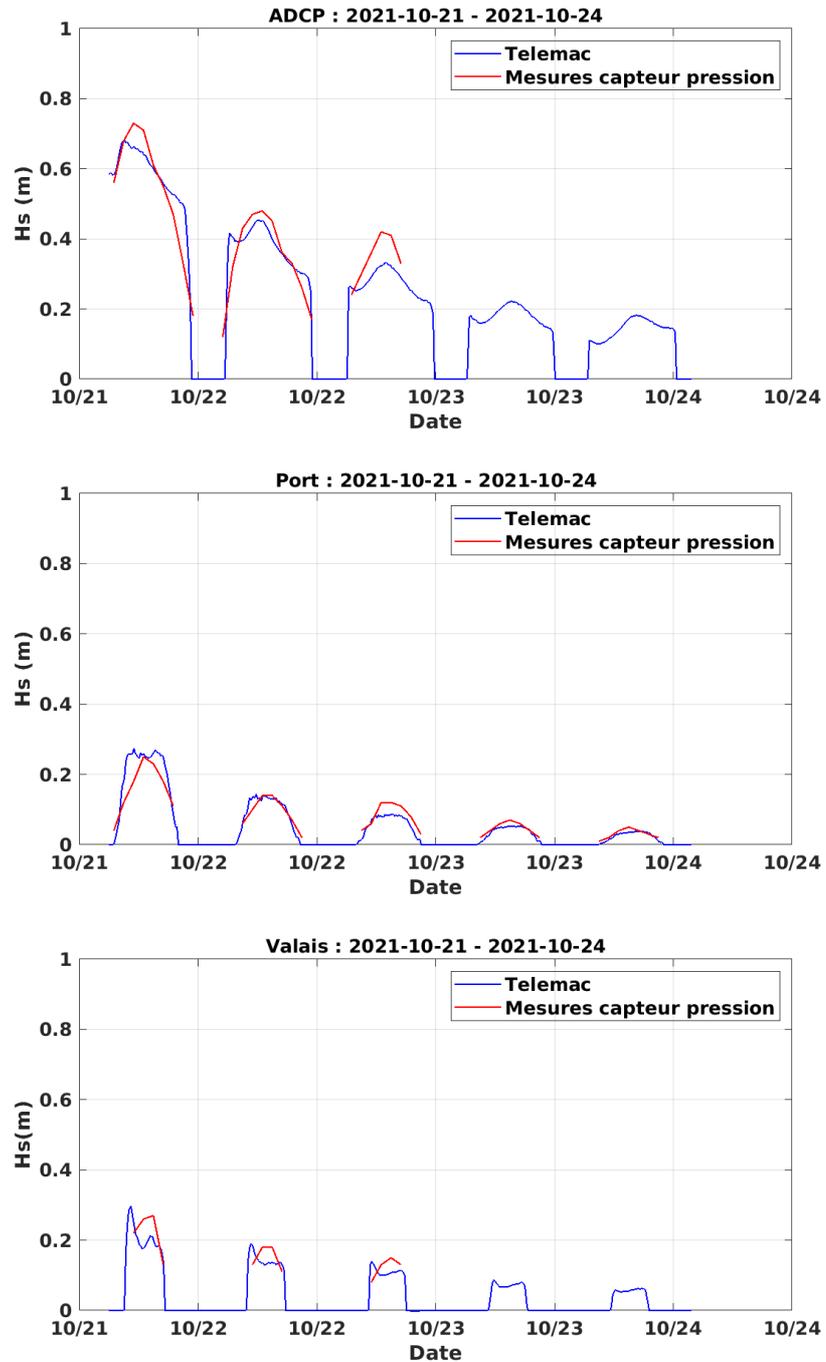


Figure 4-8 Comparaison modèle-mesures des Hs aux 3 points instrumentés d'un capteur de pression

#### 4.4 MISE EN PLACE DES MODELES DE DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

Dans la zone d'étude, le sédiment est hétérogène et est composé d'une fraction sableuse et d'une fraction vaseuse. Ces deux types de sédiment ont des comportements différents et sont régis par des lois différentes. Dans le cadre de cette étude, le code Sisyphe de la chaîne Telemac (EDF-LNHE) a été utilisé pour réaliser les calculs de dynamique sédimentaire. Au sein du système Telemac, le module Sisyphe résout notamment les équations de transport des sédiments non cohésifs (sables, graviers...) par des formulations de capacités de transports et les lois d'advection-diffusion et d'érosion/dépôts pour les sédiments cohésifs (sédiments fins, vases) sous l'effet combiné de la houle et des courants.

##### 4.4.1 DYNAMIQUE SABLEUSE

Bien que les formulations de capacité de transport déjà disponibles dans Sisyphe (Meyer-Peter, Einstein-Brown, Engelund-Hansen, Bijker, Soulsby, VanRijn, Bailard, Dibajnia-Watanabe) conviennent en première approche Actimar a implémenté dans SISYPHE une formulation plus adaptée à la représentation des transports par charriage et en suspension. En effet, la formulation de Wu et Lin (2014) a été validée pour une gamme de taille de sédiments relativement étendue tout en intégrant, selon une physique assez complète, l'action des vagues sur la mise en mouvement des sédiments.

Le diamètre de sédiment considéré dans le modèle se base sur les analyses granulométriques disponibles dans la zone. Pour les scénarios courts, le diamètre médian considéré est de 175  $\mu\text{m}$ . Le coefficient de rugosité  $k_s$  correspond à la rugosité de peau et est pris égale à deux fois le diamètre médian. Les simulations correspondant à un cycle de marée, l'évolution de la bathymétrie des fonds au cours de la simulation n'est pas prise en compte dans les modules hydrodynamique et d'états de mer (bathymétrie fixe).

En préparation des simulations annuelles, des tests de sensibilité au diamètre (125  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  et 175  $\mu\text{m}$ ) sont menés afin d'affiner quantitativement les volumes de sédiments arrivant dans la zone de dragage. Les rides sont prises en compte pour le calcul du  $k_s$  (rugosité de forme) tel que décrit dans Wu et Lin (2014). Plus de précisions sur la stratégie de modélisation pour représenter la dynamique sédimentaire sur une année seront données par la suite.

##### 4.4.2 DYNAMIQUE DES SEDIMENTS FINS

La dynamique des sédiments fins est modélisée par le module SISYPHE en résolvant une équation d'advection-dispersion tenant compte d'une vitesse de chute des particules.

Les paramètres spécifiques à ce modèle de dispersion des sédiments dans le cadre des simulations courtes sont les suivants :

- Vitesse de chute : 0.1 mm/s, dans la gamme de valeurs représentative de matières en suspension des eaux côtières. ;
- Contrainte critique d'érosion : 0.2 N/m<sup>2</sup>, valeur standard pour des sédiments fins non consolidés ;
- Contrainte critique de dépôt : 0.1 N/m<sup>2</sup>.

Ces paramètres feront par la suite l'objet de tests de sensibilité lors des simulations longues afin d'obtenir un volume de dépôt dans la zone de dragage en adéquation avec les volumes effectivement au cours d'une année.

Les apports maritimes en MES sont pris en compte dans le modèle en initialisant la concentration en MES en mer à chaque basse mer par une valeur représentative de la concentration en MES au large obtenu à partir des images satellitales et des climatologies qui en découlent (Produits MARC-PREVIMER <https://marc.ifremer.fr/resultats/turbidite>). Pour les simulations courtes, une valeur de 5 mg/l a été prise en compte. Pour les simulations longues, les concentrations moyennes mensuelles entre 2017 et 2021 au large du Légué obtenue à partir des données satellitales (Produits MARC-PREVIMER, <https://marc.ifremer.fr/resultats/turbidite>) ont été imposées (Figure 4-9).

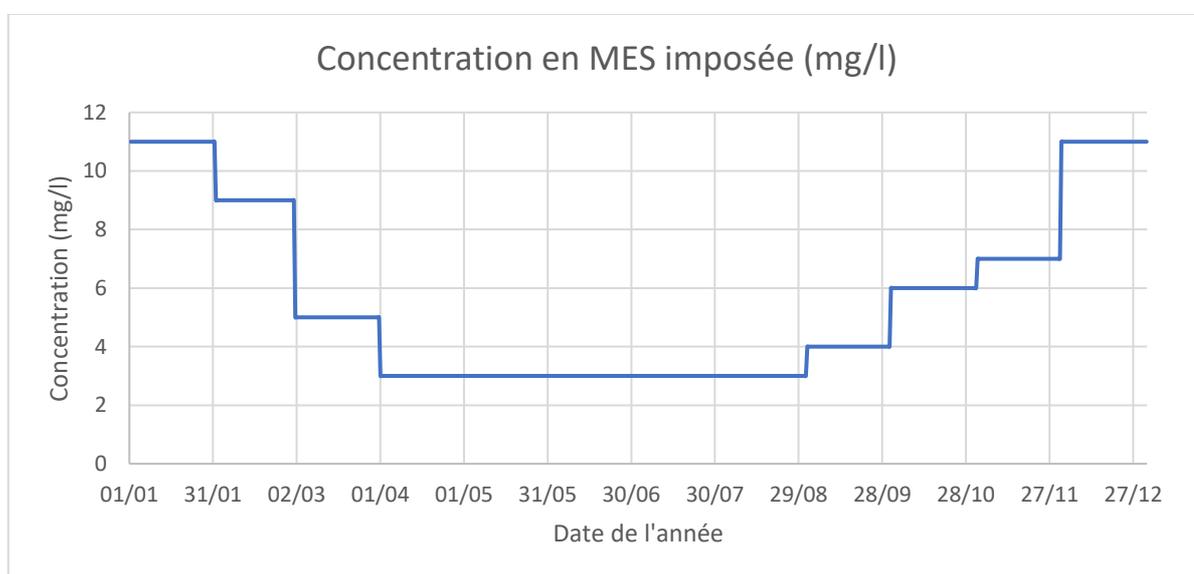


Figure 4-9 Concentration moyenne mensuelle au large du Légué d'après les données satellitales MARC Ifremer).

Les apports fluviaux ont été estimés section 3 suivant l'analyse des dépôts en amont écluse et déversoir. Ainsi une concentration de 10 mg/l (gamme haute des estimations, cf Tableau 3-2) constante dans le temps est imposé à la frontière fluviale avec un débit fort.

### 4.5 DEFINITION DES SCENARIOS

#### 4.5.1 SCENARIOS COURTS

La définition des scénarios courts doit déterminer les valeurs associées aux paramètres d'états de mer, de marée et de débit. Des analyses statistiques ont été conduites sur ces différents paramètres pour établir des situations fréquentes et exceptionnelles (énergétiques). Par ailleurs il est également nécessaire de définir la nature et les caractéristiques des sédiments pris en compte par les calculs.

##### 4.5.1.1 Caractérisation des états de mer

Les analyses exploitent un point de la base de données HOMERE localisé sur la figure ci-dessous.

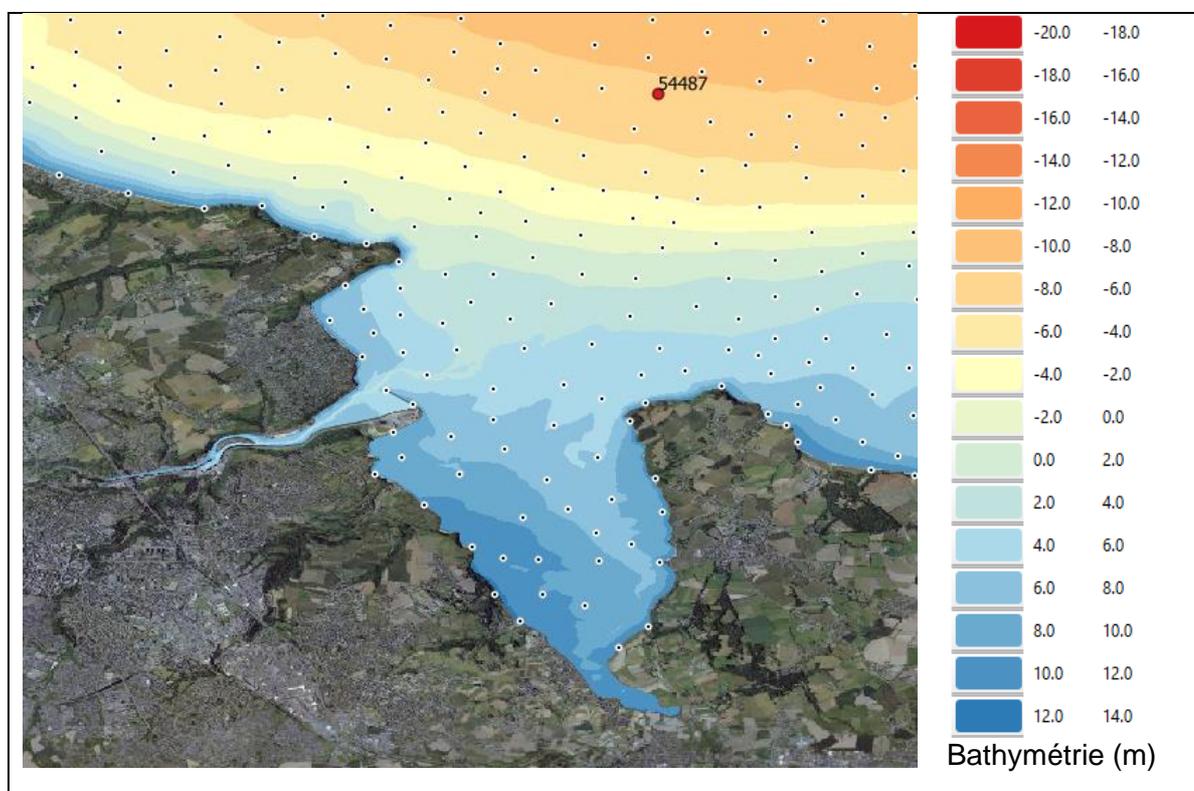


Figure 4-10 Localisation du point 54487 où sont étudiés les états de mer dans la base de données HOMERE. Les autres points noirs représentent la localisation de l'ensemble des points disponibles dans la base de données.

Les caractéristiques des états de mer au large du Légué sont représentées de manière graphique (cf. Figure 4-11) et sous forme de tableau (Tableau 4-1).

# Rapport de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

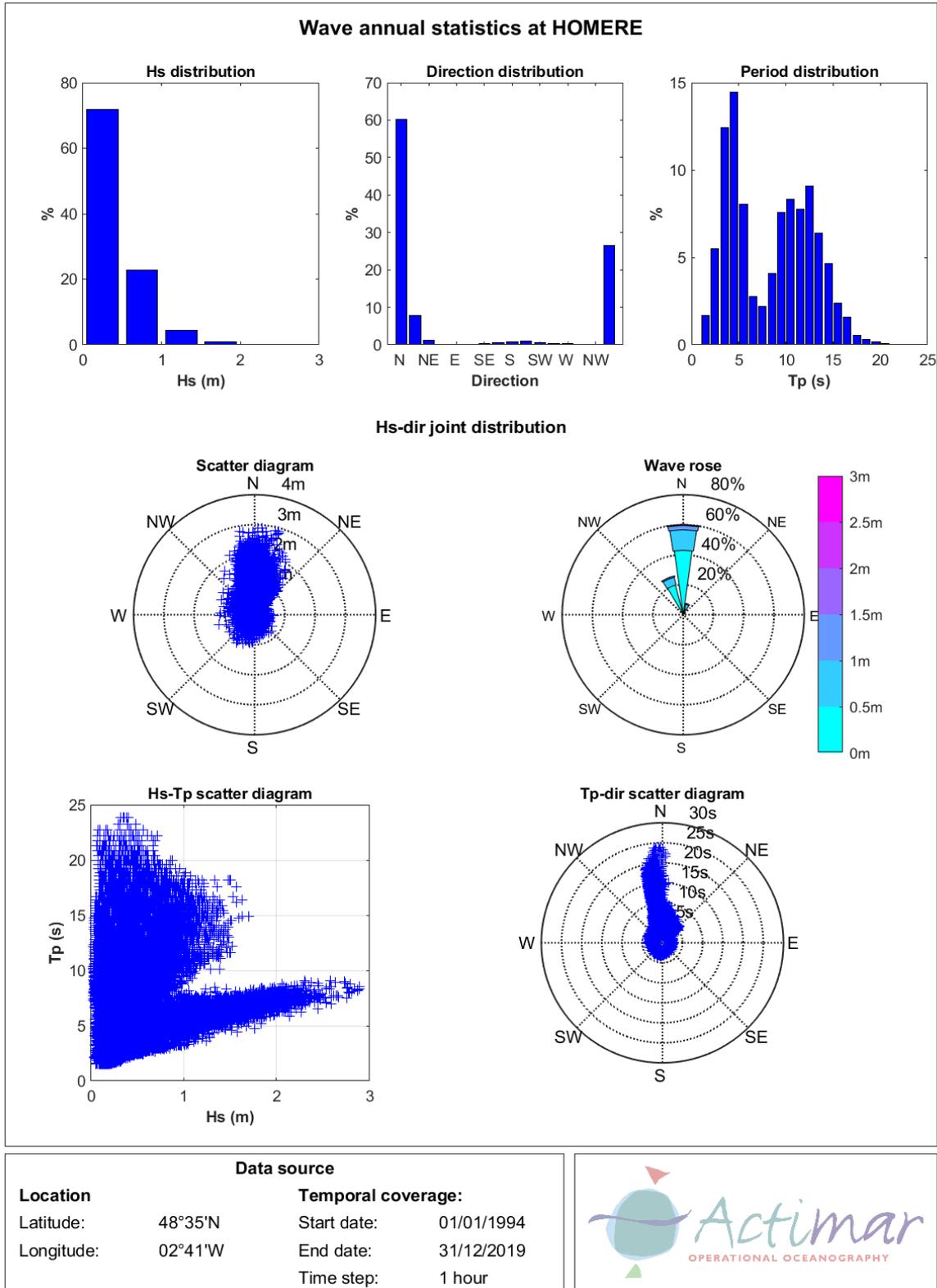


Figure 4-11 Synthèse des caractéristiques des états de mer au large du Port du Légué

## Rapport de la phase n°1

### Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

Tableau 4-1 Synthèse des caractéristiques des états de mer au large du Port du Légué

Hs(m)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
<b>0.00 - 0.50</b>	53.68	54.75	64.73	73.78	78.24	86.15	87.87	87.88	77.54	76.21	63.16	56.26	71.78
<b>0.50 - 1.00</b>	35.50	33.24	28.53	20.11	19.32	12.58	11.51	11.59	19.85	20.15	27.63	34.17	22.80
<b>1.00 - 1.50</b>	8.89	9.01	5.48	5.34	2.06	1.11	0.62	0.53	2.56	3.03	7.21	7.66	4.43
<b>1.50 - 2.00</b>	1.67	2.38	1.00	0.70	0.34	0.13			0.05	0.47	1.85	1.58	0.84
<b>2.00 - 2.50</b>	0.25	0.57	0.20	0.07	0.03	0.03				0.14	0.15	0.29	0.14
<b>2.50 - 3.00</b>	0.01	0.04	0.07			0.01						0.04	0.01
<b>Minimum</b>	0.04	0.07	0.04	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02
<b>Mean</b>	0.56	0.56	0.48	0.42	0.37	0.32	0.30	0.30	0.37	0.40	0.51	0.54	0.43
<b>Maximum</b>	2.57	2.89	2.88	2.31	2.31	2.54	1.39	1.44	1.63	2.45	2.34	2.76	2.89
<b>Std Dev</b>	0.33	0.37	0.31	0.30	0.24	0.20	0.18	0.17	0.23	0.27	0.33	0.34	0.30
<b>Quantiles</b>													
<b>99 &lt;=</b>	1.63	1.85	1.60	1.46	1.17	1.09	0.93	0.91	1.14	1.36	1.67	1.71	1.50
<b>98 &lt;=</b>	1.49	1.63	1.36	1.31	1.05	0.88	0.82	0.81	1.05	1.18	1.50	1.49	1.31
<b>95 &lt;=</b>	1.23	1.33	1.09	1.07	0.84	0.68	0.64	0.65	0.87	0.91	1.23	1.22	1.03
<b>90 &lt;=</b>	1.02	1.07	0.90	0.84	0.68	0.56	0.53	0.53	0.70	0.74	0.97	0.99	0.82
<b>80 &lt;=</b>	0.79	0.80	0.68	0.59	0.52	0.44	0.42	0.42	0.53	0.55	0.72	0.78	0.60
<b>70 &lt;=</b>	0.64	0.65	0.55	0.46	0.43	0.36	0.35	0.35	0.43	0.44	0.57	0.64	0.48
<b>50 &lt;=</b>	0.48	0.47	0.40	0.32	0.30	0.27	0.26	0.26	0.31	0.33	0.41	0.45	0.35
<b>30 &lt;=</b>	0.36	0.34	0.29	0.24	0.22	0.20	0.20	0.20	0.23	0.24	0.32	0.34	0.25
<b>10 &lt;=</b>	0.23	0.21	0.18	0.15	0.13	0.13	0.12	0.12	0.14	0.15	0.20	0.21	0.15

Les valeurs extrêmes des états de mer sont estimées pour des périodes de retour de 1, 10 et 50 ans (voir ci-dessous).

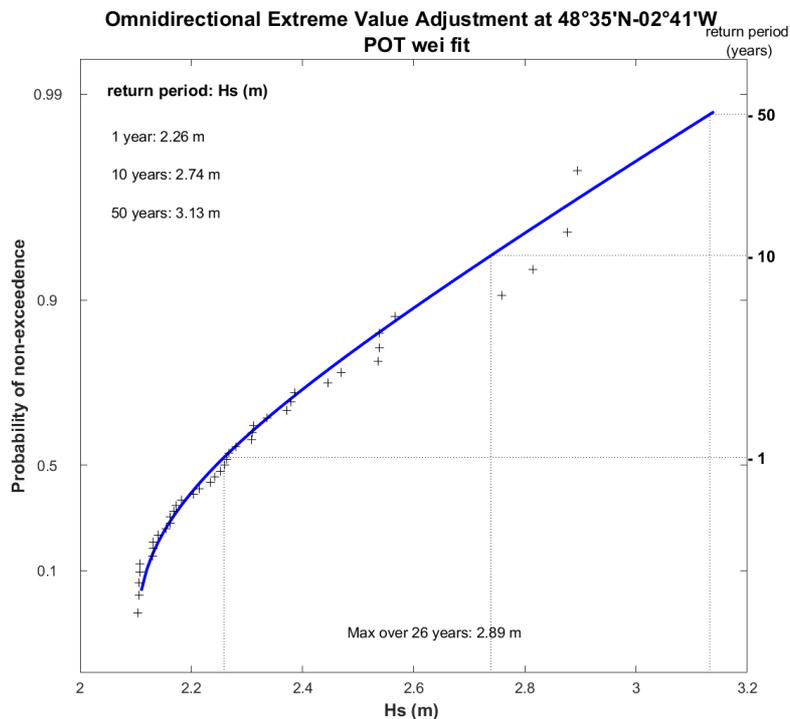


Figure 4-12 Hauteurs significatives extrêmes au point d'intérêt au large du port du Légué.

### 4.5.1.2 Scénarios retenus

Les courants et la propagation des vagues à l'échelle de la zone d'étude sont simulés pour 8 conditions météo-océaniques (combinant la marée, les vagues et le débit), sur une durée d'une à deux marées.

A partir de l'analyse des conditions météo-océaniques dans la zone d'étude, les scénarios suivants combinant la marée, les états de mer et le débit ont été sélectionnés :

- 6 conditions fréquentes combinant 3 intensités de vagues (sans vagues, Hs médian et percentile 80 du Hs), 2 intensités de débit (moyen et fort) et 3 types de marée (morte-eau moyenne, vive-eau moyenne et vive eau exceptionnelle) ;
- 2 conditions extrêmes (vagues exceptionnellement énergétiques) correspondant à une période de retour du Hs de 1 an avec 2 types de marée (morte-eau moyenne, vive-eau moyenne).

Tableau 4-2 Scénarios modélisés dans le cadre des simulations courtes.

Numéro scénario	Marée	Vagues	Débit
1	Vive-eau 95	X	Moyen
2	Vive-eau 95	Hs médian	Moyen
3	Vive-eau 95	Hs percentile 80	Moyen
4	Morte-eau 45	Hs médian	Moyen
5	Vive-eau exceptionnelle	Hs médian	Moyen
6	Vive-eau 95	Hs médian	Fort
7	Vive-eau 95	Hs 1an	Moyen
8	Morte-eau 45	Hs 1an	Moyen

### 4.5.2 SIMULATIONS LONGUES

La dynamique sédimentaire actuelle est modélisée sur une saison de dragage. Pour cela, des statistiques sont réalisées sur les données suivantes afin de choisir une année réelle représentative des conditions sur le site d'étude :

- Capacité de transport solide devant l'entrée de l'avant-port
- Matière en suspension (MES) moyennes observées par satellite
- Quantités de sédiments dragués
- Débit du Gouët en aval du barrage de Saint Barthélémy

#### 4.5.2.1 Capacité de transport solide devant l'entrée du port du Légué

Une année représentative de la période 1994-2020 est recherchée directement à partir d'une réanalyse de capacité de transport solide intégrant l'influence combinée du courant et des vagues (formulation de Wu & Lin, 2014). Les données d'entrée pour cette analyse sont :

- Vagues, courants et hauteurs d'eau sur la période 1994-2020 à l'entrée du port (point 54315 des bases de données HOMERE et MARC ; Ifremer) ;

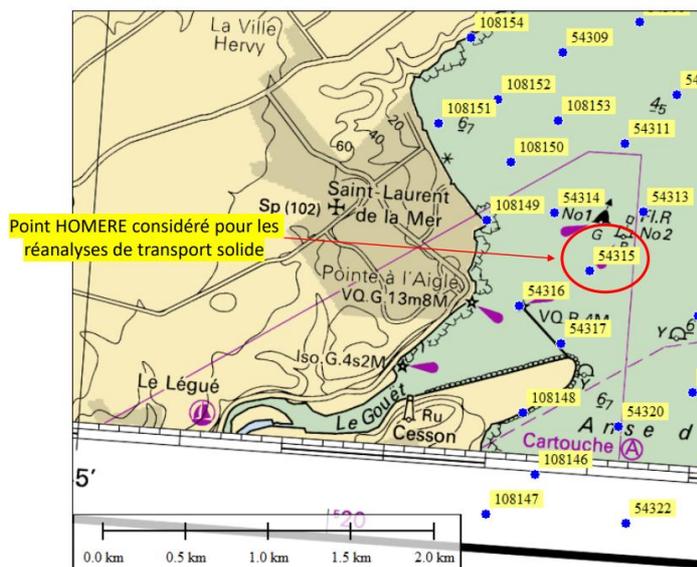


Figure 4-13 Localisation du point HOMERE étudié pour le calcul de transport solide entrant dans le port.

- Analyses granulométriques au point « Zone dépôt extérieur » de décembre 2020 fournies par la CCI. Le sédiment choisi a les caractéristiques suivantes :  $d_{10} = 0.068 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 0.166 \text{ mm}$ ,  $d_{90} = 0.282 \text{ mm}$ .

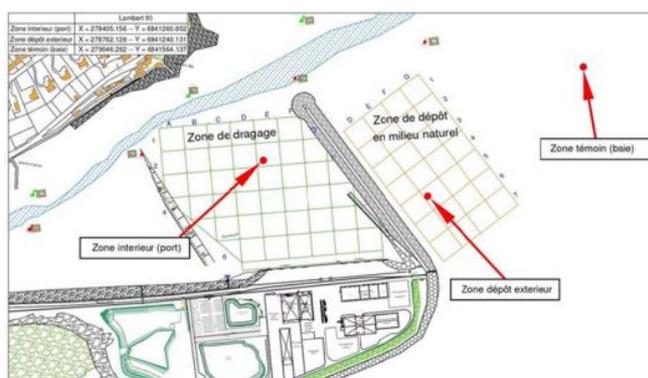


Figure 4-14 Localisation des analyses granulométriques disponibles réalisées par la CCI dans la zone d'étude.

Le Tableau 4-3 présente les résultats obtenus sur toute la période de données disponibles. L'année 2018 est une année (récente) représentative avec des flux entrant et sortant relativement proches de la moyenne sur l'ensemble de la période (idem pour les percentiles 75 et 85).

Tableau 4-3 Calcul des transports entrant et sortant (moyen, Q50, Q75, Q85 et Max) par année.

	transport entrant (flot) [m3/m/an]						transport sortant (jusant) [m3/m/an]				
	Moy	Q50	Q75	Q85	Max		Moy	Q50	Q75	Q85	Max
1994	38,2	0,0	8,8	36,2	2630,9	1994	19,1	0,0	0,0	14,6	2192,4
1995	47,8	0,0	8,3	40,1	3621,7	1995	23,3	0,0	0,0	14,4	2436,9
1996	78,8	0,0	9,1	47,7	6531,3	1996	34,6	0,0	0,2	13,8	2895,8
1997	47,7	0,0	9,0	35,0	4701,7	1997	22,5	0,0	0,1	13,6	2626,7
1998	54,9	0,0	11,0	46,9	6151,5	1998	26,7	0,0	0,1	17,9	2841,2
1999	57,6	0,0	9,9	46,0	4379,2	1999	27,7	0,0	0,0	15,3	4227,9
2000	42,4	0,0	7,8	33,5	4039,3	2000	20,6	0,0	0,1	12,3	2088,4
2001	59,8	0,0	7,3	38,7	4219,7	2001	27,2	0,0	0,2	11,2	2179,5
2002	47,3	0,0	10,1	38,3	3773,2	2002	23,3	0,0	0,1	14,4	2910,7
2003	51,3	0,0	7,3	35,6	4107,0	2003	24,1	0,0	0,0	11,6	2345,0
2004	52,0	0,0	8,4	37,7	3407,5	2004	25,8	0,0	0,1	13,6	2906,7
2005	53,6	0,0	7,2	33,5	3477,7	2005	26,5	0,0	0,1	12,3	1904,3
2006	45,2	0,0	7,0	28,6	3446,1	2006	21,4	0,0	0,1	11,0	2506,5
2007	50,4	0,0	7,9	34,8	3707,7	2007	24,4	0,0	0,1	13,7	2583,9
2008	45,5	0,0	8,7	34,4	4090,7	2008	21,9	0,0	0,2	13,8	3583,2
2009	38,9	0,0	7,5	30,3	3365,0	2009	18,9	0,0	0,1	11,6	1893,6
2010	58,8	0,0	8,4	35,0	5032,3	2010	28,3	0,0	0,1	12,7	3006,5
2011	37,2	0,0	8,6	30,0	3935,3	2011	19,9	0,0	0,1	12,6	2616,8
2012	41,7	0,0	5,6	27,1	3537,8	2012	20,2	0,0	0,1	9,1	2293,3
2013	74,4	0,0	6,5	37,8	4065,6	2013	34,9	0,0	0,2	11,2	2364,6
2014	39,1	0,0	6,4	29,1	3698,7	2014	19,1	0,0	0,2	10,1	3129,5
2015	66,3	0,0	8,0	36,9	4184,4	2015	31,1	0,0	0,2	12,1	2957,7
2016	45,5	0,0	7,4	29,4	2826,7	2016	21,4	0,0	0,2	10,7	2421,1
2017	48,9	0,0	6,1	29,6	3499,5	2017	23,5	0,0	0,1	9,9	2510,3
2018	62,7	0,0	7,8	33,4	4288,2	2018	29,5	0,0	0,2	11,7	3058,4
2019	47,5	0,0	7,1	32,0	4692,7	2019	22,1	0,0	0,2	11,4	3168,4
2020	53,6	0,0	11,6	49,8	3132,8	2020	28,6	0,0	1,6	19,6	2290,6
global	51,4	0,0	8,0	35,2	6531,3	global	24,7	0,0	0,2	12,7	4227,9

### 4.5.2.2 Matière en suspension (MES) moyennes observée par satellite

Les analyses des données satellites, réalisées par IFREMER, sont exploitées pour décrire le régime naturel pluriannuel de turbidité dans la baie de Saint-Brieuc (voir figure ci-dessous).

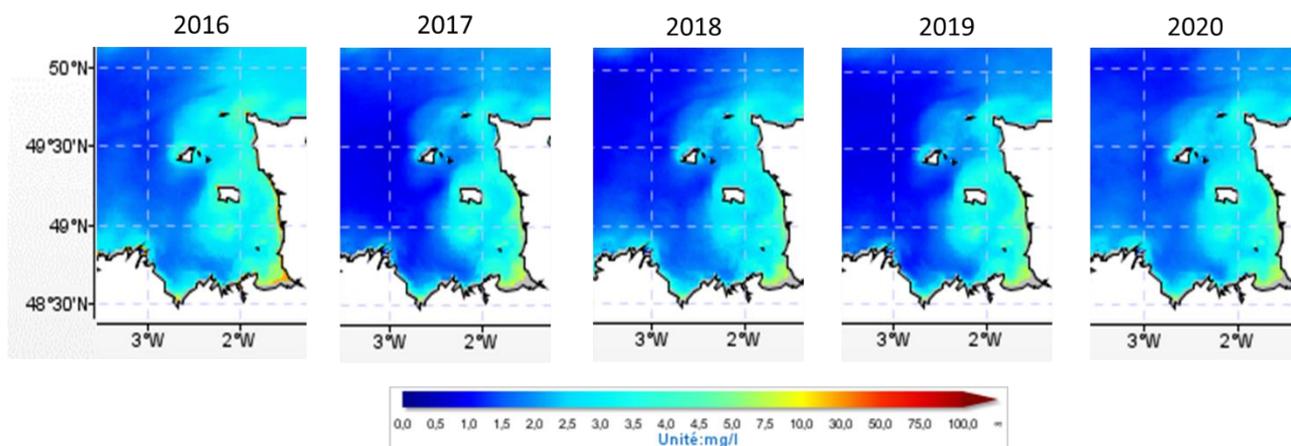


Figure 4-15. Concentration moyenne annuelle de MES dans le Golfe Normand Breton sur la période 2016-2020 (source MARC/Ifremer).

### 4.5.2.3 Quantités de sédiments dragués

L'année 2018 est une année récente avec un volume annuel proche de la moyenne (calculée sur la période 2008-2020).

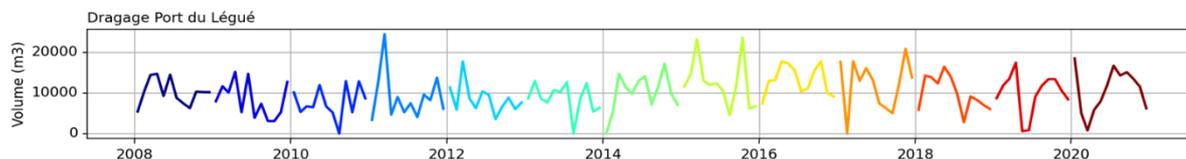


Figure 4-16. Volumes de sédiments dragués par mois dans l'avant-port du Légué

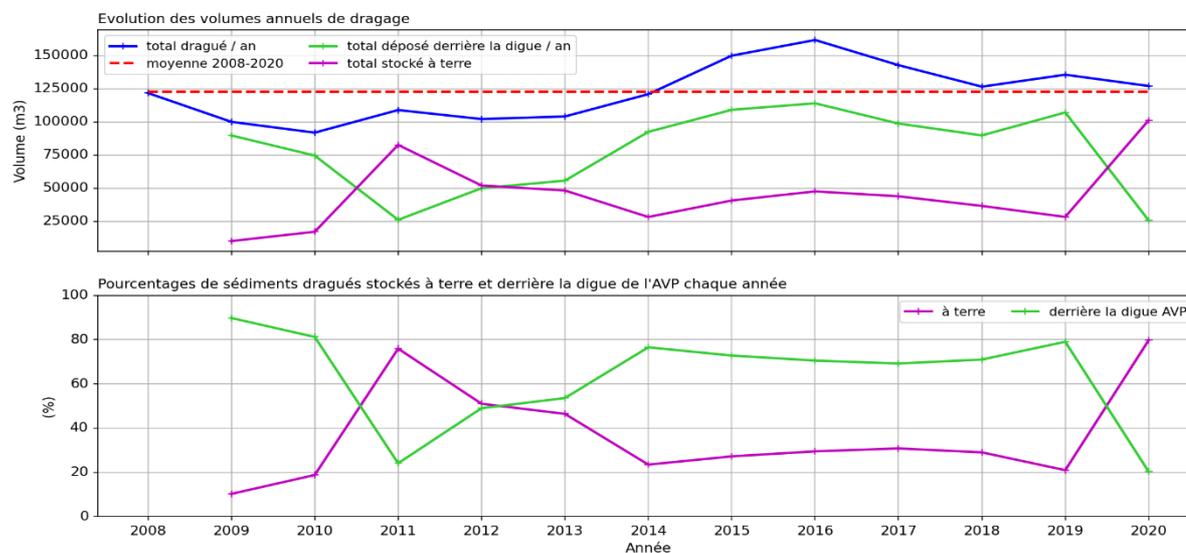


Figure 4-17. Volumes de sédiments dragués dans le port du Légué, déposés derrière la digue et stockés à terre par an.

### 4.5.2.4 Débit du Gouët en aval du barrage de Saint Barthélémy

Les données de débit moyen mensuel du Gouët en aval du barrage de Saint Barthélémy sont analysé entre 2010 et 2021 sur la Figure 4-18 année par année et moyennées sur les années disponibles.

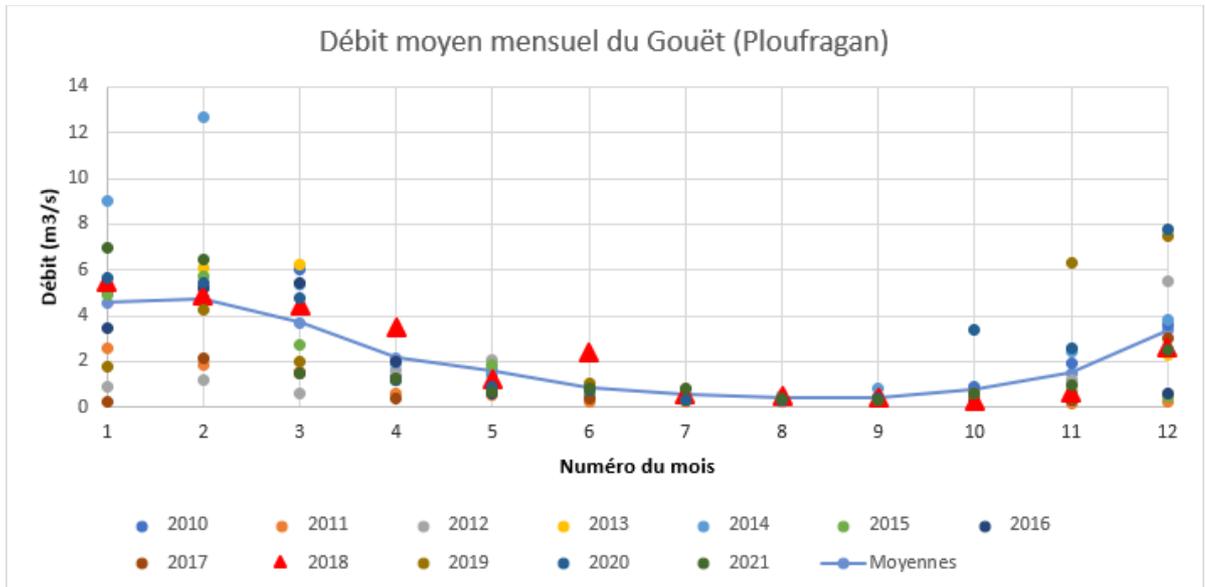


Figure 4-18. Débit du Gouët en aval du barrage de Saint Barthélémy

### 4.5.2.5 Choix final

L'année 2018 a ainsi été sélectionnée sur la base de considérations hydro-sédimentaires et des quantités de sédiments dragués/déposés en accord avec la Région Bretagne.

# 5. MODELISATION : RESULTATS DES SIMULATIONS A L'ECHELLE D'UNE MAREE

---

Ce chapitre présente les résultats des modèles hydrodynamique, d'états de mer et sédimentaires à l'échelle d'une marée pour les 8 conditions définies précédemment. Ces conditions schématiques permettent de caractériser plus facilement l'effet des différents processus : marée, vagues et débit.

## 5.1 COURANTS

### 5.1.1 DYNAMIQUE DE LA MAREE

La Figure 5-1 et la Figure 5-2 présentent la dynamique des courants de marée pour une marée de vive-eau moyenne (coef. ~95) pendant le flot et le jusant, respectivement, toutes les 20 minutes. En flot (Figure 5-1), la période pendant laquelle les courants sont particulièrement forts (>1m/s) est relativement courte (~20 minutes). Dans la zone d'entretien de l'avant-port, les courants forment une boucle en longeant la zone surélevée de l'avant-port, les quais et la digues. En jusant (Figure 5-2), le vidage de l'avant-port est plus progressif (on note pas de courants particulièrement intenses sur des temps courts). L'asymétrie des intensités de courant, en particulier les pics, est bien marqué : les courants de flot sont nettement plus intenses qu'au jusant. .

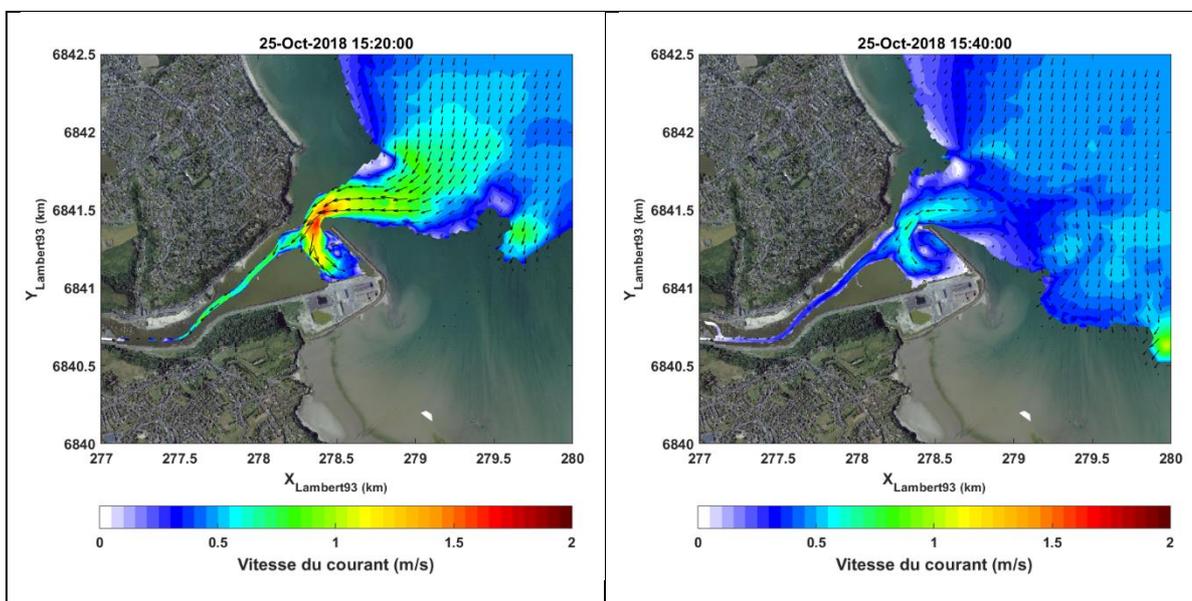
### 5.1.2 INFLUENCE DES CONDITIONS (MARNAGE, VAGUES ET DEBIT AMONT) SUR LES COURANTS

La sensibilité aux conditions (intensité de la marée, des vagues et du débit du Gouët) est analysée d'après des cartes de courant synthétiques (cf. Figure 5-3 à Figure 5-6) : il s'agit des courants maximaux modélisés en chaque point pendant les deux phases d'un cycle de marée (en flot et en jusant). Les flèches indiquent la direction du courant au moment où le maximum est atteint en ce point.

- Bien entendu, l'intensité des courants augmente avec le **marnage** (i.e. avec le coefficient de marée, cf. Figure 5-3). Le volume de remplissage et de vidage de l'estuaire augmentant avec le marnage, sans que la période de la marée soit modifiée, l'intensité des courants augmente. A noter que l'asymétrie (pic de courant en flot plus intense que le pic de courant en jusant) tend aussi à augmenter avec le marnage.
- L'influence des **vagues** sur les courants en situation fréquente à relativement énergétique (Figure 5-4, condition de vive-eau) est très faible (même pour la condition de Hs correspondant au percentile 80, c'est-à-dire un niveau d'énergie

atteint ou dépassé 20% du temps. Cependant, dans le cas d'évènements extrêmes (ici Hs annuel, Figure 5-5), l'influence des vagues sur les courants est clairement visible, notamment le long du littoral et particulièrement à l'extérieur de l'avant-port le long de la digue avec un courant généré par les vagues d'Ouest en Est que ce soit au flot ou au jusant et quel que soit le marnage. L'influence des vagues sur les courants est plus visible dans le cas de la marée de morte-eau, les courants de marée étant moins forts. Dans l'avant-port, l'influence des vagues sur les courants reste toutefois relativement faible.

- L'influence du **débit du Gouët** (Figure 5-6) sur les courants est visible dans le chenal en amont de l'avant-port : en marée montante, le courant qui remonte le chenal est plus faible lorsque le débit est fort par rapport à un débit moyen ; à l'inverse en marée descendante le courant dans le chenal est plus fort en cas de fort débit. Ces modifications de courant par le débit semblent limitées au chenal en amont de la zone d'entretien.



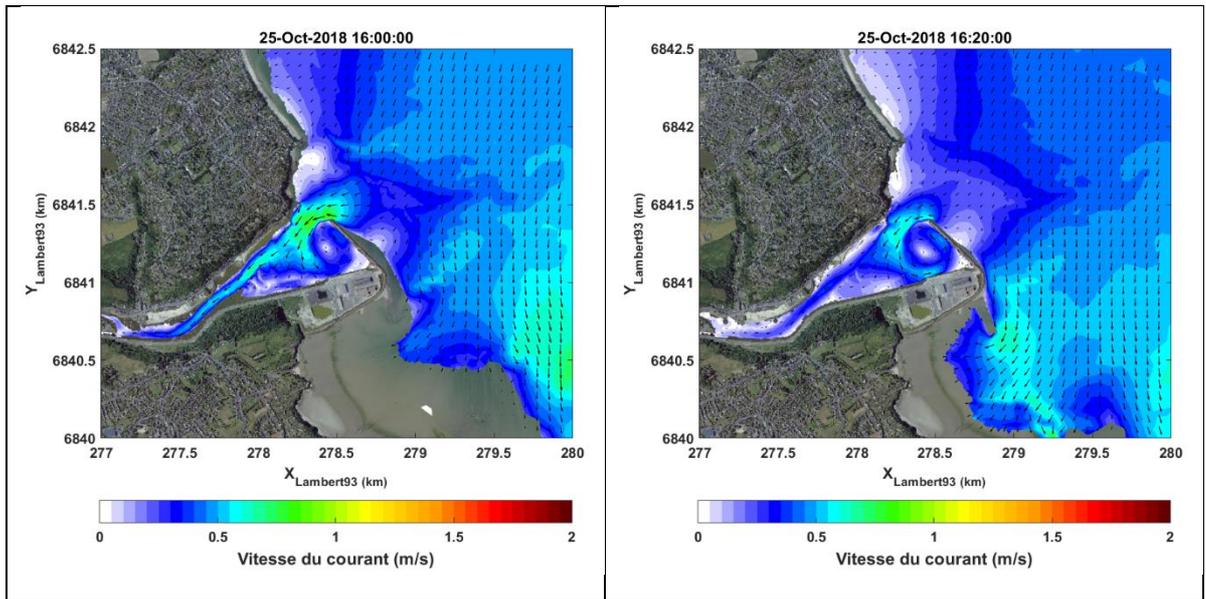
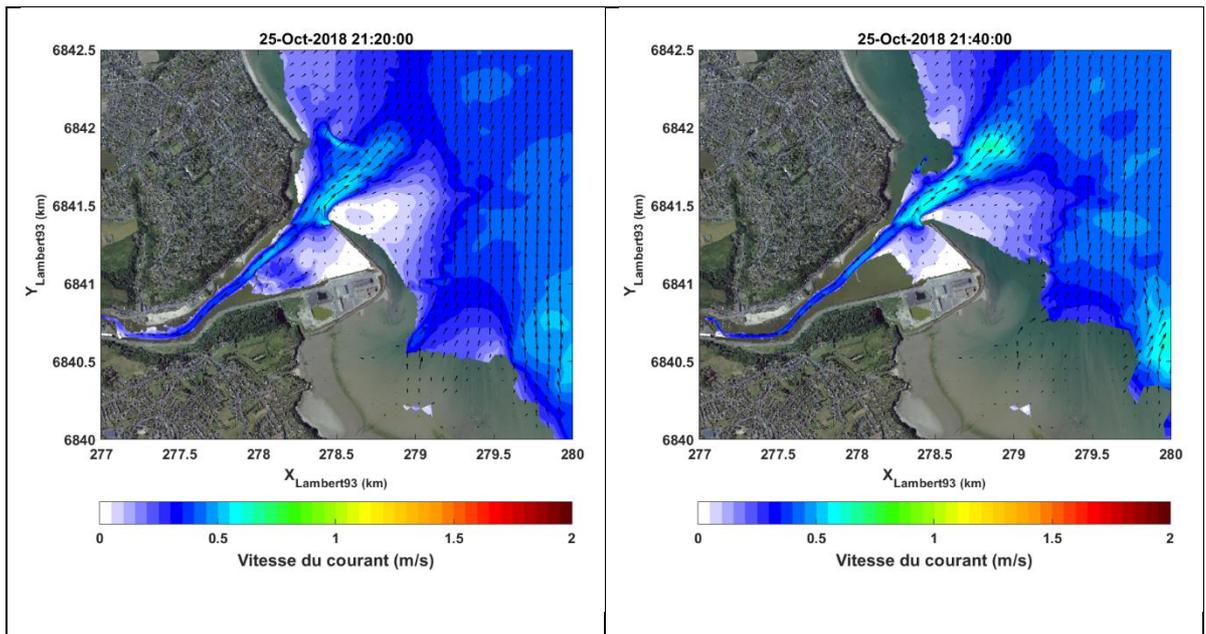


Figure 5-1 Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1.



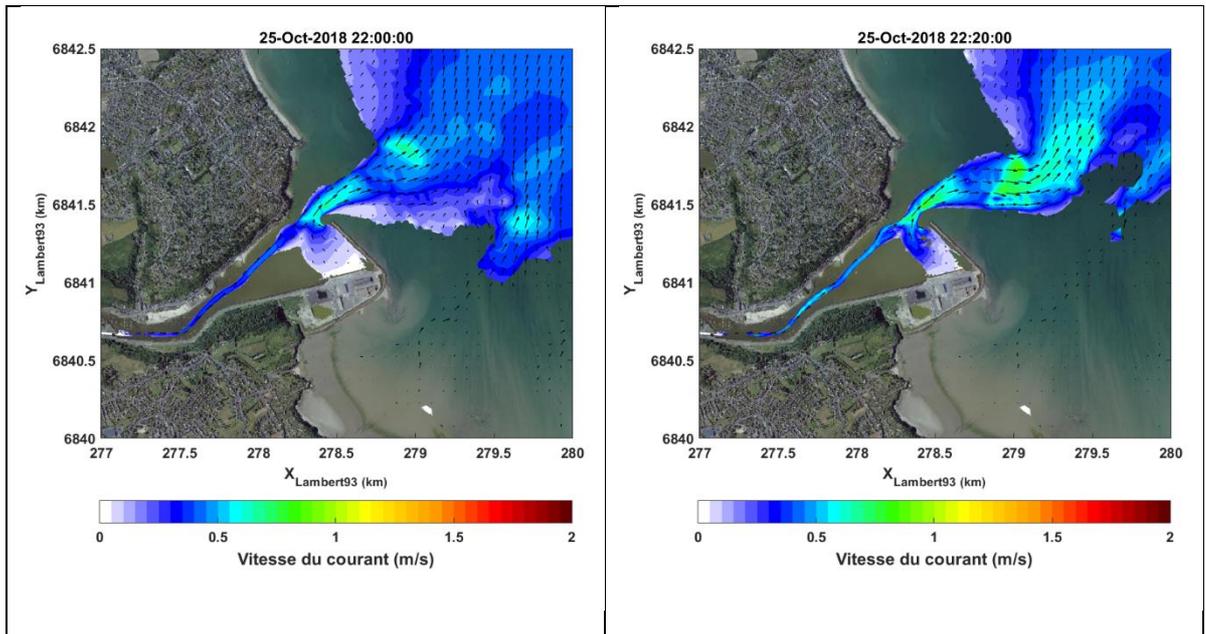


Figure 5-2 Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) - Scénario 1.

Les planches suivantes indiquent pour quatre des scénarios, les courants obtenus au flot et au jusant dans la zone d'étude.

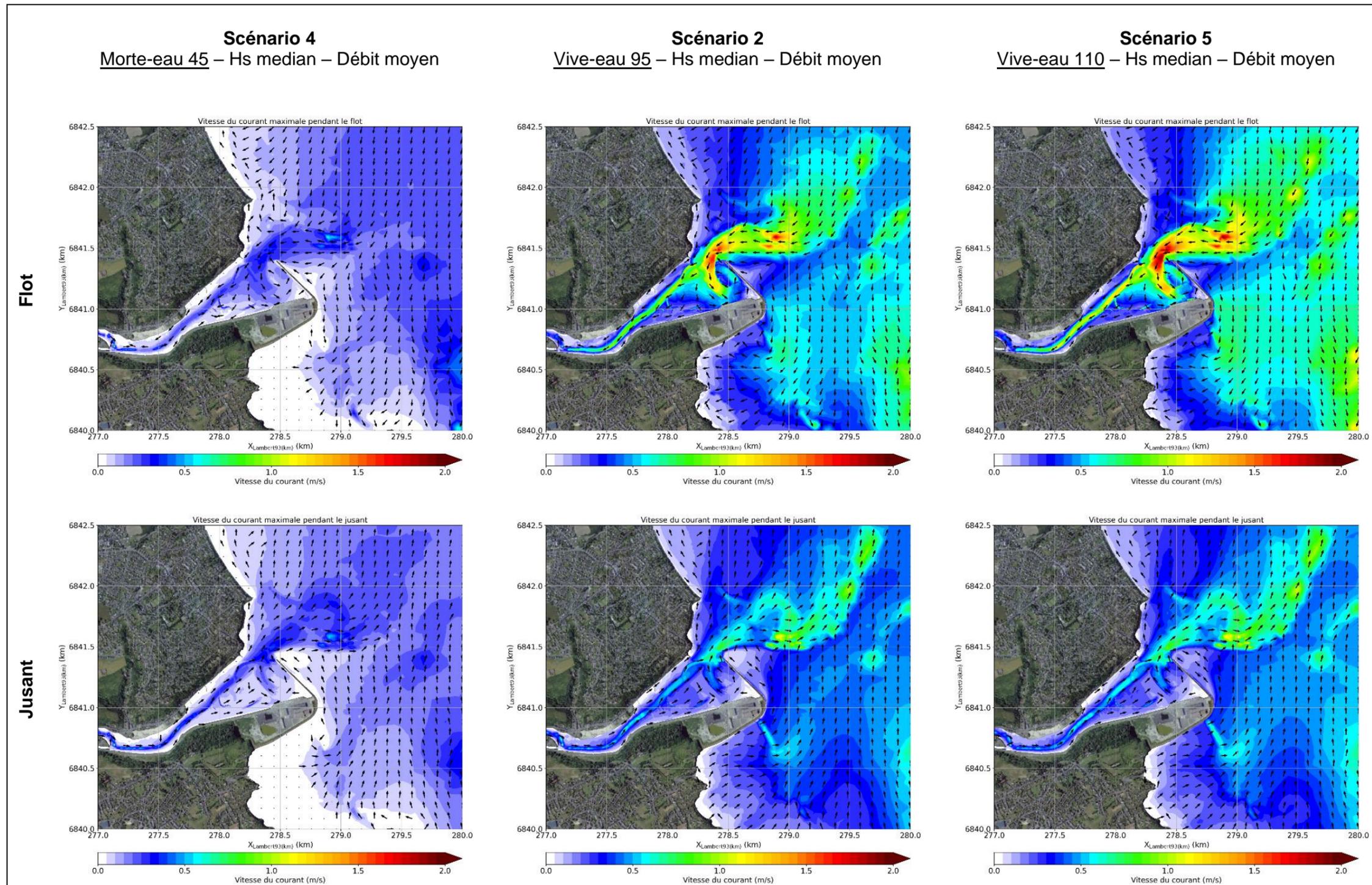


Figure 5-3. Cartographie des courants maximaux pendant la marée montante (haut) et la marée descendante (bas) pour les scénarios 2, 4, 5 : sensibilité des courants à l'intensité de la marée.

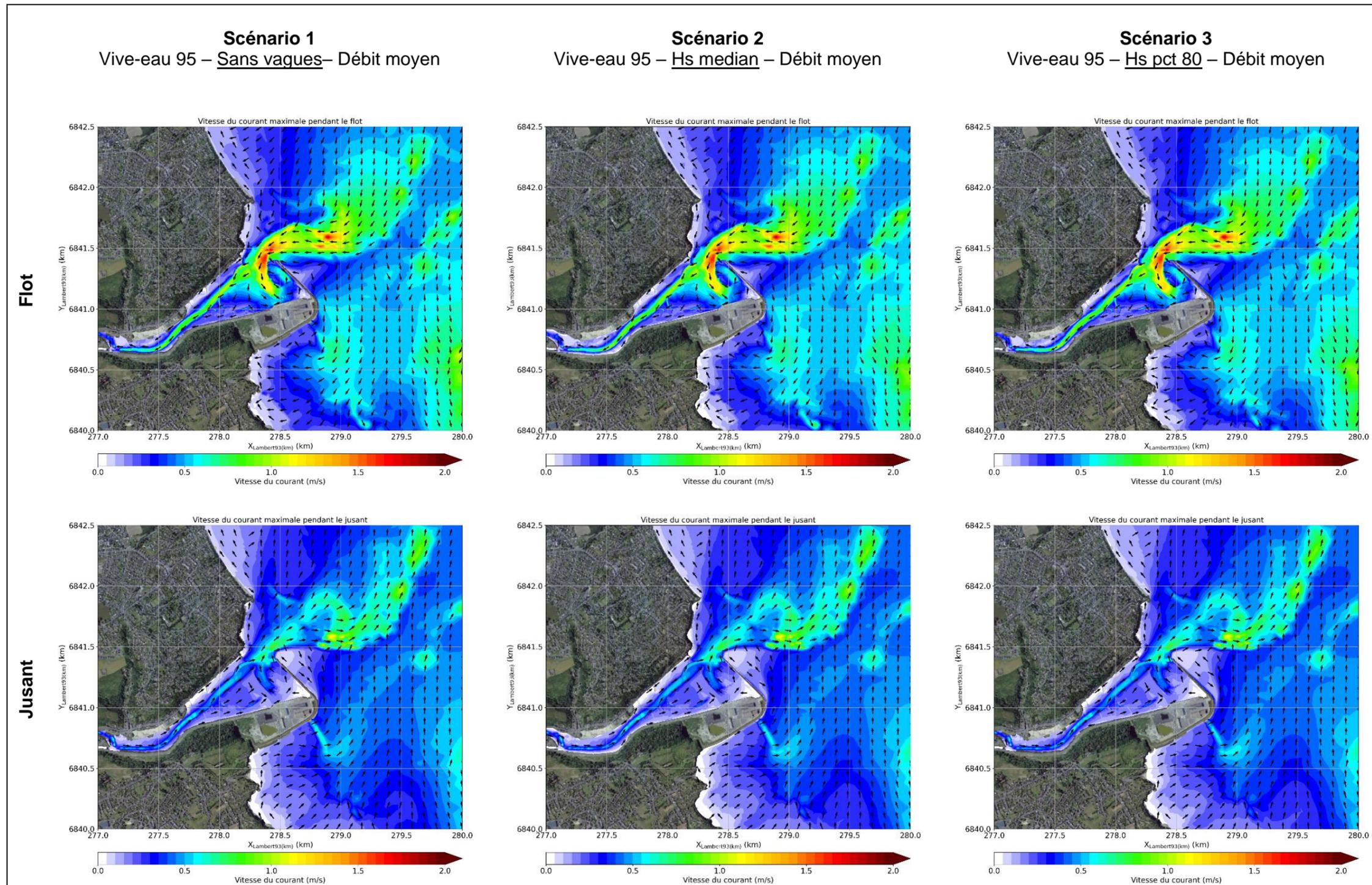


Figure 5-4. Cartographie des courants maximaux pendant la marée montante (haut) et la marée descendante (bas) pour les scénarios 1, 2 et 3 : sensibilité à l'intensité des vagues.

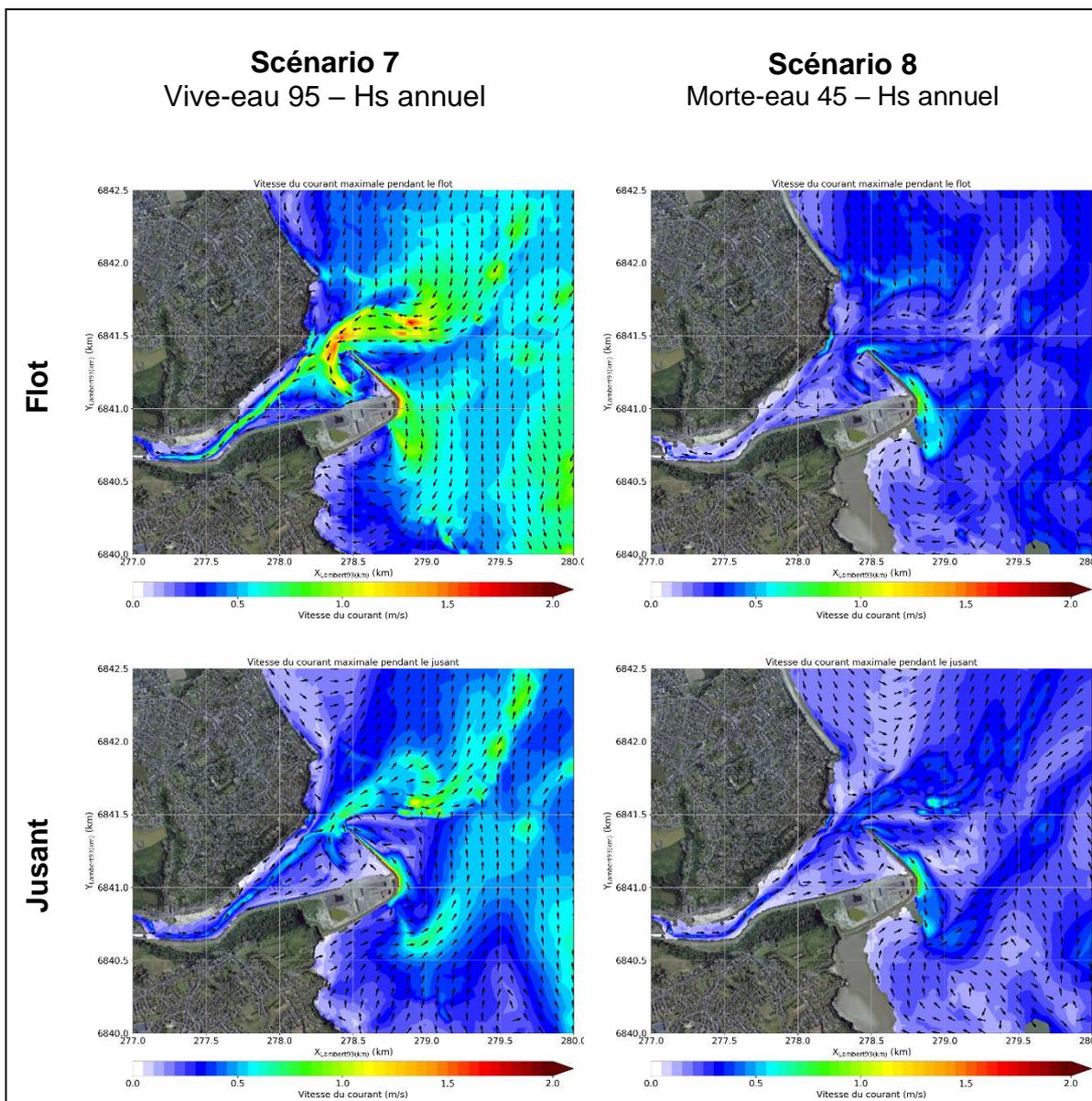


Figure 5-5 Cartographie des courants maximaux pendant la marée montante (haut) et la marée descendante (bas) pour les scénarios 7 et 8 avec un Hs annuel

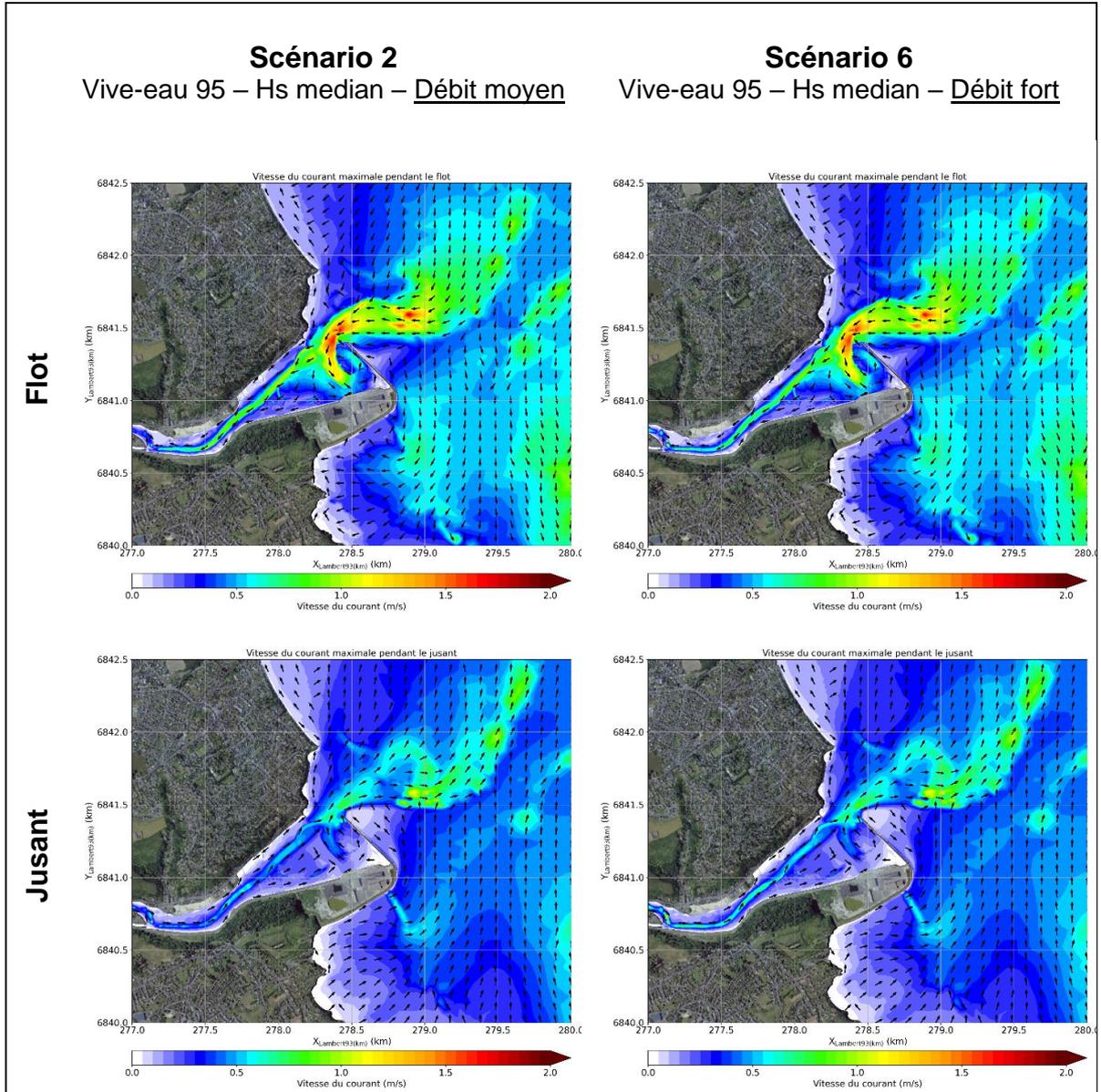


Figure 5-6 Cartographie des courants maximaux pendant la marée montante (haut) et la marée descendante (bas) pour les scénarios 2 et 6 : sensibilité à l'intensité du débit

## 5.2 VAGUES

La Figure 5-7 représente les hauteurs significatives maximales modélisés en chaque point pendant un cycle de marée. Les flèches indiquent la direction des vagues au moment où le maximum de Hs est atteint en ce point.

Pour l'ensemble des scénarios, il apparait clairement que la zone de l'avant-port est abritée des états de mer qui arrivent du large. Parmi les scénarios modélisés, un Hs de 0.5m est dépassé dans l'avant-port uniquement lors d'une condition de Hs annuel en vive-eau.

La sensibilité aux conditions (intensité de la marée, des vagues au large et du débit du Gouët) est présentée :

- Comme attendu, l'intensité des **vagues** dans la zone d'étude est influencée par l'intensité des vagues au large (comparaison scénarios 2, 3 et 7 et comparaison scénarios 4 et 8).
- Le **marnage** (caractérisé par le coefficient de marée) joue un rôle important dans la propagation des vagues jusqu'à la zone d'étude. Plus la marée est importante, plus le Hs maximal atteint (en flot) est élevé (comparaison scénarios 2, 4 et 5 et comparaison 7 et 8).
- Le **débit** du Gouët n'a aucun effet sur les états de mer dans l'avant-port (comparaison scénarios 2 et 6).

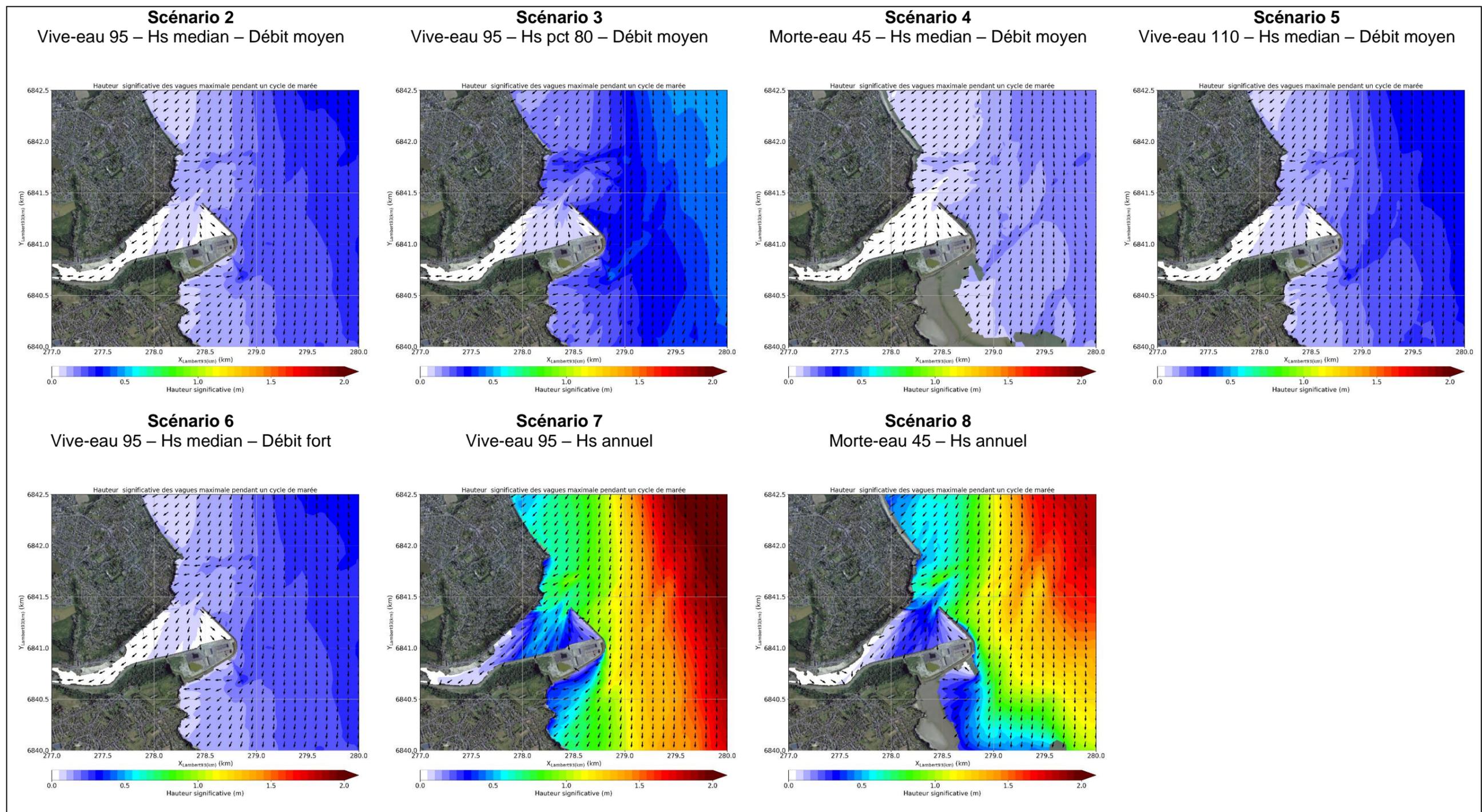


Figure 5-7 Cartographie des hauteurs significatives maximales pendant un cycle de marée pour les différents scénarios. Les flèches indiquent la direction des vagues au moment où le Hs maximal est atteint.

### 5.3 DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

Les modélisations de la dynamique sableuse et vaseuse fournissent différents résultats tels que le transport solide résiduel ou maximal (instantané) sur une marée, l'évolution des fonds (évolution des fonds sableux et dépôt de vases) et les contraintes maximales et moyennes exercées sur le fond susceptible de mettre en mouvement le sédiment. Il est présenté ici quelques résultats. Une analyse plus approfondie au regard des tendances observées est menée par la suite dans le chapitre 6.

#### 5.3.1 DYNAMIQUES DES SABLES

Les cartes de transport résiduel sont présentées Figure 5-8 et les évolutions des fonds Figure 5-9. Il ressort de ces cartes :

- Mise à part les situations de morte-eau (scénario 4 et 8), le transport résiduel est clairement entrant vers l'avant-port (scénarios en vive-eau). Cela se traduit par des évolutions positives (accrétion) dans la zone de dragage de l'avant-port pour ces scénarios en vive-eau alors que les évolutions sont quasi-nulles en morte-eau.
- L'intensité de la marée joue un rôle important sur la quantité de sables susceptible de rentrer dans l'avant-port. Cela rejoint les observations réalisées sur l'asymétrie flot/jusant qui est nettement plus marquée pour les marées de vive-eau et qui est faible pour les marées de morte eau.
- En condition « normale » (moyenne à relativement énergétique Pct80) de vagues, celles-ci ont peu d'effet sur la dynamique sédimentaire dans l'avant-port. Leur effet sur le transport solide est en revanche sensible le long de la digue côté extérieur. En condition annuelle, les vagues amplifient significativement le transport résiduel entrant (entre autres parce que les vagues incidentes sont plus énergétiques en flot qu'en jusant).
- Le débit du Gouet joue sur le transport résiduel en particulier dans le chenal.

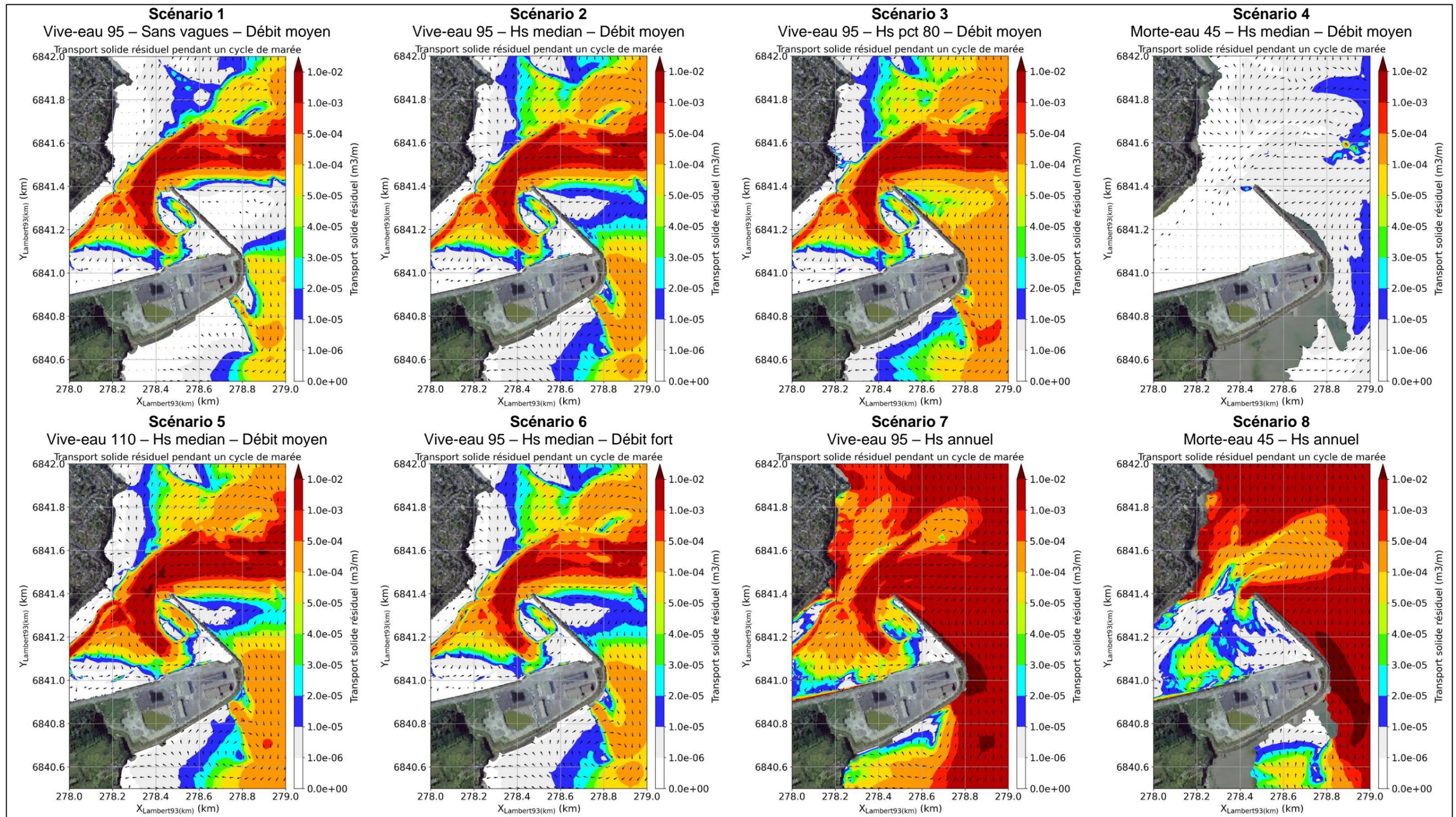


Figure 5-8 Transport solide résiduel au cours d'une marée pour l'ensemble des scénarios courts

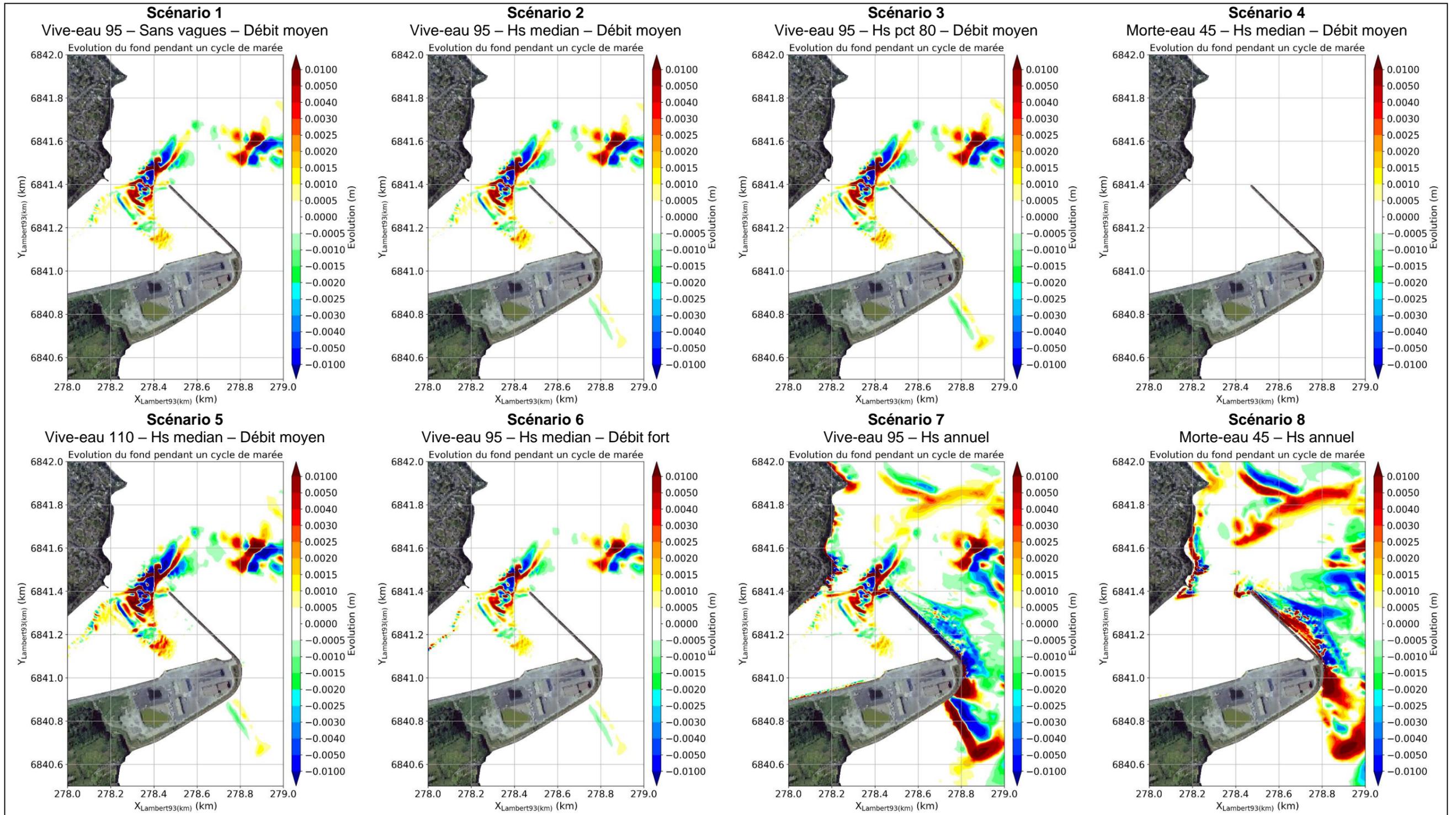


Figure 5-9 Evolution des fonds au cours d'une marée pour l'ensemble des scénarios courts

#### 5.3.2 DYNAMIQUES DES VASES

La dynamique des vases est étudiée à partir des dépôts vaseux et des contraintes exercées sur le fond dans la zone d'étude.

Il apparaît très clairement que les zones où le dépôt est le plus important correspondent aux localisations où la contrainte exercée sur le fond par les courants et les vagues est la plus faible (Figure 5-11 et Figure 5-12).

Les séries temporelles comparées des dépôts et des contraintes (Figure 5-13) mettent en avant la dynamique temporelle de ces dépôts :

- Au point 3, la contrainte reste faible au cours du temps : des dépôts ont donc lieu dès que les masses d'eau chargées en MES arrive sur la zone sans qu'il y ait d'érosion.
- Aux autres points, il y a des épisodes successifs de dépôt et d'érosion :
  - Aux point 2 et 4, les sédiments se déposent lors de l'étalement de pleine mais ces derniers sont érodés au début du flot suivant, puis se redéposent à l'étalement ;
  - Au point 1, les sédiments se déposent lors de l'étalement de pleine puis sont rapidement érodés par les courants de jusant. Les sédiments restants sont érodés lors du flot suivant, puis des particules fines se redéposent à l'étalement ;

Une analyse plus approfondie suivant les scénarios et au regard des tendances observées est menée par la suite dans le chapitre 6

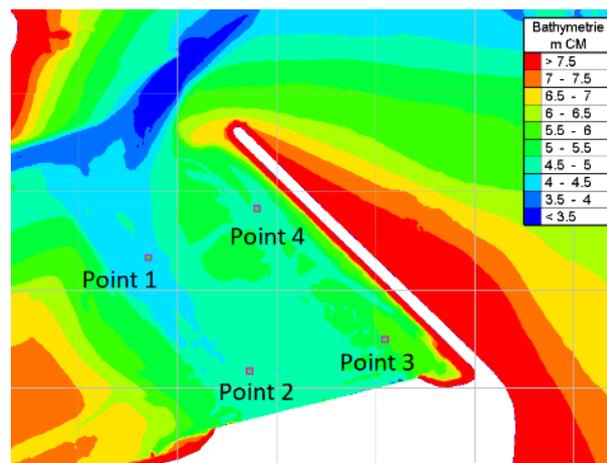


Figure 5-10 Localisation des séries temporelles

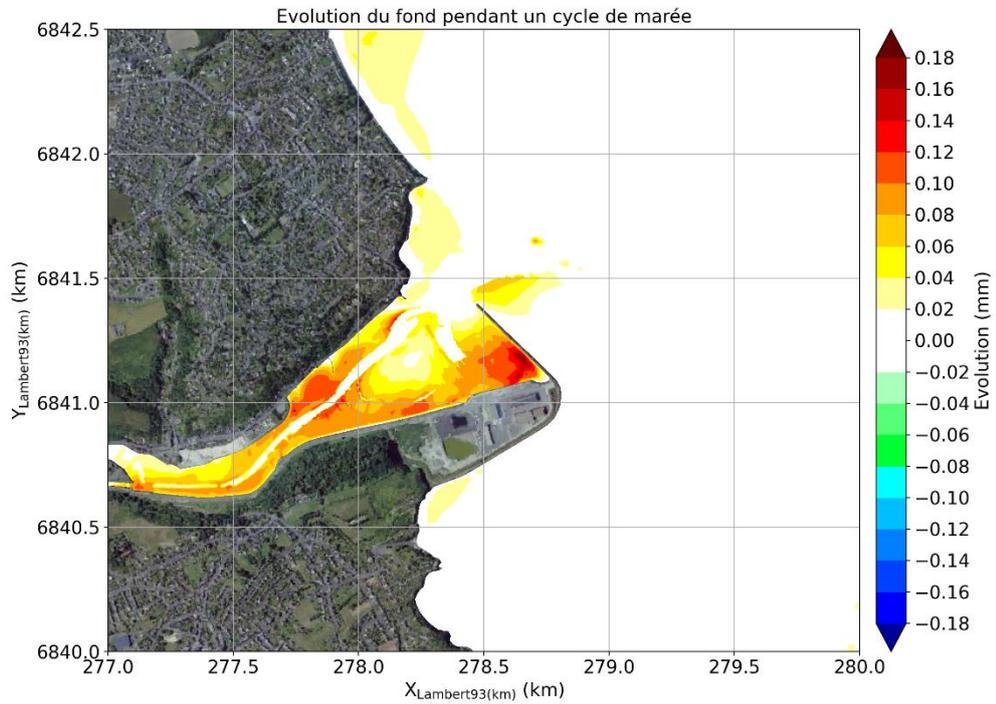


Figure 5-11 Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 2

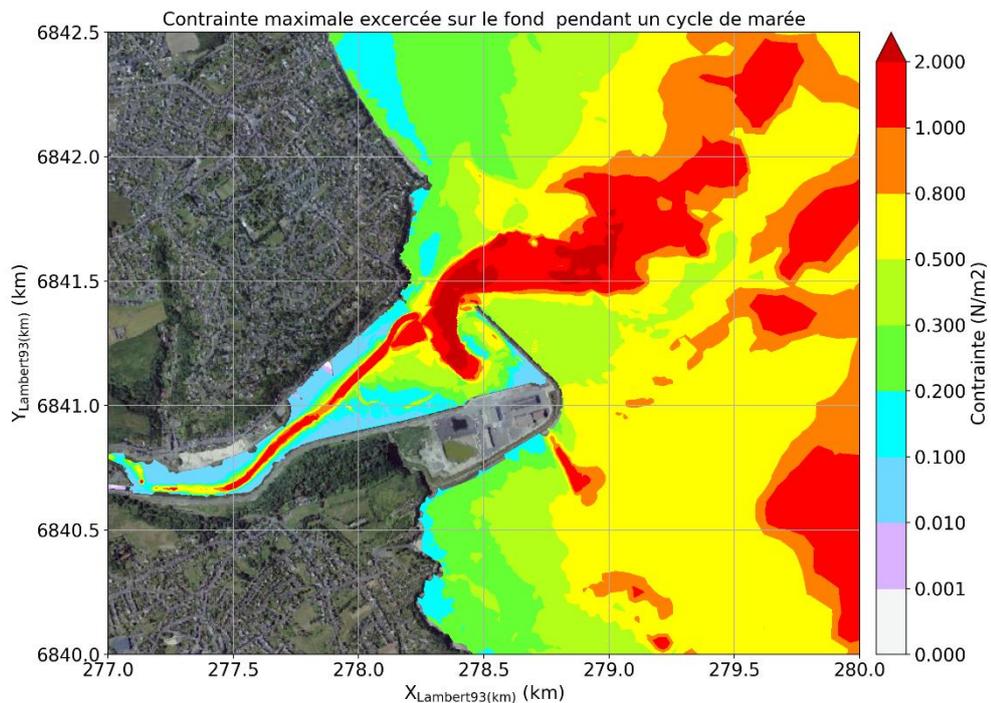


Figure 5-12 Cartographie des maximum de la contrainte exercée sur le fond pour le scénario 2

# Rapport d'avancement de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc

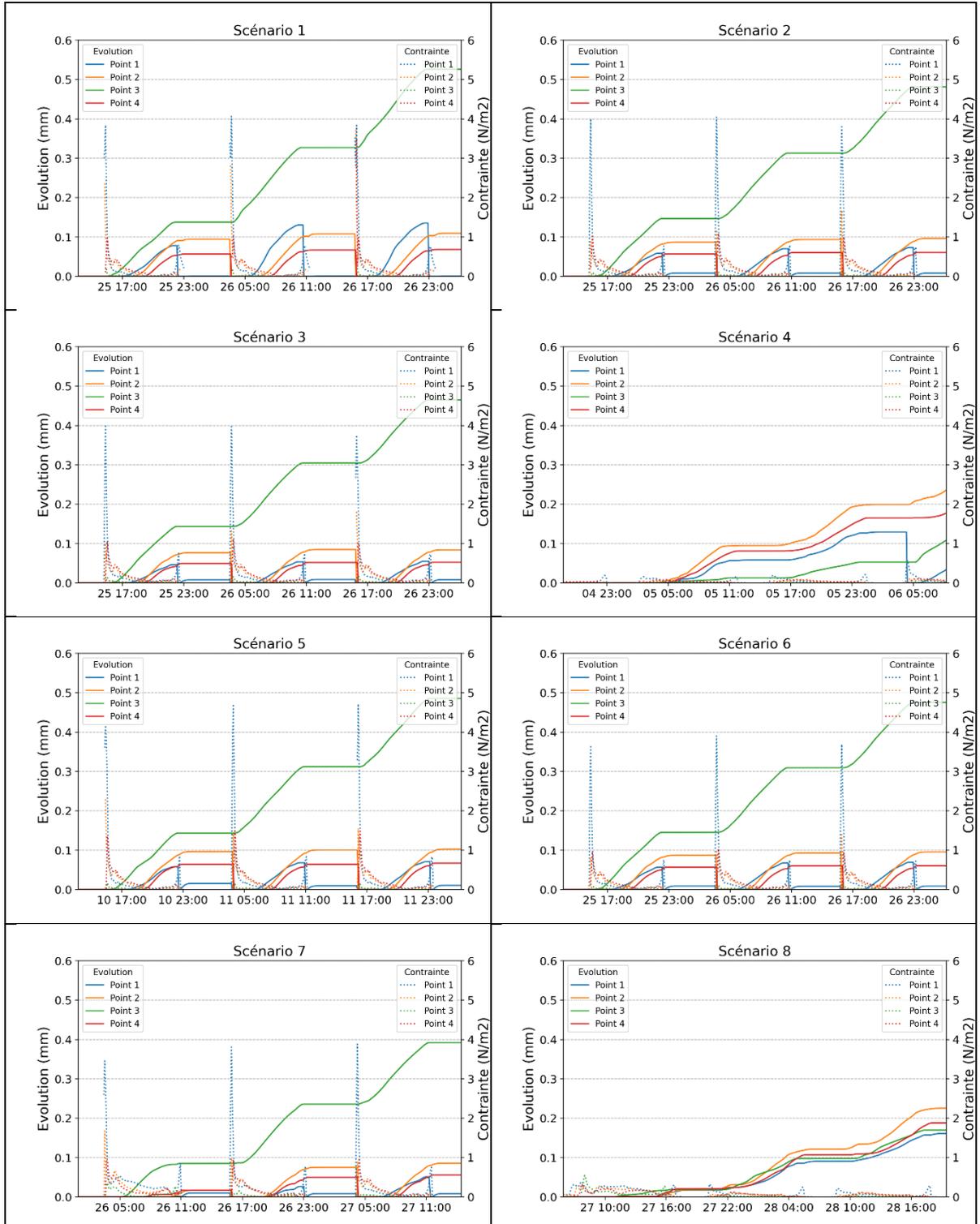


Figure 5-13 Séries temporelles des épaisseurs de dépôt vaseux et des contraintes exercées sur le fond pour les 8 scénarios.

## 6. SYNTHÈSE SUR LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

---

Les résultats d'analyse issus des scénarios de modélisation (simulations courtes sur un ou plusieurs cycles de marée) et de l'exploitation des données bathymétriques et de nature des fonds disponibles sont ici synthétisés afin de dresser une vision globale de la dynamique sédimentaire de la zone dans sa configuration actuelle. Les évolutions morpho-sédimentaires décrites dans la section 2 sont complétées par des sorties spatialisées du modèle hydro-sédimentaire, telles que des champs de contrainte de cisaillement de fond, de flux, ou d'évolutions des fonds.

### 6.1 SECTEUR EN AMONT DE L'ÉCLUSE (BASSINS À FLOT, PORT DE PLAISANCE)

Les levés sur le secteur en amont de l'écluse ont permis de mettre en évidence une tendance nette à l'accrétion entre 2009 et 2021, comprise entre 5 et 15 cm/an soit environ 1 m sur la période, avec des zones de dépôt préférentielles dans le bassin à flot n°2 ainsi que de la partie amont du port de plaisance (jusqu'à 1.5 m localement). Sur l'ensemble de la zone, les volumes déposés sont estimés à 4417 m<sup>3</sup>/an, ce qui est proche du calcul réalisé par le LCHF en 1977 (5000 m<sup>3</sup>/an).

Les analyses historiques de la couverture sédimentaire sur le secteur amont ont mis en évidence que le sédiment était resté essentiellement vaseux depuis la création des bassins jusqu'à aujourd'hui (entre 60 et 80% de vase). On peut néanmoins souligner une légère augmentation de l'envasement sur ce secteur au cours de cette période.

En l'absence de données, les apports solides et les concentrations en MES associés au Gouët ont été estimés grâce à une méthodologie s'appuyant sur les analyses granulométriques réalisées sur des prélèvements sédimentaires du port de plaisance et des bassins à flot, ainsi que sur les évolutions morphologiques intervenues sur le secteur amont entre les différentes dates de levés. Les concentrations en MES sont ainsi estimées entre 3 et 10 mg/l en faisant l'hypothèse d'un sédiment peu floclé.

### 6.2 TENDANCE AU COMPLEMENT SUR LE SECTEUR DE L'AVANT-PORT

#### 6.2.1 RAPPEL DES TENDANCES OBSERVEES

Depuis la construction du terre-plein dans le prolongement de la pointe Cesson en 1984/1985 et du môle en 2000, une tendance générale au comblement s'observe sur le secteur de l'avant-port. Les dépôts intervenant en arrière du môle nécessitent en moyenne le dragage de 120 000 m<sup>3</sup>/an de sédiment afin de maintenir l'accès aux quais. Sur les secteurs non entretenus, des tendances à l'accrétion sont mises en évidence par les levés bathymétriques successifs, notamment sur la vasière au Sud-Ouest de la zone draguée (2.5 cm/an et jusqu'à 5 à 8 cm/an sur son flanc progradant d'environ 5 m/an vers le Nord-Est). Le long de la rive gauche, on peut également noter une progradation de 1 à 2.5 m/an du flanc Nord-Ouest du

---

chenal, associée à un léger approfondissement de ce dernier (0.5 m). Entre fin 2005 et début 2021, environ 100 000 m<sup>3</sup> se sont déposés sur l'ensemble du secteur de l'avant-port, ce qui représente une diminution relative du volume oscillant comprise entre 5 et 10%.

Du point de vue de la nature des fonds, le sédiment est significativement plus vaseux sur cette zone aujourd'hui (qu'ils ne l'étaient avant les aménagements à l'embouchure), en particulier juste derrière le môle, avec des teneurs en vase en moyenne de 40% contre 5% avant les phases d'aménagement (ASTERIE, 2005 ; CCI, 2020). A l'échelle de la zone d'entretien, la fraction vaseuse reste significative (10 à 20 %). Plus en amont (secteur de la Ville-Gillette), les analyses réalisées par la CCI en 2019 montrent une teneur en vase de près de 80%, soit deux fois plus que dans les années 80 (laboratoire régional des Ponts et Chaussées, septembre 1985).

Dans les sections suivantes, les résultats des simulations courtes sont analysés afin d'identifier les processus hydro-sédimentaires à l'origine de ce comblement.

#### 6.2.2 DYNAMIQUE DES SEDIMENTS MARINS

En l'absence de vagues et pour des conditions de marée de VE (coefficient 95, scénario 1), les courants maximums interviennent pendant le flot à l'embouchure de l'estuaire du Gouët. Cette asymétrie de la marée se retranscrit directement sur les contraintes de cisaillement de fond, plus importantes au flot qu'au jusant (Figure 6-1), qui conditionnent l'érosion et le transport des sédiments. Dans les zones chenalées, les contraintes de fond maximales sont généralement supérieures à 1 N/m<sup>2</sup> pendant le flot, avec des valeurs atteignant plus de 2 N/m<sup>2</sup> dans le chenal principal à l'entrée de l'avant-port et dans la zone entretenue par dragage en arrière de la digue. Au pic de jusant, les contraintes sont deux à trois fois plus faibles. Les contraintes de cisaillement de fond associées au pic de flot excèdent largement la contrainte critique de mise en mouvement du sable fin (0.08 N/m<sup>2</sup> pour un sable de 175 µm d'après Wu et Lin, 2014).

Les flux résiduels de sable (intégrés au cours du cycle de marée) sont ainsi très fortement conditionnés par la dynamique du flot (Figure 6-2). Les flux résiduels de sable sont orientés vers l'amont à l'entrée de l'avant-port, et indiquent une tendance au comblement de ce secteur. On peut souligner que cette dynamique résiduelle en faveur du flot est simulée plus largement à l'échelle de l'anse d'Yffiniac (Figure 6-3).

On distingue néanmoins quelques secteurs isolés dominés par le jusant (e.g. plus au large ou proche des chenaux), et notamment à proximité de l'endiguement. Ce point est plus largement détaillé dans la section 6.3.

La tendance au comblement du secteur de l'avant-port est claire sur les cartes d'évolution des fonds. Le piégeage des fines en arrière du môle est mis en évidence par le modèle, avec une accrétion moyenne de l'ordre de 0.1 mm de vase par cycle de marée à l'échelle de la zone entretenue par dragage (Figure 6-1). Les contraintes de fond nettement plus faibles au jusant (par rapport au flot) limitent la remise en suspension des vases déposées pendant l'étale de pleine mer. Concernant le sable, l'accrétion est plus localisée mais atteint 2 mm par cycle de marée (Figure 6-2). Les bilans sédimentaires issues des simulations sur 15 jours (analyse de sensibilité pour différents diamètres de sable ; section 5.3.1) et sur une année complète (sections 7.2.1 et 7.3.1.2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) mettent en évidence des volumes de sable et de vase déposés cohérents par rapport aux quantités dragués sur la zone d'entretien (i.e. 100 000 à 120 000 m<sup>3</sup>/an en moyenne, avec 10 à 20% de vase). Les résultats du modèle sont donc cohérents du point de vue de :

- De la tendance au comblement observée à partir des suivis bathymétriques ;
- Des épaisseurs de sable et vase déposées, qui sont en accord avec l'ordre de grandeur des volumes dragués annuellement afin de maintenir l'accès aux quais ;
- De la répartition spatiale des fractions sableuse et vaseuse, avec une part de fines plus importante directement en arrière de la digue (cf. analyses de la campagne ASTERIE de 2005).

La prise en compte ou non des vagues dans les simulations courtes (Hs médian ou percentile 80) démontre bien que l'asymétrie de la marée constitue le mécanisme principal expliquant la dynamique de comblement sur le secteur de l'avant-port. Pour une même condition de vive-eau, les évolutions morphologiques associées à la dynamique sableuse sont très proches avec ou sans vagues sur le secteur de l'avant-port (Figure 6-2). L'effet des vagues sur l'intensité des flux sableux est néanmoins conséquent voire dominant sur certaines zones à l'extérieur du port. Concernant la dynamique vaseuse, les vagues tendent à limiter les dépôts sur de larges zones à l'extérieur du port du fait de leur contribution importante aux contraintes de cisaillement de fond, en particulier à certains moments de la marée propices au dépôt tels que les étales (Figure 6-1). Cet effet se ressent légèrement sur les dépôts à l'intérieur de l'avant-port, avec des épaisseurs de vase localement moins importantes.

En conditions de morte-eau, les flux de sables sont au moins 2 à 3 ordres de grandeurs plus faibles qu'en vive-eau, avec un transport résiduel qui reste globalement en faveur du flot (Figure 6-5). Au niveau de la zone de dragage, les évolutions morphologiques associées à la dynamique sableuse sont inférieures à 0.5 mm par cycle de marée. Concernant la vase, les épaisseurs déposées sur un cycle de marée sont en moyenne 5 fois plus faibles qu'en vive-eau (environ 0.02 mm ; Figure 6-4).

### 6.2.3 INFLUENCE DU GOUËT

En comparaison aux autres forçages hydrodynamiques, le débit du Gouët n'influence pas significativement la répartition des dépôts vaseux intervenant dans l'avant-port à l'échelle d'un cycle de marée (Figure 6-6). On peut souligner un effet ténu sur la partie la plus amont de l'avant-port, avec des épaisseurs déposées légèrement plus faibles en imposant un débit fort de 12 m<sup>3</sup>/s (percentile 98).

La contribution des apports solides du Gouët à la dynamique sédimentaire de l'avant-port a été évaluée grâce au modèle en prescrivant uniquement une source de matière en suspension en amont du port de plaisance (i.e. à la limite amont du domaine de calcul). Le paramétrage du modèle a volontairement été défini afin de favoriser l'export de sédiment vers l'aval (condition majorante) :

- Une concentration de vase importante de 10 mg/l, combinée à un débit soutenu de 12 m<sup>3</sup>/s (percentile 98) ;
- Une condition de marée de vive-eau (coefficient 95)

On peut souligner que la simulation tient également compte d'une condition de Hs médian. Elle est donc comparable au scénario 6 du point de vue des forçages hydrodynamiques.

La Figure 6-7 illustre les épaisseurs de vase progressivement déposées en aval du déversoir au cours de 4 cycles de marée. Après un cycle de marée, les dépôts associés aux apports amont restent cantonnés en amont du quai de la Ville-Gillette, zone caractérisée par la présence de nombreuses banquettes de vase. Sur le secteur de l'avant-port entretenu par

dragages, les épaisseurs déposées ne sont pas significatives (de l'ordre du  $\mu\text{m}$ ) en comparaison aux évolutions des fonds associées aux apports de vases marines sur le même laps de temps. Après plusieurs cycles de marée, les épaisseurs déposées augmentent progressivement sur la partie amont de l'avant-port, sans influencer la zone d'entretien en arrière du môle. On peut souligner que des dépôts vaseux sont néanmoins visibles dans le chenal principal jusqu'à l'embouchure.

Les résultats de modélisation permettent donc de conclure que les sédiments vaseux apportés par le Gouët ne contribuent pas de façon significative à la dynamique de comblement du secteur de l'avant-port en arrière du môle.

### 6.3 DYNAMIQUE DEVANT LE MOLE ET SUR LE SECTEUR DE LA FLECHE SEDIMENTAIRE

#### 6.3.1 RAPPEL DES TENDANCES OBSERVEES

Depuis sa construction en 2000, une tendance à l'accrétion apparaît clairement devant le môle, à l'image des évolutions entre 1983 et 2005 montrant un exhaussement des fonds de 1.5 à 2 m à l'extrémité du terre-plein/enracinement du môle, et laissant entrevoir le développement d'une flèche sédimentaire. Depuis 2007, l'essentiel des sédiments dragués dans l'avant-port est déposé devant le môle. Les évolutions morphologiques montrent une tendance marquée à l'accrétion à l'échelle de la zone de dépôt (+ 8 000  $\text{m}^3/\text{an}$ ), avec des épaisseurs déposées entre 2007 et 2020 en moyenne de 1 m, et atteignant localement jusqu'à 3 m au plus près de la digue à environ 300 m du musoir. Depuis l'arrêt des dépôts de dragage devant le môle en juin 2020, l'excédent sédimentaire issu des dragages a fortement été érodé (0.5 à 1 m entre mars 2020 et mars 2021).

Depuis le premier levé bathymétrique récent disponible sur ce secteur (Novembre 2005), une flèche sédimentaire majoritairement sableuse (cf. analyses granulométriques de 2012 et 2013) s'est formée depuis l'extrémité du terre-plein, avec une accrétion très marquée atteignant 2.5 à 3 m (+ 10 900  $\text{m}^3/\text{an}$ ). Bien qu'on puisse supposer qu'une flèche se soit également développée entre 2000 et 2005, la dynamique de celle mise en évidence sur les levés récents semble être influencée par les dépôts de dragage devant le môle. En effet, une phase de croissance importante a notamment été observée entre 2007 et 2009. La flèche sableuse montre un comportement dynamique avec des phases d'accrétion (e.g. entre 2017 et 2018) et d'autres périodes caractérisées par une migration importante (e.g. entre 2020 et 2021). Au fur et à mesure de sa migration vers la plage du Valais, la morphologie sableuse semble s'aplanir progressivement.

Depuis que les dragages sont en partie déposés devant le môle, la fraction vaseuse dans le sédiment superficiel est passée de 5% au maximum à 10% en moyenne sur ce secteur. Sur la flèche, les quelques analyses sédimentaires disponibles indiquent une teneur en fines comprise entre 5 et 20%.

#### 6.3.2 ANALYSE DES RESULTATS DE MODELISATION

La zone extérieure située devant le môle est caractérisée par une divergence des flux sableux lors du flot, quel que soit le marnage ou les conditions de vagues simulées (Figure 6-2 ; Figure 6-5). Sur la portion proche du musoir, les flux sableux sont orientés vers l'avant-port tandis qu'ils sont dirigés vers l'anse d'Yffiniac à la jonction de la digue et du terre-plein de la pointe Cesson. Les cartes de transport résiduel de sable montrent que le flot est

également dominant par rapport au jusant devant le môle. A l'extrémité de la pointe Cesson, le transport résiduel de sable vers le Sud-Est s'intensifie très significativement avec le marnage (2 ordres de grandeur de différence entre ME et VE ; Figure 6-5), et augmente à mesure que les vagues deviennent plus énergétiques (Figure 6-2, Figure 6-8). Ce schéma de transport sédimentaire explique la tendance à l'accrétion au Sud de l'endigement, avec la formation d'une flèche sableuse dans le prolongement de ce dernier. Pour des conditions de vagues énergétiques, les évolutions morphologiques sur le secteur de la flèche peuvent atteindre plusieurs centimètres sur un cycle de marée. Il est donc probable que les événements extrêmes contribuent de façon substantielle à la morphodynamique du secteur de la flèche sur des laps de temps courts.

L'implication des dépôts dragage dans le développement et la dynamique de la flèche sableuse sera plus finement abordée dans le cadre de la phase 3. Néanmoins, plusieurs éléments laissent penser que leur contribution est importante :

- le phasage entre le début des dépôts et le développement de la flèche ;
- l'orientation des flux sableux (cf. Figure 6-8 ; Figure 6-9) vers le Sud-Est à l'endroit où les dépôts sont les plus concentrés devant le môle (zones D4 et D5).
- La différence d'intensité sur les flux résiduels de sable (intégrés sur 15 jours) obtenus avec le modèle en fonction de la prise en compte ou non de la zone de dépôt devant le môle (section 5.3.1) : les flux orientés vers le Sud-Est sont au moins un ordre de grandeur plus faibles sur les sous-zones D5 et D6 lorsque la zone de dépôt est arasée à la cote +6.5 m CM. Les dépôts de dragage dans ces secteurs contribuent donc significativement à l'amplification du transport de sable en direction de la flèche.

Par ailleurs, on peut souligner que les flux résiduels de sable sont orientés en direction de l'avant-port sur les rangées 1 à 3 de la zone théoriquement prévue pour les dépôts de dragage (Figure 6-8). Bien que les quantités de sédiment déposées dans ces zones soient globalement moins importantes (e.g. suivi détaillé de 2019), la morphologie de la zone de dépôt conduit à une augmentation d'un ordre de grandeur des flux résiduels en direction de l'avant-port (sous-zones D1, D2 et E1), en comparaison à une simulation où la bathymétrie est arasée à la cote +6.5 m CM (cf. section 7.3). Les résultats de modélisation présentés dans la section, indiquent que l'effet morphodynamique des dépôts des sédiments dragués devant le môle contribue à 15% de l'ensablement de l'avant-port (taux de retour). A noter que les résultats du modèle (section 7.3.1.2) montrent également qu'une proportion significative des dépôts vaseux de dragage reviennent dans l'avant-port (22% sur une année complète).

La dynamique de la flèche sableuse est caractérisée par des phases de migration en direction de la plage du Valais, qui peuvent s'expliquer par la contribution dominante du flot au transport résiduel de sable depuis l'extrémité du terre-plein jusqu'au flanc Nord-Est de la flèche, et par l'amplification substantielle de ce transport préférentiel pour des conditions de vagues énergétiques. Dans la configuration morphologique actuelle des fonds, le transport résiduel de sable sur le flanc Sud-Ouest de la flèche est néanmoins dominé par le jusant, ce qui contribue très probablement à son maintien, voire à son exhaussement. En effet, le flot et le jusant dominant respectivement de part et d'autre de la flèche, créant ainsi une zone de convergence et donc d'accumulation sédimentaire.

D'après les cartes d'évolution des fonds issues du modèle, la flèche est essentiellement alimentée par du sable. Néanmoins, il est possible qu'une partie de la fraction vaseuse des

dépôts de dragage devant le môle soit préférentiellement redistribuée sur ce secteur (cf. analyses granulométriques de 2012 montrant une teneur en vase de 20%). Ce point sera plus largement abordé lors de la phase 3.

#### 6.4 DYNAMIQUE DE L'ESTRAN AU DROIT DE LA PLAGE DU VALAIS

L'analyse des évolutions morphologiques à partir des suivis bathymétriques sur le secteur de la plage du Valais a permis de mettre en évidence un exhaussement des fonds de l'estran au cours du temps. Sur la période 2005-2020, l'accrétion marquée au niveau de la flèche (2 m) diminue progressivement en direction de la plage du Valais (0.5 m). Par ailleurs, les analyses granulométriques réalisées en 2012 sur ce secteur ont mis en évidence une fraction vaseuse d'environ 25%, plus importante que dans les zones à proximité (e.g. environ 5% de vase à la station témoin).

En l'absence de vagues, les résultats du modèle mettent en évidence une zone de dépôt préférentielle de vase devant la plage du Valais (Figure 6-1). En effet, au droit de la plage, les contraintes diminuent progressivement de 0.3 N/m<sup>2</sup> derrière la flèche à moins de 0.1 N/m<sup>2</sup> proche de la côte pendant le pic de flot. La prise en compte des vagues conduit à une augmentation des contraintes de cisaillement près du fond, et limite ainsi les dépôts de vase sur ce secteur au cours du cycle de marée (cf. contribution des vagues aux contraintes maximales de flot et de jusant sur la Figure 6-1). Les résultats de modélisation présentés sur une année complète (section 7.2.2) confirment qu'une tendance à l'envasement intervient sur le secteur de la plage du Valais, avec un dépôt vaseux le long de la bordure Sud-Est du terre-plein.

Cette tendance à l'envasement sur l'estran de la plage du Valais, en particulier pour des conditions de vagues faiblement énergétiques, résulte de l'influence combinée de deux facteurs favorisant le piégeage des fines. Tout d'abord le terre-plein de la pointe Cesson atténue fortement les conditions de vagues et influence probablement les circulations hydrodynamiques. Ce point sera plus largement investigué dans la phase 2 de l'étude. D'autre part, la flèche sableuse localisée dans le prolongement du môle dissipe en partie l'énergie des vagues incidentes, à l'image des gradients sur les contraintes de cisaillement de fond, maximales sur le flanc exposé (NE) de la flèche puis diminuant fortement en allant vers la côte. Elle agit ainsi comme un facteur limitant supplémentaire de l'hydrodynamisme sur l'estran et la plage du Valais, ce qui induit d'une part une réduction des contraintes de cisaillement à la côte, favorisant ainsi le dépôt des sédiments fins, et d'autre part limite l'action de reprise des sédiments par les courants de jusant. La contribution potentielle de la fraction vaseuse contenue dans les dépôts de dragage au piégeage de fines dans ce secteur sera évaluée dans la phase 3. Néanmoins, les premiers résultats de modélisation présentés dans la section 7.3.2 montrent qu'une partie des dépôts vaseux de dragage initialisés devant le môle sont ensuite transportés en direction de la plage du Valais, avec un dépôt intervenant le long de la bordure Sud-Est du terre-plein.

Concernant la dynamique sableuse, les flux résiduels sont dominés par le flot et sont ainsi orientés vers la côte. L'intensité des flux augmente très significativement (plusieurs ordres de grandeur) avec le marnage ou à mesure que les vagues deviennent plus énergétiques (Figure 6-2 ; Figure 6-5). Le stock sableux accumulé dans le prolongement du môle alimente donc un transport accru vers la plage du Valais, diminuant vers la côte, expliquant l'exhaussement de l'estran au droit de la plage.

#### 6.5 LIMITATIONS DE LA MODELISATION

D'une manière générale, les résultats de modélisation ont montré une bonne cohérence par rapport aux évolutions morpho-sédimentaires observées à partir des données disponibles sur la zone (bathymétrie, nature des fonds). Les bilans sédimentaires sur la zone d'entretien de l'avant-port sont cohérents avec les quantités de sédiment draguées annuellement pour maintenir l'accès aux quais.

Néanmoins, il est important de rappeler qu'un certain nombre d'hypothèses ont été réalisées sur le paramétrage du modèle sédimentaire, notamment afin d'obtenir le meilleur compromis entre la représentation des processus physiques et des temps de calcul acceptables. Concernant la dynamique du sable, le choix de ne considérer qu'une seule classe constitue une simplification importante compte tenu de la diversité des faciès sédimentaires intervenant sur la zone d'étude (e.g. présence de sables grossiers, de débris coquilliers). La prise en compte de plusieurs classes de sédiments non-cohésifs dans le modèle pourrait ainsi affiner significativement les schémas de transport (e.g. effets de masquage/exposition influençant l'érosion, modulations locales de flux). Les effets sur les évolutions morphologiques des fonds seraient également importants dans les zones caractérisées par des conditions hydrodynamiques énergétiques (e.g. chenaux). De plus, la prise en compte de distributions réalistes des faciès sédimentaires (horizontales et verticales) constituerait une amélioration substantielle de la modélisation.

D'autre part, les dynamiques du sable et de la vase ont été simulées séparément. Ce choix présente l'avantage de simplifier grandement les analyses étant donné la complexité des interactions susceptibles d'intervenir entre le sable et la vase. En effet, la présence de vase au sein d'une matrice sableuse peut fortement influencer l'érodabilité du mélange dans son ensemble (contrainte critique d'érosion, taux d'érosion), avec des effets non linéaires en fonction de la fraction vaseuse. La prise en compte des interactions sable/vase dans une même simulation constituerait donc une amélioration notable de l'approche de modélisation. D'autre part, la prise en compte du processus de consolidation des sédiments pourrait permettre d'affiner la dynamique dans les zones préférentielles de dépôt de vase telles que l'avant-port (e.g. évolutions morphologiques des fonds, modulation locale de l'érodabilité du sédiment).

*Sensibilité des contraintes de fond et des dépôts vaseux aux vagues (en condition de VE C95)*

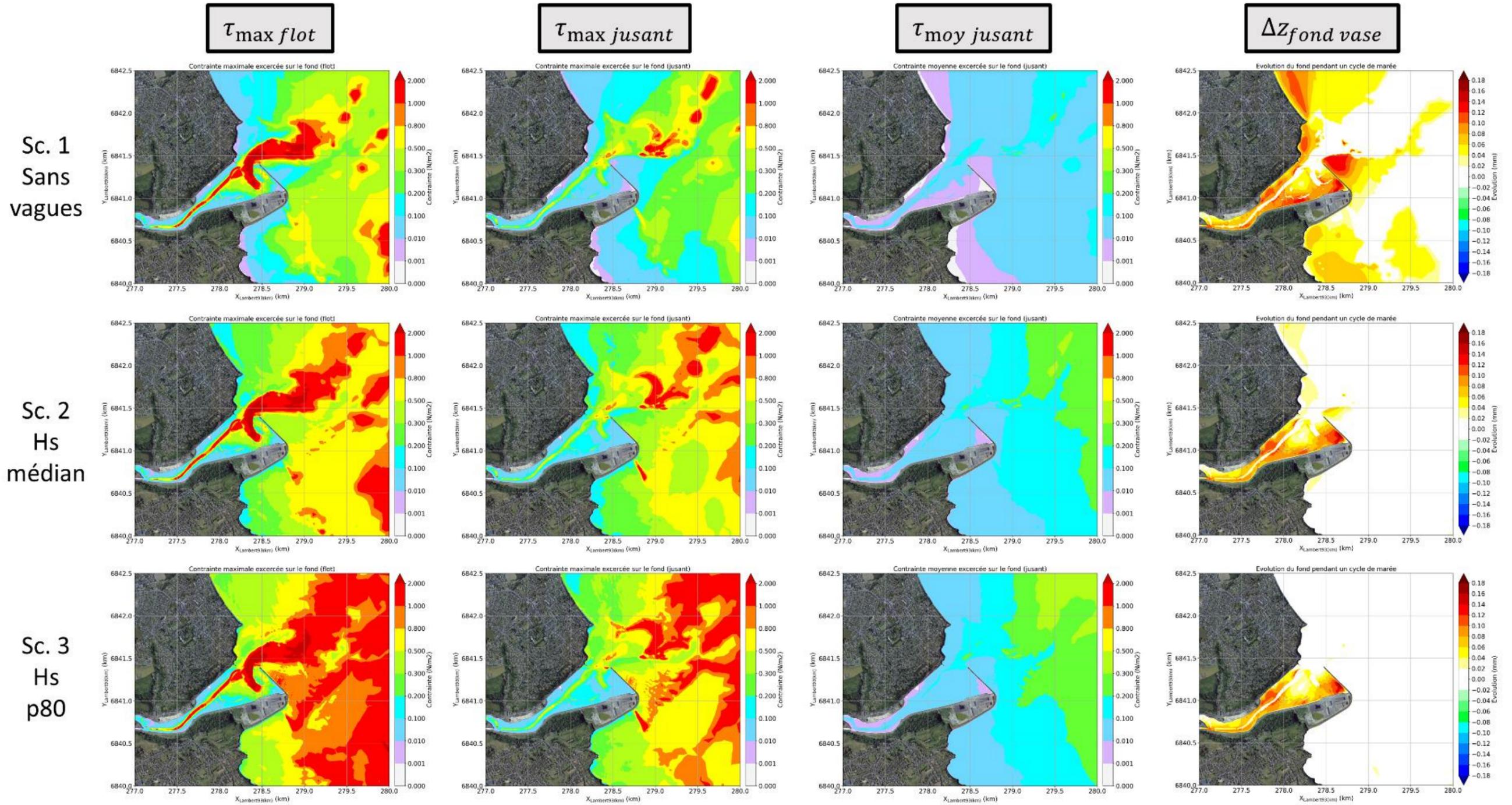


Figure 6-1 Résultats de contraintes de cisaillement près du fond (maximale ou moyenne) pendant le flot et le jusant, et épaisseurs des dépôts vaseux simulées avec le modèle hydro-sédimentaire, en marée de vive-eau (coefficient 95) et pour différentes conditions de vagues (scénarios 1, 2 et 3).

Sensibilité de la dynamique sableuse aux vagues (en condition de VE C95)

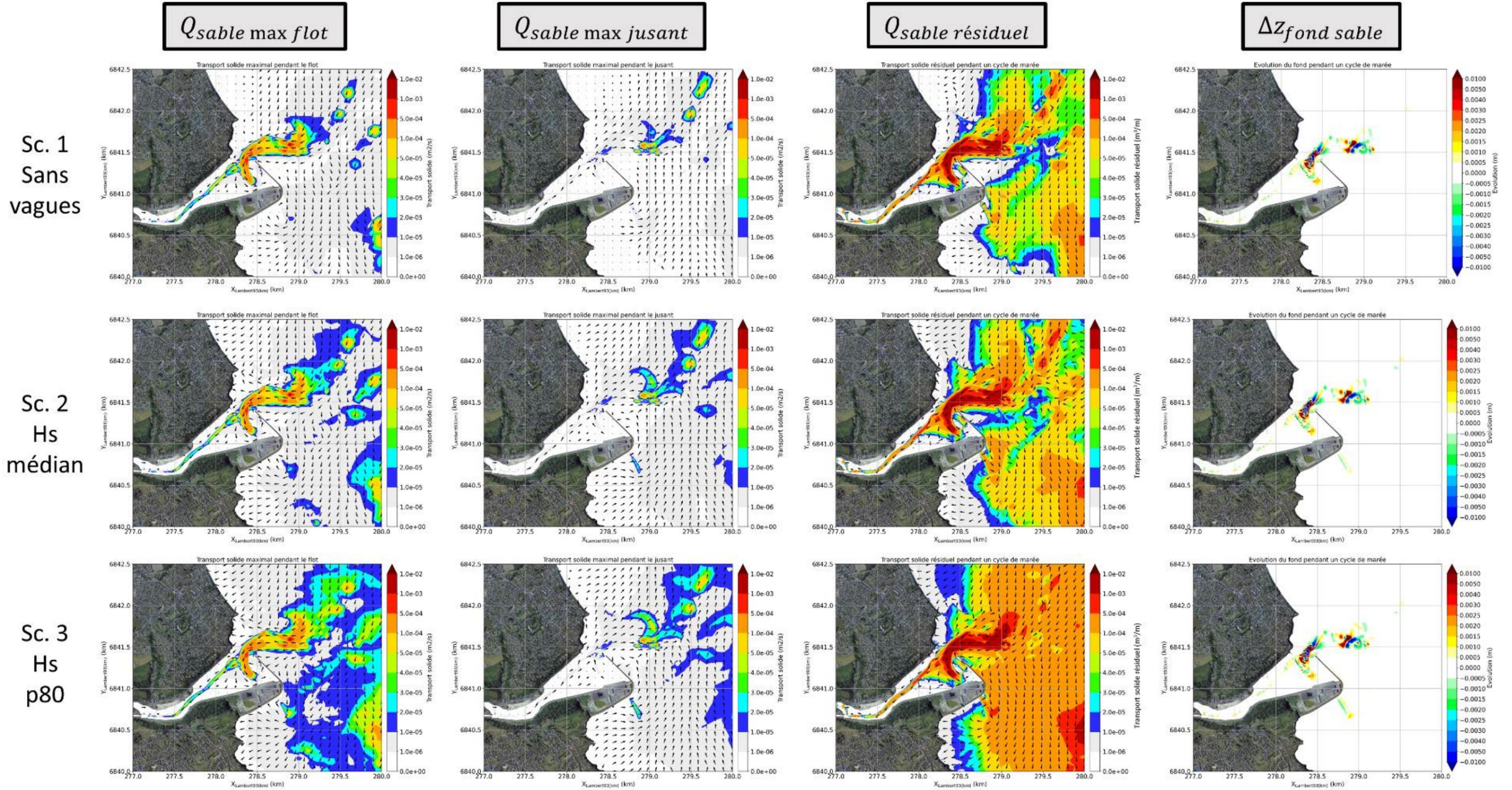


Figure 6-2 Résultats de flux de sable (maximum flot/jusant ou résiduel sur un cycle de marée), et épaisseurs des dépôts sableux simulées avec le modèle hydro-sédimentaire, en marée de vive-eau (coefficient 95) et pour différentes conditions de vagues (scénarios 1, 2 et 3).

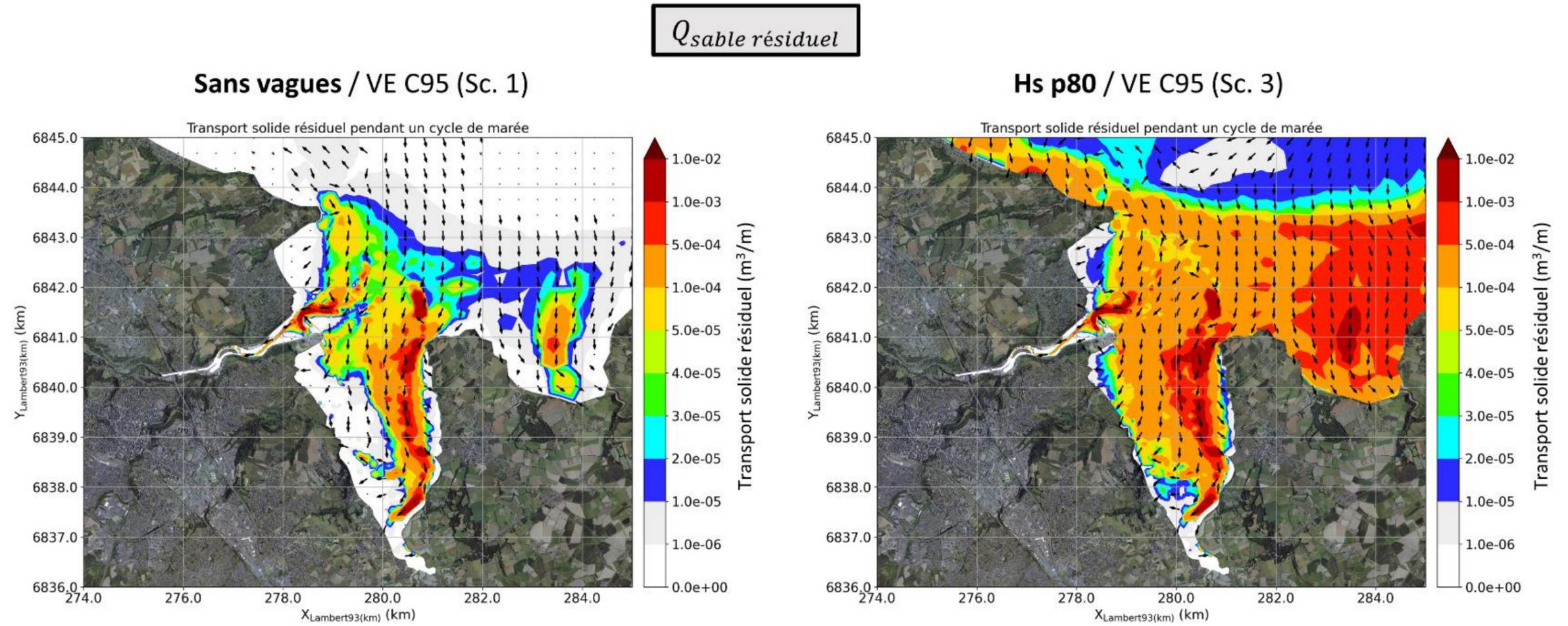


Figure 6-3 Cartes de flux résiduels de sable simulés avec le modèle hydro-sédimentaire en marée de vive-eau (coefficient 95), avec (percentile 80 Hs ; scénario 3) ou sans (scénario 1) prise en compte de l'effet des vagues.

Sensibilité des contraintes de fond et des dépôts vaseux à la marée (en considérant un Hs médian)

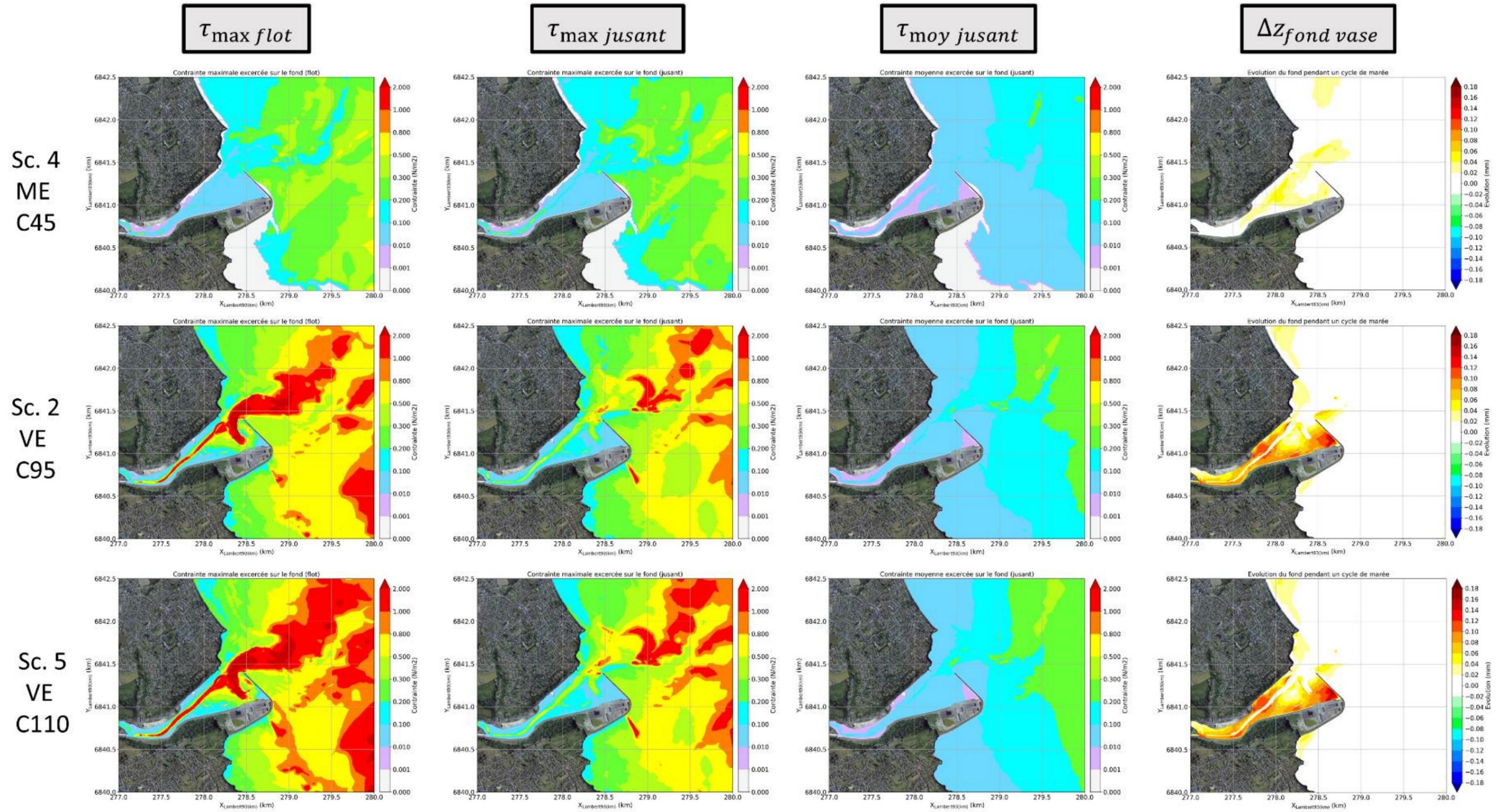


Figure 6-4 Résultats de contraintes de cisaillement près du fond (maximale ou moyenne) pendant le flot et le jusant, et épaisseurs des dépôts vaseux simulées avec le modèle, pour un Hs médian et pour différentes conditions de marée (coefficients de 45, 95 et 110 ; scénarios 4, 2 et 5, respectivement).

Sensibilité de la dynamique sableuse à la marée (en considérant un Hs médian)

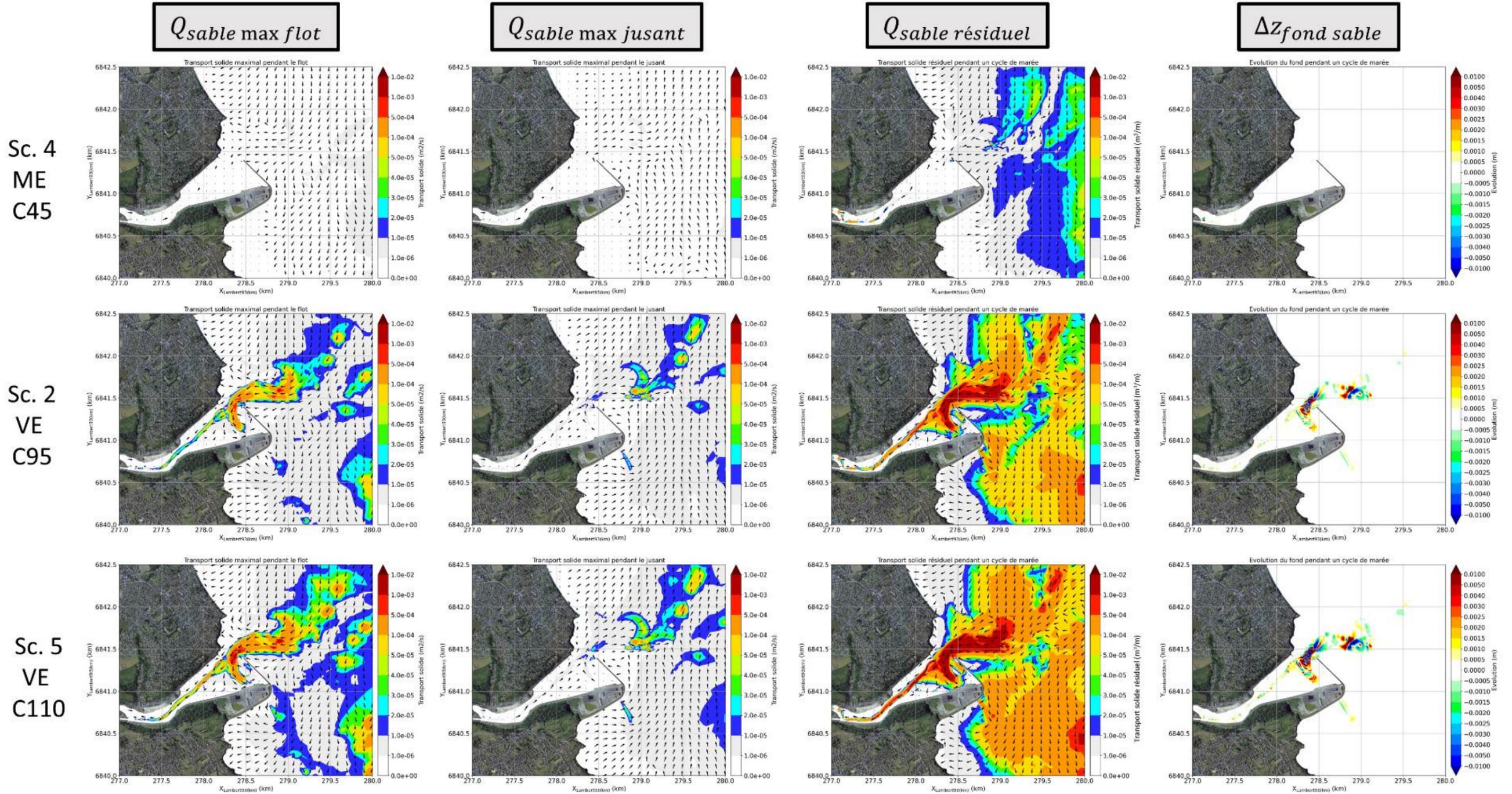


Figure 6-5 Résultats de flux de sable (maximum flot/jusant ou résiduel sur un cycle de marée), et épaisseurs des dépôts sableux simulées avec le modèle, pour un Hs médian et pour différentes conditions de marée (coefficients de 45, 95 et 110 ; scénarios 4, 2 et 5, respectivement).

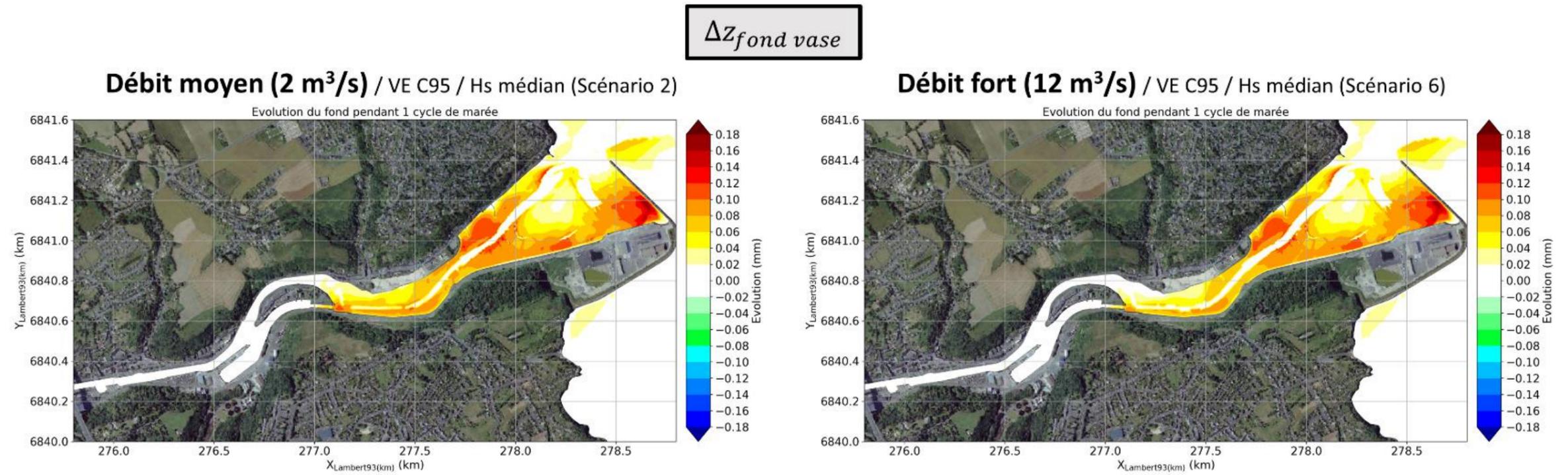


Figure 6-6 Sensibilité des épaisseurs de vase (marine) déposées en fonction du débit fluvial prescrit en amont.

$$\Delta z_{\text{fond vase}}$$

Condition amont : Débit fort ( $12 \text{ m}^3/\text{s}$ )  $C_{\text{MES}}=10 \text{ mg/l}$  / VE C95 / Hs médian

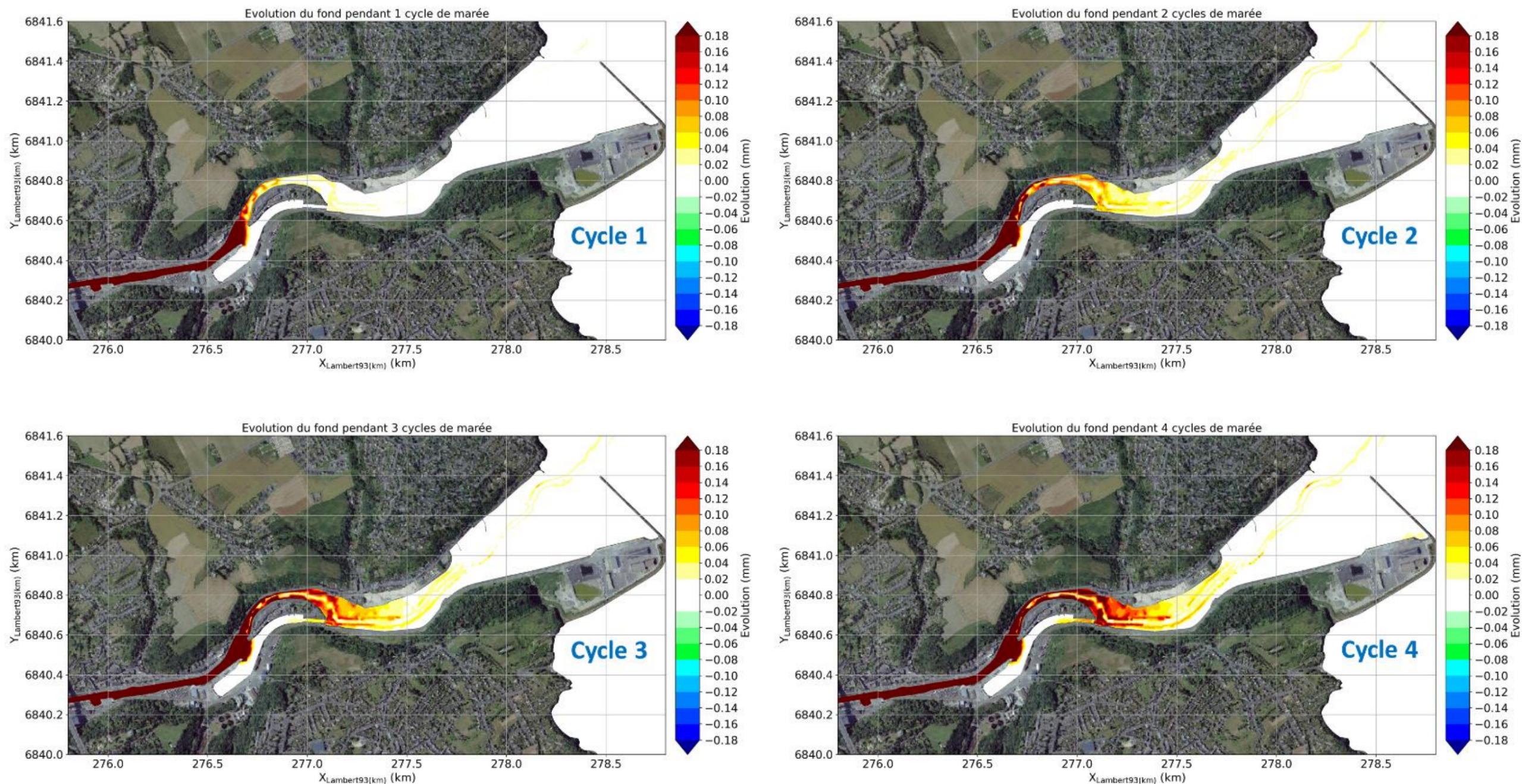


Figure 6-7 Epaisseurs de vases déposées au cours de 4 cycles de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.

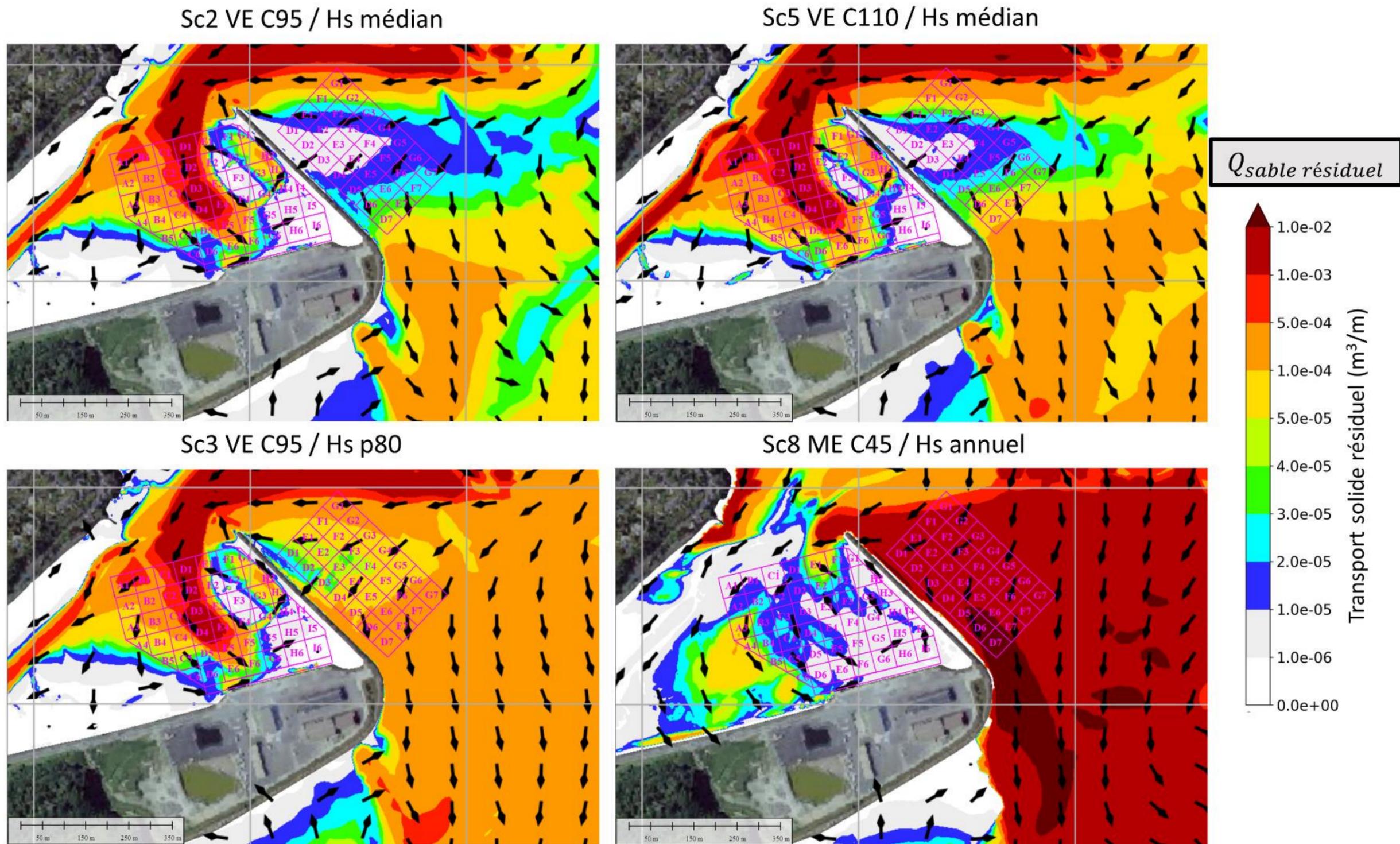


Figure 6-8 Transports résiduels de sable simulés pour différentes conditions de marée et de vagues, avec superposition des zones de dragage dans l'avant-port et de dépôt devant le môle.

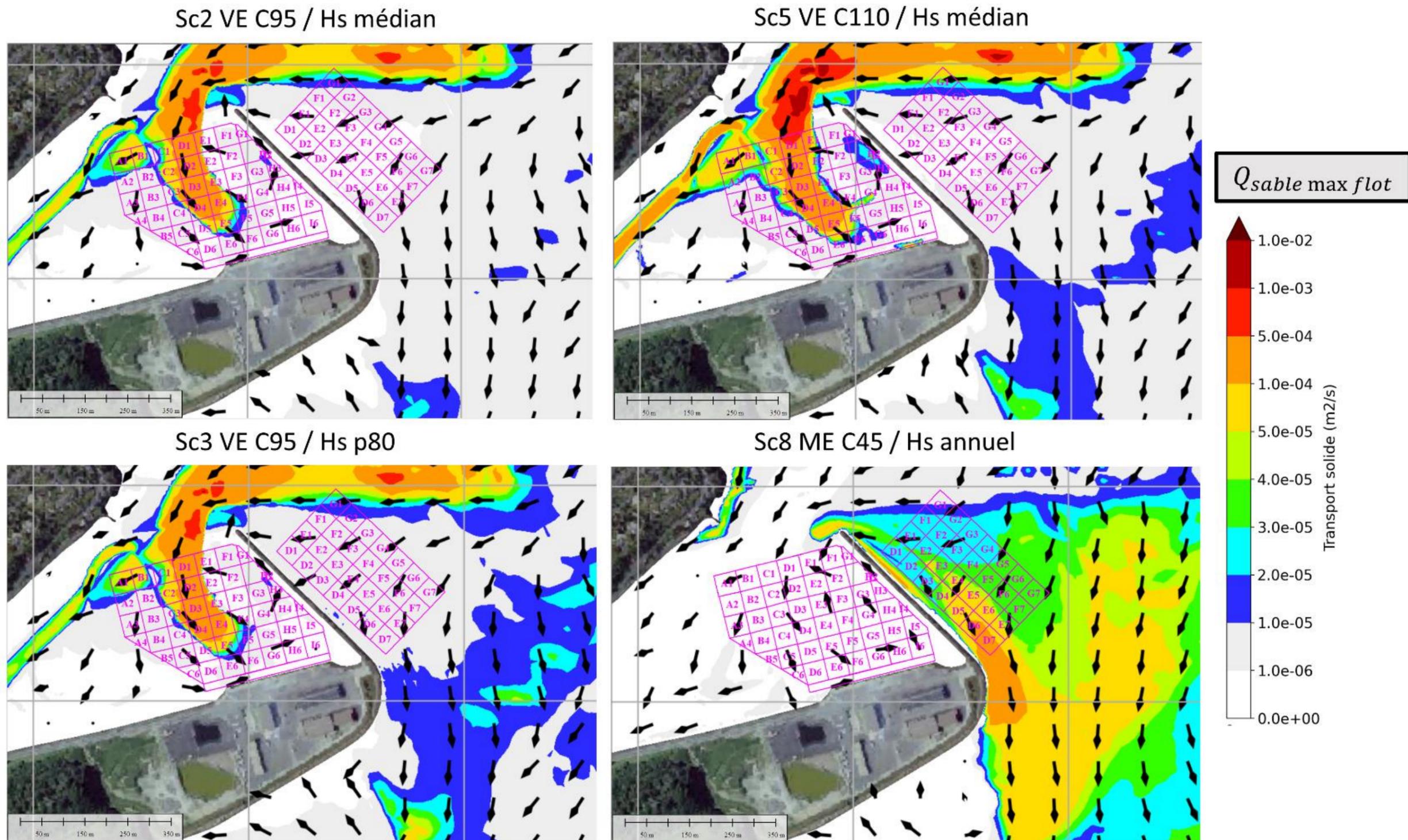


Figure 6-9 Cartes de transport de sable intervenant pendant le maximum de flot, obtenues pour différentes conditions de marée et de vagues, avec superposition des zones de dragage dans l'avant-port et de dépôt devant le môle.



## Rapport d'avancement de la phase n°1

Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc

---

# 7. BILANS SEDIMENTAIRES SUR UNE ANNEE : SIMULATIONS LONGUES

---

L'objectif de cette partie est de quantifier la dynamique sédimentaire de la zone d'étude, en particulier la sédimentation dans l'avant-port, au cours d'une année complète (caractérisée par une multitude de combinaisons successives de marée, de vagues et de turbidité ambiante).

## 7.1 STRATEGIE DE MODELISATION

### 7.1.1 SEDIMENTS SABLEUX

#### 7.1.1.1 Optimisation du maillage

Pour les simulations longues, le maillage est optimisé, notamment en augmentant la taille des mailles afin de permettre la simulation de périodes d'une durée d'un an couvrant la saison de dragage. Par exemple dans l'avant-port, la taille des mailles est de 12 m (au lieu de 5m dans le cas du maillage 1). L'emprise du maillage ne change pas. Le maillage optimisé (maillage 2) a été présenté précédemment sur la Figure 4-4.

Des tests de sensibilité au maillage sont réalisés afin de vérifier que les schémas de transport dans les différentes zones d'intérêt modélisés avec la résolution la plus fine sont bien conservés avec une résolution plus faible. La Figure 7-1 présente les comparaisons de flux résiduels pour 4 des scénarios courts. Il ressort que les schémas de transport sont bien conservés avec le maillage 2 par rapport au maillage 1 avec un nombre de nœuds réduit par 2. A noter que qu'en plus d'un nombre de mailles réduit, une résolution moins fine autorise des pas de temps de calcul plus grand, et donc des temps de calcul d'autant plus courts.

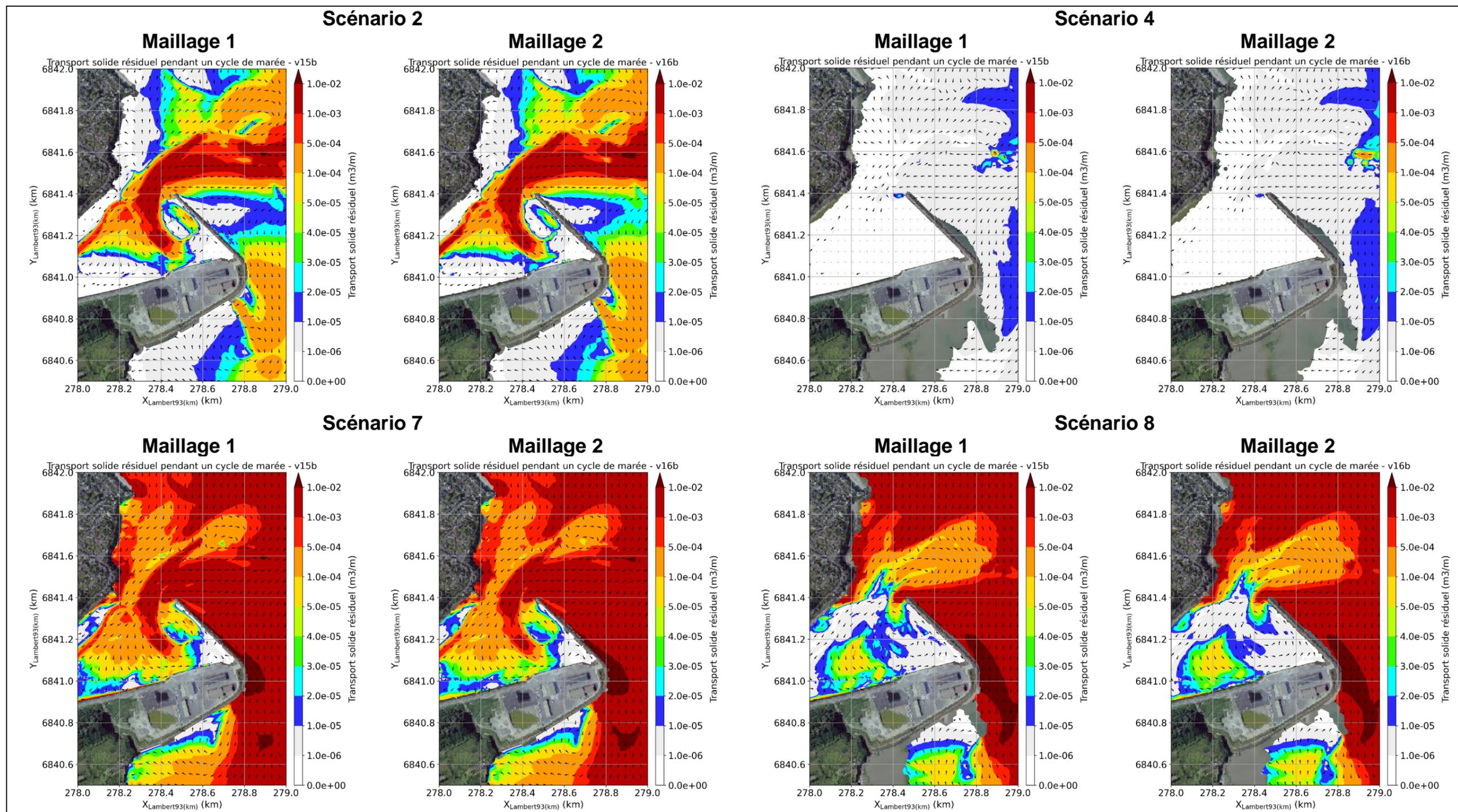


Figure 7-1 Comparaison du transport résiduel sur une marée pour 4 scénarios entre le maillage 1 (maille à 5 m dans l'avant-port) et le maillage 2 (maille à 12 m dans l'avant-port)

#### 7.1.1.2 Prise en compte implicite des dragages dans l'avant-port

Lors de tests de sensibilité, il est apparu que le transport solide vers l'avant-port est fortement influencé par la bathymétrie dans la zone de dragage. Ne disposant pas précisément des informations simultanées des localisations et des dates des dragages au cours de l'année, il a été choisi d'évaluer les quantités de sédiment sableux qui rentrent naturellement dans l'avant-port à partir de deux types de simulations :

- Simulations de type A : La bathymétrie considérée est la bathymétrie réelle de 2020 (bathymétrie utilisée lors des simulations cortès). Au cours de la simulation, l'évolution des fonds (due aux érosions et dépôts de sable) n'est pas actualisée (pas de couplage morphodynamique, i.e. la bathymétrie reste constante) dans les modèles de courants et d'états de mer et la bathymétrie reste constante. Ce cas correspond à une situation où la zone de dragage serait continuellement draguée de manière uniforme au cours du temps afin de maintenir la bathymétrie de 2020.
- Simulations de type B : La bathymétrie du modèle est draguée initialement dans la zone de dragage à une cote de +4.5m CM (cote cible des dragages). Au cours de la simulation, l'évolution des fonds (due aux érosions et dépôts de sable) est prise en compte et la bathymétrie est mise à jour toutes les minutes dans les modèles de courants et d'états de mer. Ce cas correspond à une situation où toutes les opérations de dragage auraient eu lieu au départ et qu'ensuite les dépôts seraient laissés en l'état.

Ces deux simulations permettent d'encadrer les conditions réelles au cours d'une année de dragage type.

#### 7.1.1.3 Choix de la granulométrie

Le site du Légué est un environnement complexe avec une hétérogénéité de la taille et du type de sédiments aussi bien dans un seul échantillon que spatialement entre différentes localisations. A noter que le diamètre à considérer dans le cas de simulations mono-classes (ce qui est le cas ici) ne correspond pas systématiquement au diamètre médian ; compte tenu de transports solides qui sont une fonction non-linéaire de la taille des grains, le diamètre caractéristique (i.e. représentatif de l'ensemble des classes de sable) peut être sensiblement inférieur au diamètre médian.

Des tests de sensibilité à la granulométrie (125 µm, 150 µm et 175 µm) ont été menés sur 15 jours afin d'évaluer le diamètre à considérer en comparant les volumes de dépôt simulés dans la zone draguée aux volumes effectivement dragués (les quantités annuelles étant rapportées à 15 jours). Ces tests ont été menés avec la bathymétrie creusée initialement dans la zone de dragage à 4.5 m CM. Le diamètre retenu à la suite de ces tests est 125 µm ; à noter que cette étape de calibration du modèle est relativement minime (sur le diamètre uniquement, la valeur retenue étant inférieure au diamètre médian ce qui est pertinent)

Tableau 7-1 Volume déposé, érodé et évolution du volume dans la zone de dragage entre le 01/01/2018 et le 15/01/2018 : test de sensibilité à la granulométrie.

Diamètre (µm)	Volume déposé (m <sup>3</sup> )	Volume érodé (m <sup>3</sup> )	Evolution du volume (m <sup>3</sup> )
175	2 631	-424	2 207
150	3 309	-578	2 731
125	4 818	-719	4 099

#### 7.1.2 SEDIMENTS VASEUX

La dynamique des sédiments fins est simulée à partir des conditions de courant et d'état de mer simulées préalablement (il s'agit des mêmes conditions que pour la dynamique sableuse).

De nombreux paramètres agissent dans le modèle sur la dynamique des sédiments fins et des tests de sensibilités ont été menés au regard des dépôts de vase estimés dans l'avant-port (d'après les données de dragage). Ces tests ont porté sur la constante d'érosion  $E_0$  (dite constante de Parthéniades), la vitesse de chute  $w_s$ , et les contraintes critique de dépôt et d'érosion  $\tau_{cd}$  et  $\tau_{ce}$ . Les valeurs retenues, qui sont dans les gammes de valeurs caractéristiques des sédiments fins, sont les suivantes :

- Constante d'érosion  $E_0$  :  $5 \cdot 10^{-5}$  kg/m<sup>2</sup>/s
- Vitesse de chute  $w_s$  : 1 mm/s
- Contraintes critique de dépôt et d'érosion  $\tau_{cd}$  et  $\tau_{ce}$  : 0.2 et 0.3 N.m<sup>-2</sup>

#### 7.2 EVALUATION DES VOLUMES DE SEDIMENTS DEPOSES DANS L'AVANT-PORT NATURELLEMENT

##### 7.2.1 SEDIMENT SABLEUX

Les évolutions temporelles des volumes (et donc implicitement des épaisseurs) de sédiment (Figure 7-2) sont fortement liées à la variation de l'intensité de la marée, ce qui est cohérent avec l'analyse des scénarios courts. Pour des coefficients de marée inférieures à 60 environ, il n'y a pas d'évolution du volume dans la zone de dragage. Puis plus le coefficient de marée augmente, plus le volume se déposant dans la zone de dragage est élevé. L'ensablement (augmentation des volumes) dans l'avant-port se fait principalement en début de flot (au moment où les courants sont maximum), pendant une période très courte de 20 minutes environ.

A la fin de l'année de simulation, le volume déposé de sable dans la zone de dragage est de l'ordre de 50 000 à 85 000 m<sup>3</sup> suivant la simulation A ou B. Ce volume est plutôt dans la fourchette basse de l'évaluation des quantités de sables draguées annuellement (80 à 90% des 100 000 à 120 000 m<sup>3</sup>). L'ordre de grandeur est tout de même respecté et il faut bien noter d'une part les marges d'incertitudes associées aux quantités draguées (l'estimation est basée sur le nombre de dumpers remplis par année, avec une hypothèse sur le taux réel de remplissage) et on rappelle d'autre part la sensibilité des taux d'ensablement de l'avant-port à la morphologie/bathymétrie des fonds (une bathymétrie de type A, autre que 2020, par exemple 2017 qui est relativement basse, devrait être associée à un ensablement plus important). De plus nous ne disposons pas d'information précise sur la concentration des dépôts sédimentaire (en kg/m<sup>3</sup>) ; une certaine quantité ou masse de sédiment déposée (en kg) se traduit en volume (m<sup>3</sup>, et implicitement en épaisseur) suivant une fonction linéaire de ce paramètre de concentration. Il se peut également que cette concentration diffère sensiblement dès lors que le sédiment est chargé dans un dumper (phénomènes de type foisonnement, quantité d'eau interstitielle qui peut évoluer).

A noter concernant la répartition des dépôts de sable simulés : les sables se déposent pour la simulation A dans la zone où la bathymétrie est moins élevée initialement (Figure 7-3) et dans une zone plus étendue pour la simulation B (Figure 7-4). Pour les deux simulations, il y a peu de dépôt de sable dans le coin Sud-Est de l'avant-Port. Ceci est en accord avec les observations terrain décrivant cette zone comme plutôt vaseuse.

---

En dehors de l'avant-port, une tendance à l'érosion apparaît devant le môle dans la simulation A (qui revient à ne pas considérer les dépôts des sédiments dragués). Ceci corrobore ce qui est observé sur les dernières bathymétries depuis l'arrêt des dépôts (avec toutefois des valeurs plus faibles d'érosion sur le terrain, qui peuvent s'expliquer par un sédiment qui est en réalité sablo-vaseux et qui peut présenter une certaine cohésion, d'autant plus qu'il tend à être tassé à mesure que les engins cheminent sur ce secteur).

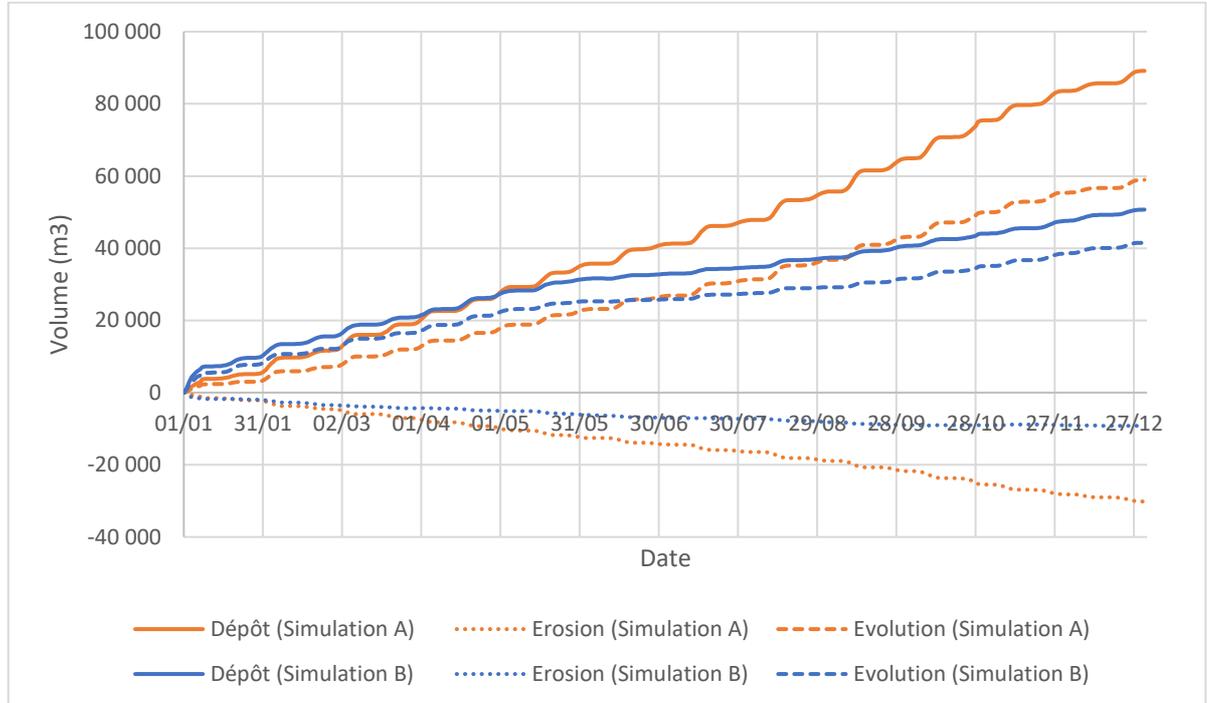


Figure 7-2 Variation temporelle du volume déposé, érodé et évolution du volume de sable dans la zone de dragage entre le 01/01/2018 et le 01/01/2019 pour les simulations A et B.

## Rapport d'avancement de la phase n°1

### Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc

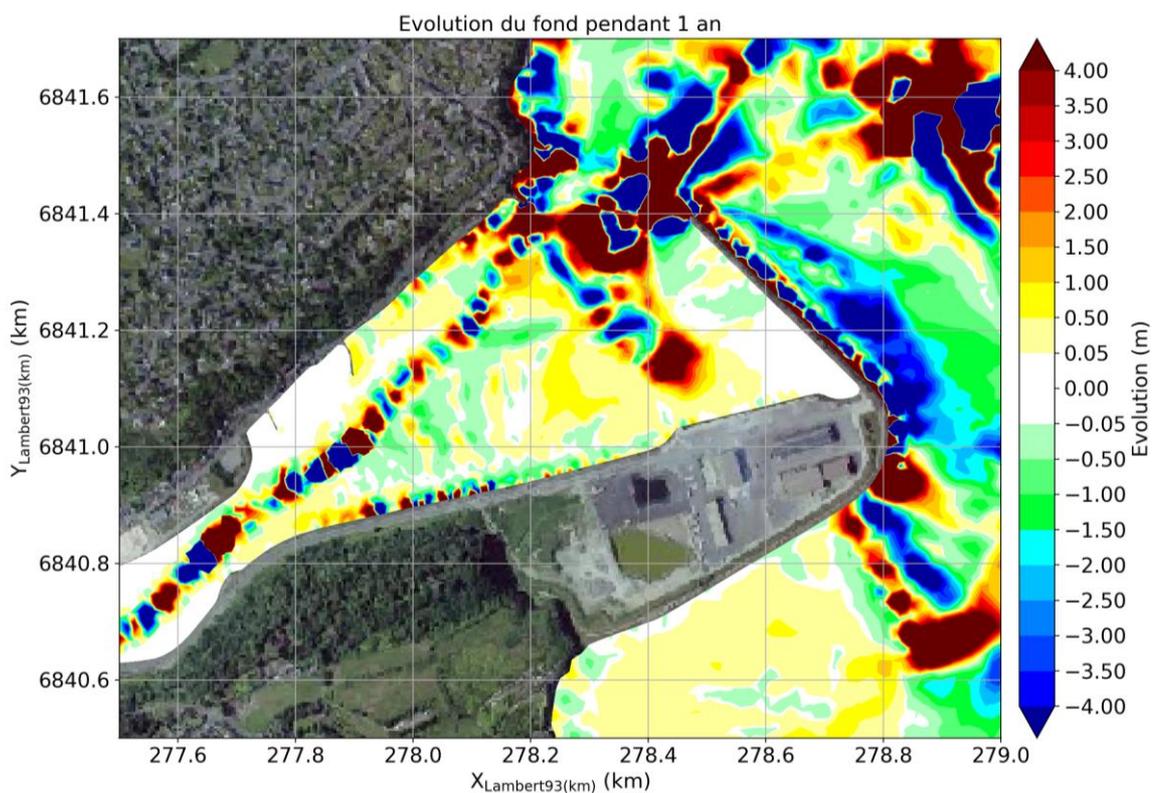


Figure 7-3 Evolution des fonds sableux au bout d'un an de simulation lors de la simulation A (bathymétrie 2020).

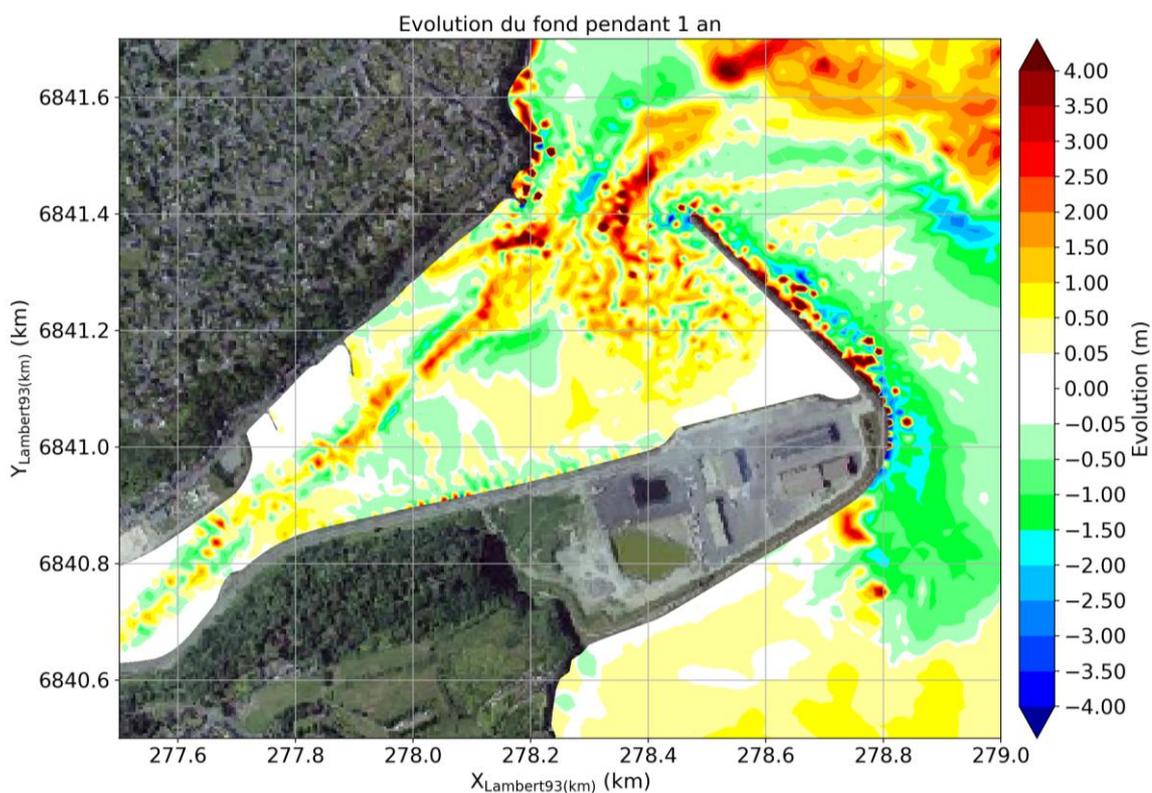


Figure 7-4 Evolution des fonds sableux au bout d'un an de simulation lors de la simulation B (fonds dragués initialement à +4.5m CM dans l'avant-port).

### 7.2.2 SEDIMENT VASEUX

Les apports maritimes de sédiments fins dans la zone d'études sont analysés dans cette partie à partir des épaisseurs et des volumes déposés. A noter que les apports fluviaux, dont les scénarios courts indiquent qu'ils ne contribuent pas significativement aux dépôts dans l'avant-port, n'ont pas été pris en compte pour les simulations longues.

La cartographie des zones de dépôt est présentée Figure 7-5. Les zones où les sédiments se déposent correspondent bien aux zones d'envasement « naturel » (c'est à dire en dehors des transferts des sédiments dragués). Les épaisseurs les plus conséquentes sont également en accord avec les observations, dont : rebord des banquettes (en particulier le long du chenal) et dans la zone entretenue la plus proche du môle. Un dépôt de 1 à 5 cm est également modélisé le long du bord Sud-Est du terre-plein c'est-à-dire côté Nord et en contrebas de la plage du Valais.

Au bout d'un an, le volume déposé (d'origine maritime) dans la zone de dragage est simulé à 14 800 m<sup>3</sup>, ce qui est cohérent avec les 10 à 20 % de vase (en moyenne à l'échelle de la zone d'entretien d'après les analyses ASTERIE de 2005) dans les 100 000 à 120 000 m<sup>3</sup> dragués annuellement sur la zone.

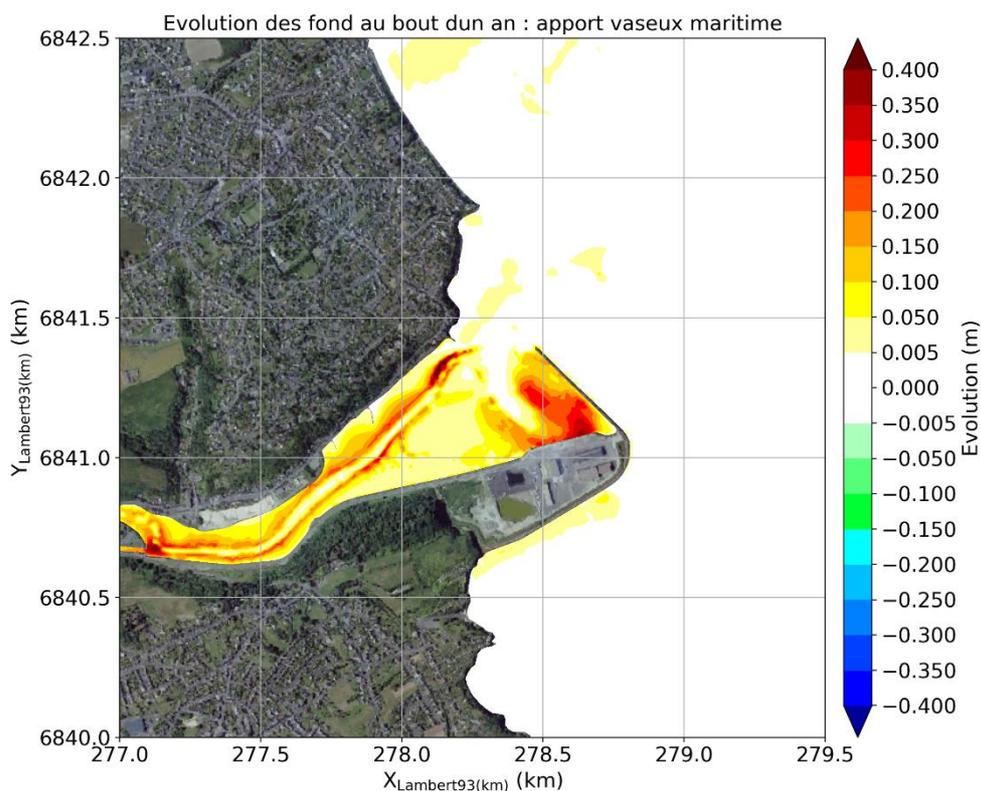


Figure 7-5 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation : apport maritime

### 7.3 EFFETS DES DEPOTS DEVANT LE MOLE (COTE EXTERIEUR)

#### 7.3.1 SEDIMENT SABLEUX

##### 7.3.1.1 Méthode

Le sable est naturellement présent dans la zone de dépôt des sédiments dragués. Le principal effet des dépôts sur la dynamique des sables est donc la modification de la bathymétrie dans la zone de dépôt (sans que la disponibilité sédimentaire ne soit modifiée).

Dans le but d'évaluer cet effet des dépôts sur la dynamique des sables entrant dans l'avant-port et donc le taux de retour des sédiments déposés sur l'estran, un test de sensibilité à la bathymétrie dans la zone de dépôt a été réalisé. La bathymétrie a pour cela été arasée devant le môle (côté extérieur) à +6.5 m CM (soit un abaissement des fonds de l'ordre de 1 à 2 m) en rejoignant progressivement les fonds actuels côté Sud-Est (Figure 7-6). Ce test de sensibilité a été réalisé sur les 15 premiers jours de 2018.

##### 7.3.1.2 Résultats

Le Tableau 7-2 présente les résultats de ce test de sensibilité. Avec une bathymétrie sans morphologie (en forme de bosse) liée au dépôt des sédiments dragués, le volume de sédiment qui se dépose dans l'avant-port diminue de près de 15 %. Dit autrement, les résultats de la modélisation indiquent que l'effet (de type morphodynamique) des dépôts des sédiments dragués devant le môle contribue à 15% de l'ensablement de l'avant-port. Cela s'explique notamment par un transport résiduel plus élevé avec la bathymétrie 2020 le long de la digue à l'extérieur du port et dans le chenal d'entrée vers l'avant-port (Figure 7-7)

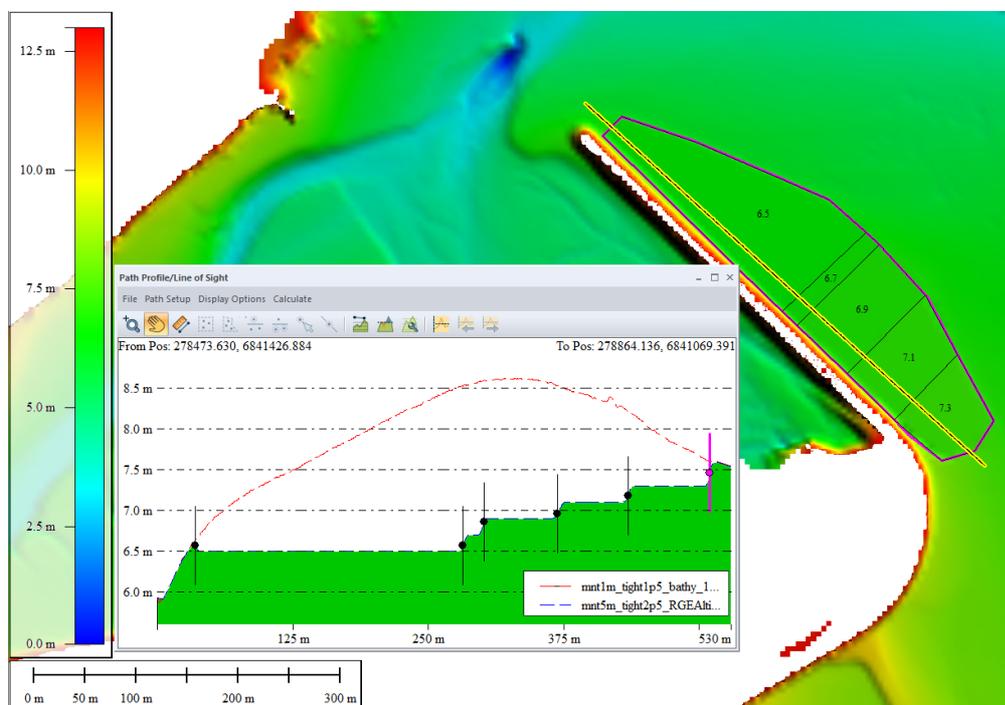


Figure 7-6 Présentation du MNT utilisé pour le test de sensibilité avec bathymétrie arasée dans la zone de dépôt.

Tableau 7-2 Volume déposé, érodé et évolution du volume dans la zone de dragage entre le 01/01/2018 et le 15/01/2018.

Bathymétrie	Dépôt (m3)	Erosion (m3)	Evolution (m3)
Bathymétrie 2020	1672	-544	1129
Bathymétrie arasée	1427	-544	883

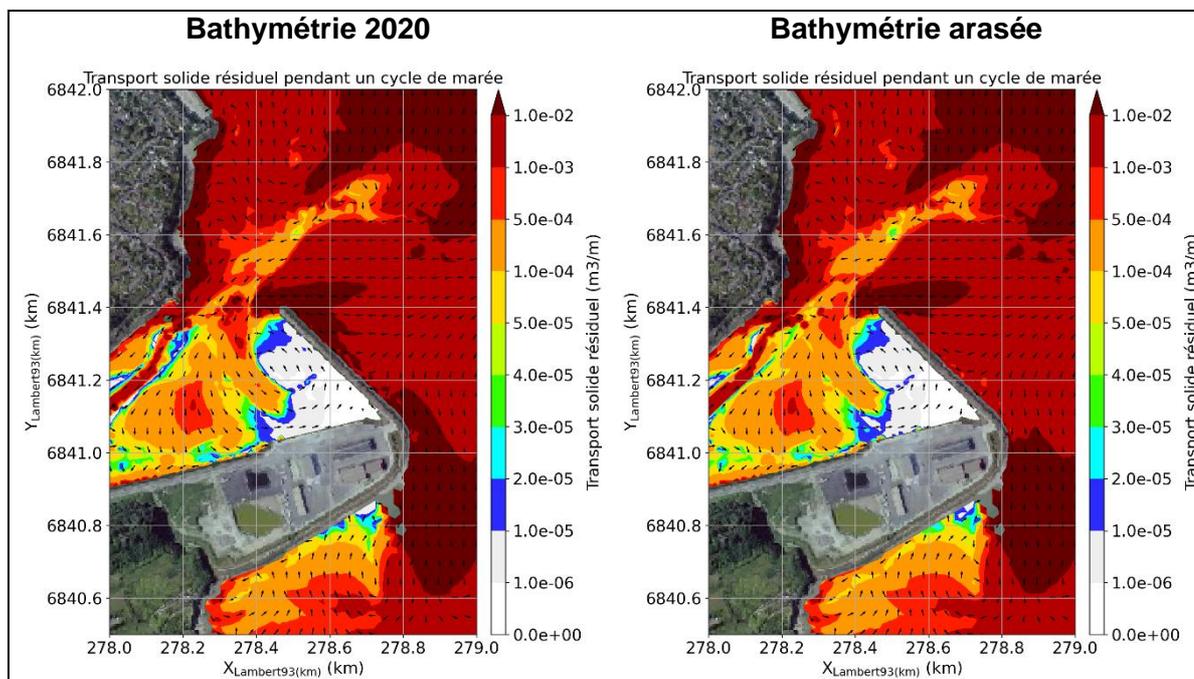


Figure 7-7 Cartographie du transport résiduel au cours du cycle de marée du 06/01/2018 matin (marée de vive-eau 92)

### 7.3.2 SEDIMENT VASEUX

#### 7.3.2.1 Méthode

Afin d'évaluer la dispersion des sédiments fins ayant été dragués puis déposés devant le môle, les dates et les volumes de dragage de l'année 2018 ont été pris en compte en faisant l'hypothèse majorante que 20% des dépôts sont composé de vase. A chaque BM la plus proche de 12:00 les jours où ont eu lieu des dragages, les volumes correspondant au volume dragué dans la journée sont introduits dans le lit sédimentaire dans une sous-zone de dépôts.

Les volumes dragués aux mois de juillet et d'août n'ont pas été pris en compte dans le modèle, les dépôts se faisant à terre à cette période. Au total 22 800 m<sup>3</sup> de sédiments fins sont déposés dans le modèle au cours de l'année. N'ayant pas d'information précise sur la localisation des dépôts, une rotation des dépôts sur les sous-zones de dépôt est considérée.

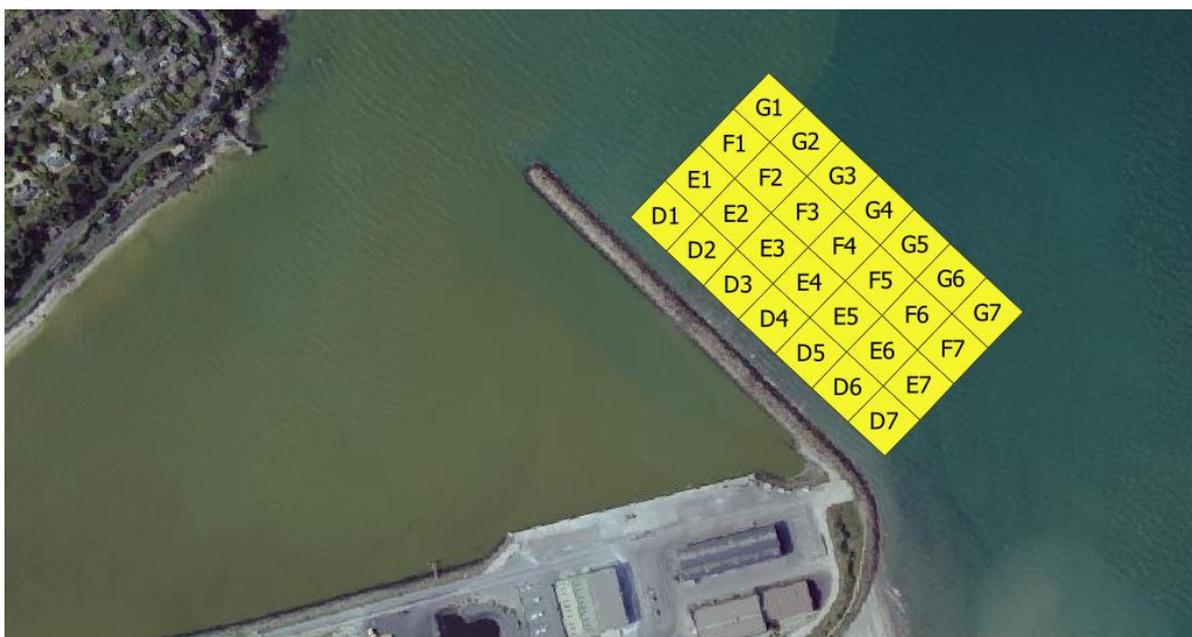


Figure 7-8 Localisation des zones de dépôts.

#### 7.3.2.2 Résultats

La cartographie des zones de dépôt est présentée Figure 7-9. Les zones où les sédiments se déposent sont relativement similaires à celles du cas des apports maritimes (banquettes, zone de dragage) avec toutefois des épaisseurs plus faibles. Un dépôt est aussi modélisé le long du bord-Est du terre-plein (ie. côté Valais)

Au bout d'un an, le volume déposé dans la zone de dragage avec pour origine les dépôts des sédiments dragués est de 5 060 m<sup>3</sup>. D'après la modélisation, une proportion significative (5 060 m<sup>3</sup> sur les 22 800 m<sup>3</sup> transférés vers le devant du môle, soit 22%) du sédiment fin qui a été dragué dans l'avant-port y revient directement depuis la zone de dépôt devant le môle.

Sur le secteur du Valais, l'épaisseur déposée en un an est inférieure à 2 cm, ce qui est inférieure aux apports marins « naturels ».

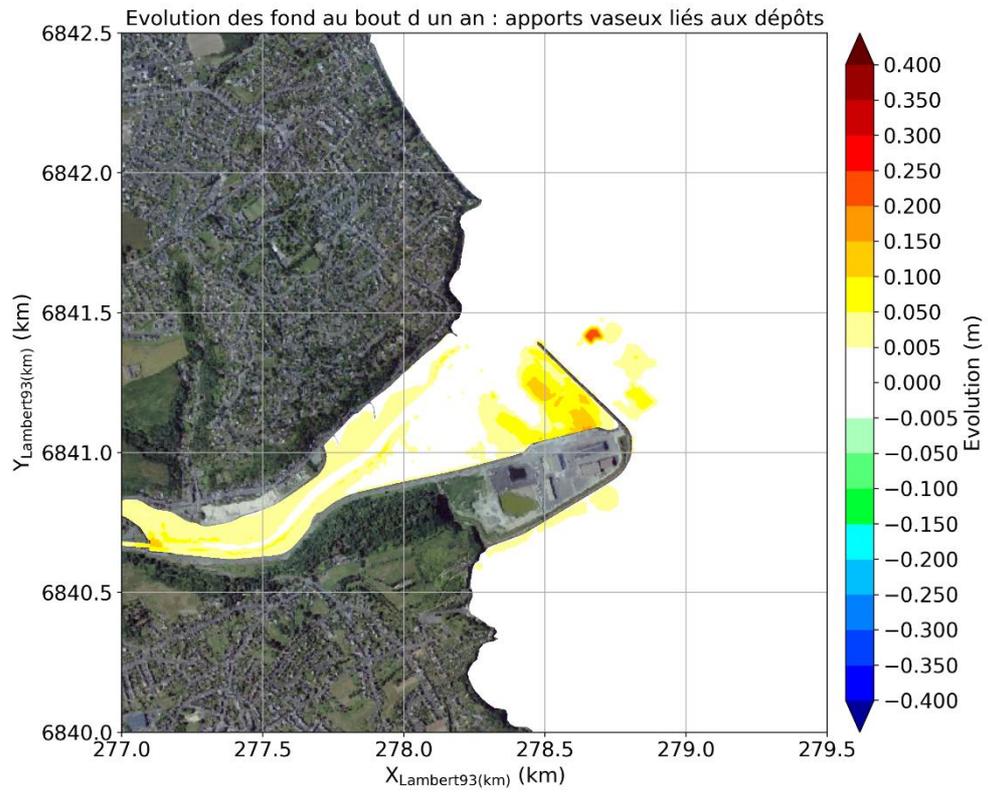


Figure 7-9 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation : apport lié au dépôt des sédiments dragués

# 8. ANNEXES

## 8.1 ANNEXE 1 : COMPLEMENTS SUR LES EVOLUTIONS BATHYMETRIQUES HISTORIQUES

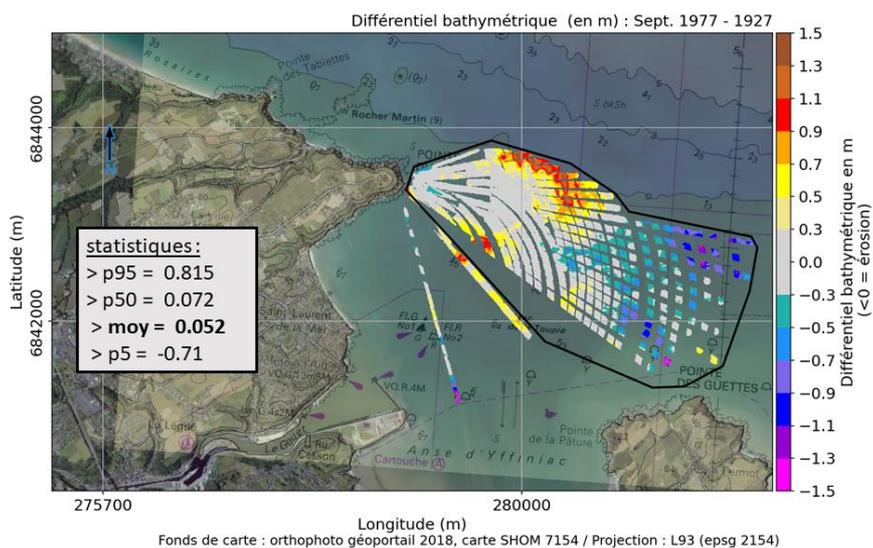


Figure 8-1 Différentiel bathymétrique entre 1977 (LCHF) et 1927 (lot SHOM). Le contour noir correspond à la zone utilisée pour évaluer la tendance générale d'évolution (cf. encadré statistiques).

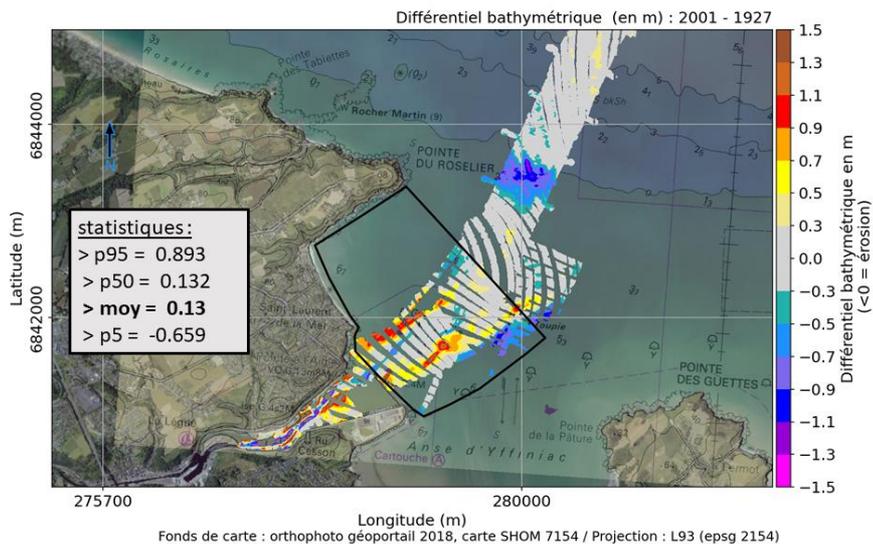


Figure 8-2 Différentiel bathymétrique entre 2001 (lot SHOM) et 1927 (lot SHOM). Le contour noir correspond à la zone utilisée pour évaluer la tendance générale d'évolution (cf. encadré statistiques).

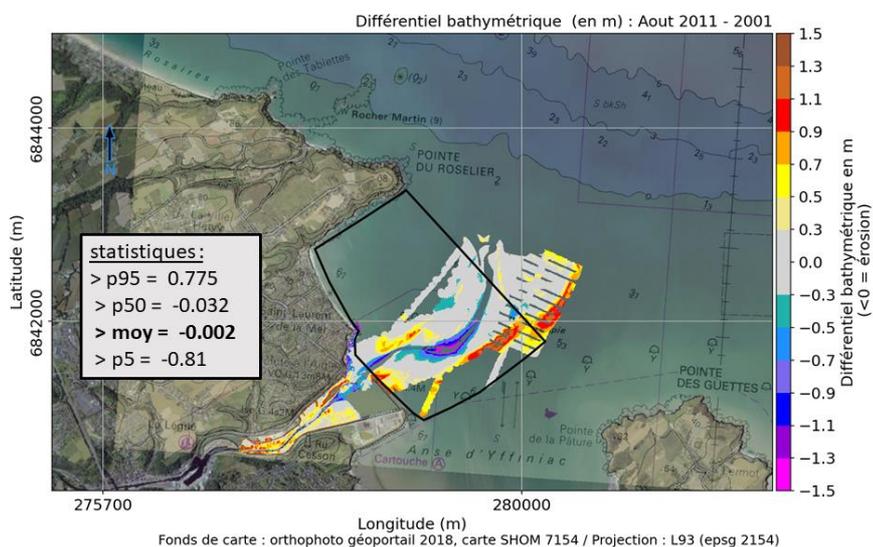


Figure 8-3 Différentiel bathymétrique entre 2011 (données RGE ALTI) et 2001 (lot SHOM). Le contour noir correspond à la zone utilisée pour évaluer la tendance générale d'évolution (cf. encadré statistiques).

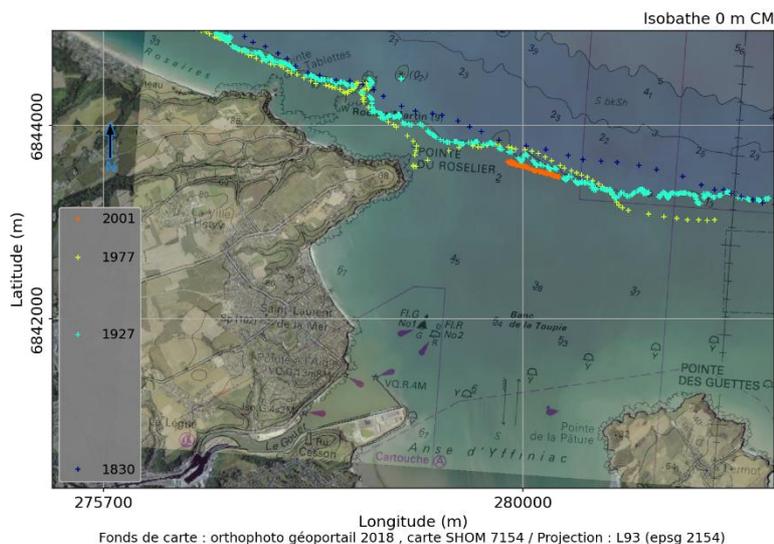


Figure 8-4 Evolution historique de la position de l'isobathe 0 m CM.

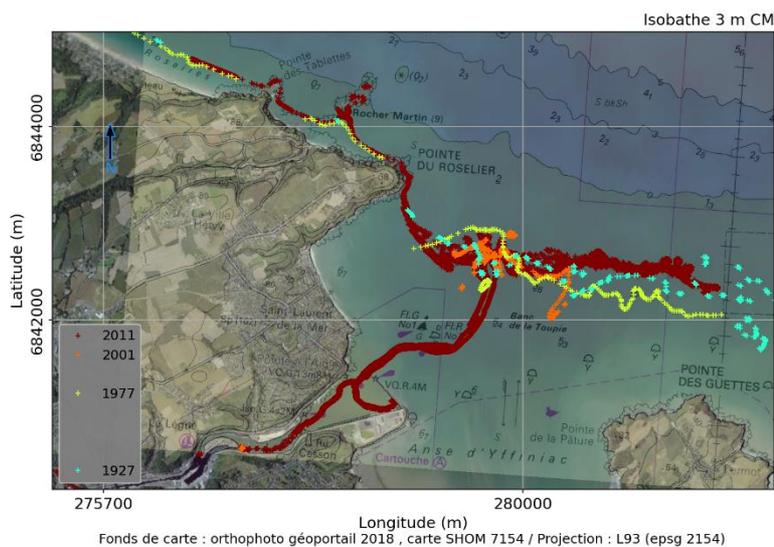


Figure 8-5 Evolution historique de la position de l'isobathe +3 m CM.

### 8.2 ANNEXE 2 : DONNEES GRANULOMETRIQUES SUR LE SECTEUR AMONT (PORT DE PLAISANCE, BASSINS A FLOT)

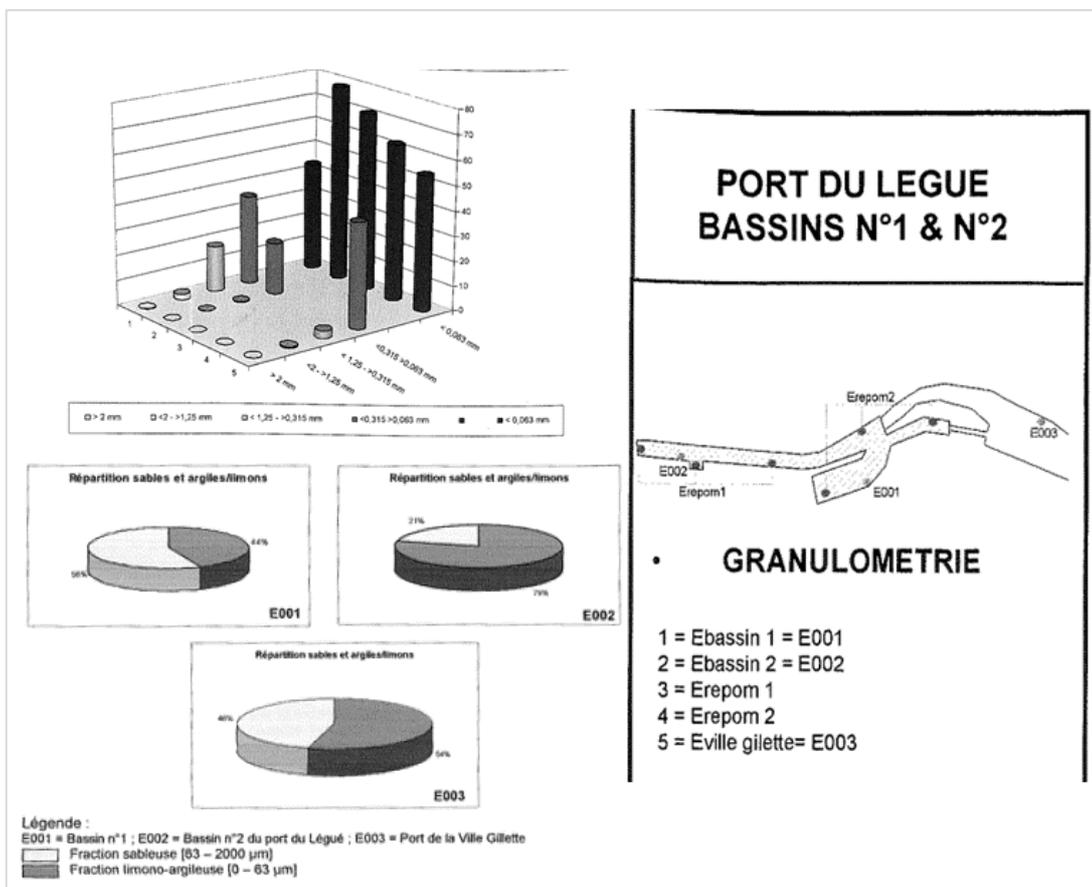


Figure 8-6. Analyses granulométriques réalisées par la CCI22 en octobre 2001 (source : rapport IDRA, 2002).

# Rapport d'avancement de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc

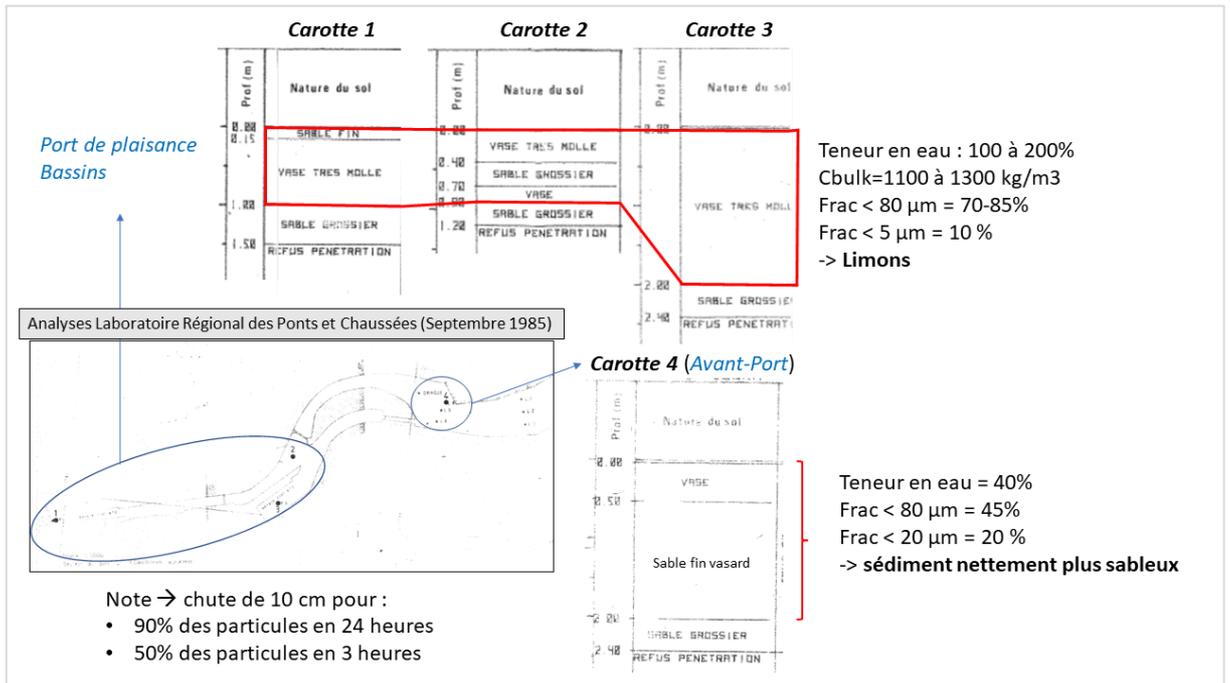


Figure 8-7. Carottages et analyses sédimentaires - port de plaisance, bassins à flot, fond de l'avant-port – (laboratoire régional des Ponts et Chaussées en septembre 1985).

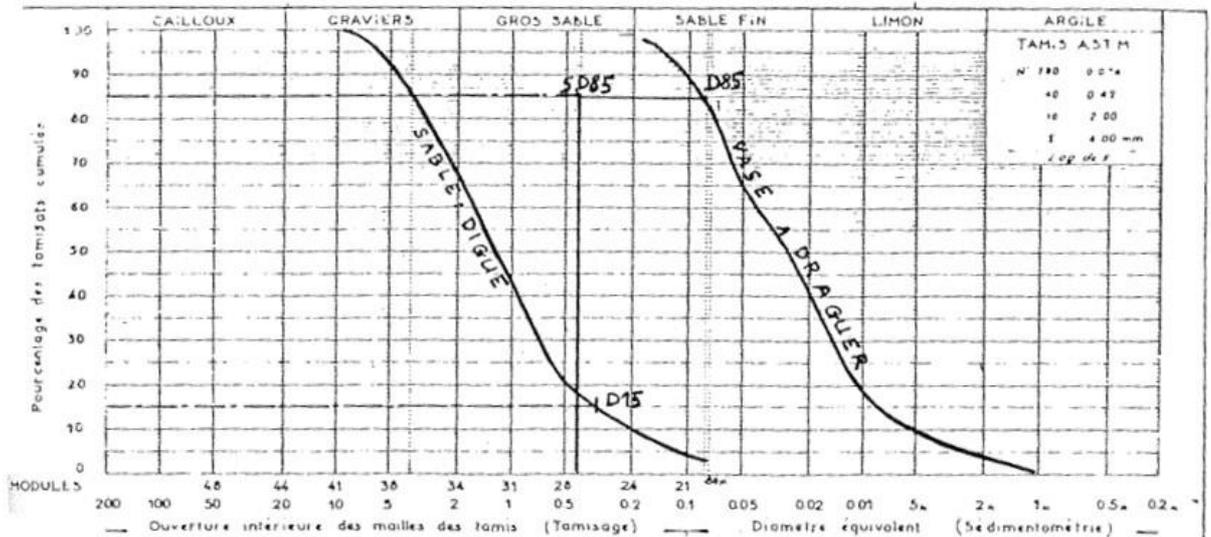


Figure 8-8. Analyses granulométriques réalisées par la Direction Départementale de l'Équipement en 1983 sur le sédiment le plus vaseux potentiellement dragué afin d'évaluer l'efficacité de la couche filtre de l'endigement à contenir les polluants de la vase mise à décanter (source : rapport PB Environnement, 1983).

### 8.3 ANNEXE 3 : DIFFERENTIELS BATHYMETRIQUES SUR LA ZONE DU PORT DE PLAISANCE ET DES BASSINS A FLOT

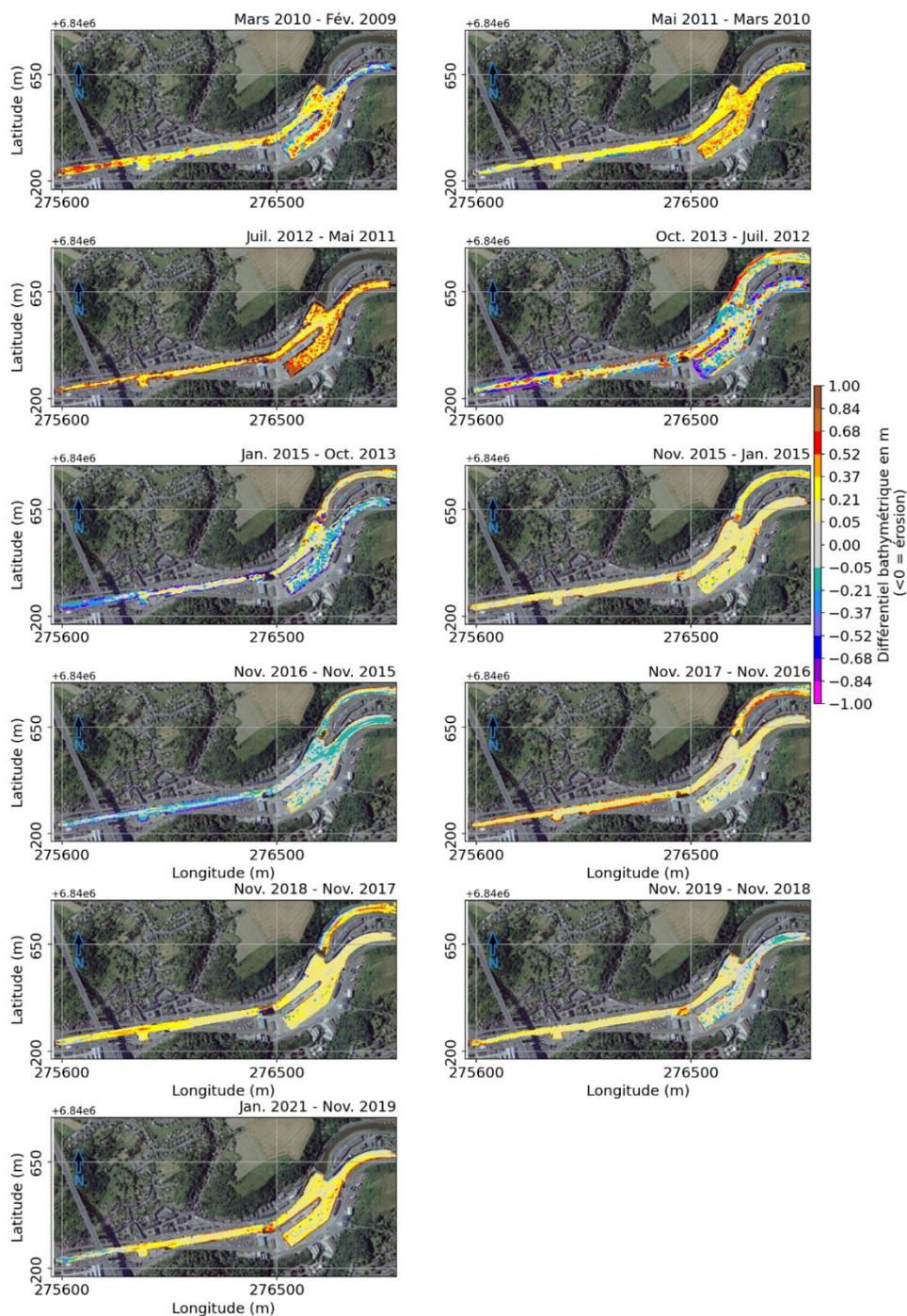
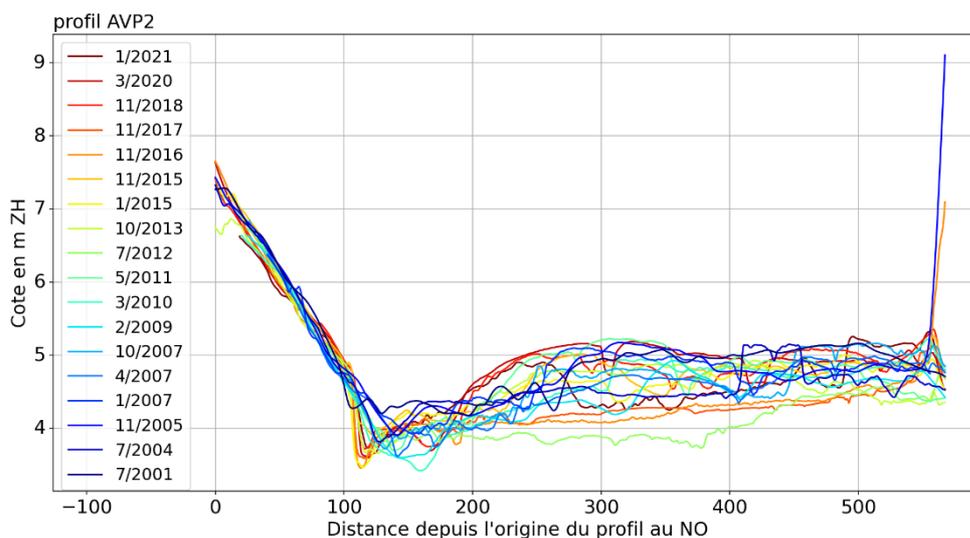
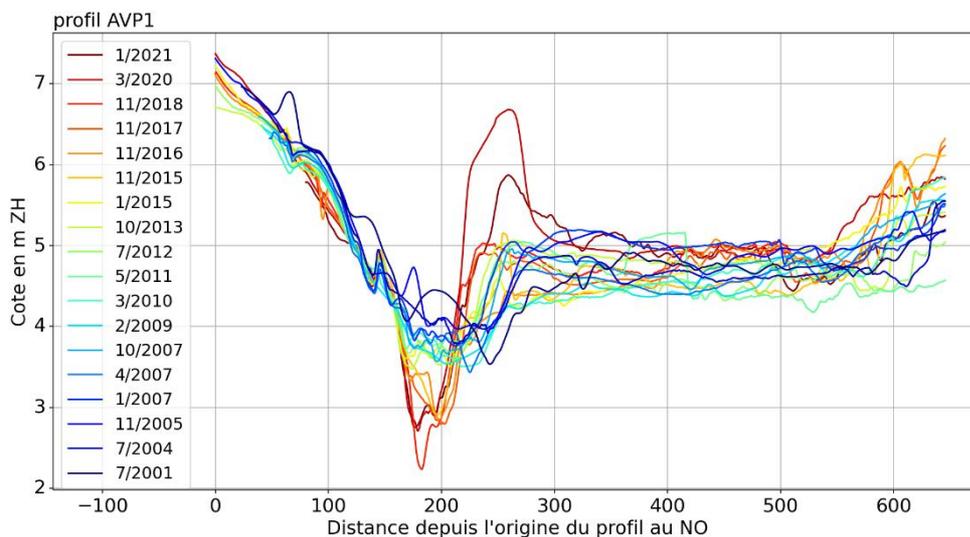


Figure 8-9. Différentiels bathymétriques entre les levés bathymétriques successifs mis à disposition par la CCI sur la zone amont incluant le port de plaisance, les bassins à flot, et le déversoir. Fond de plan : orthophotographie géoportail 2018. Projection : Lambert 93 (epsg 2154).

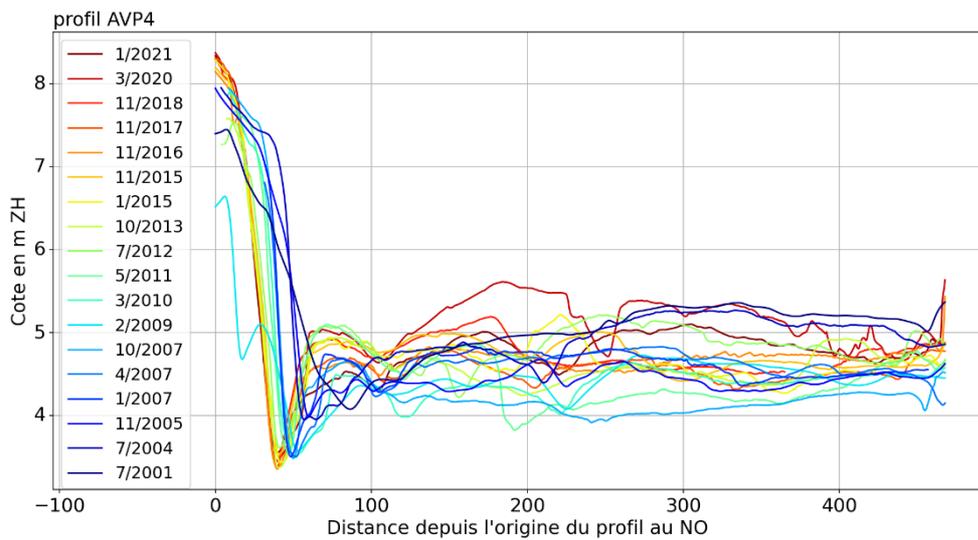
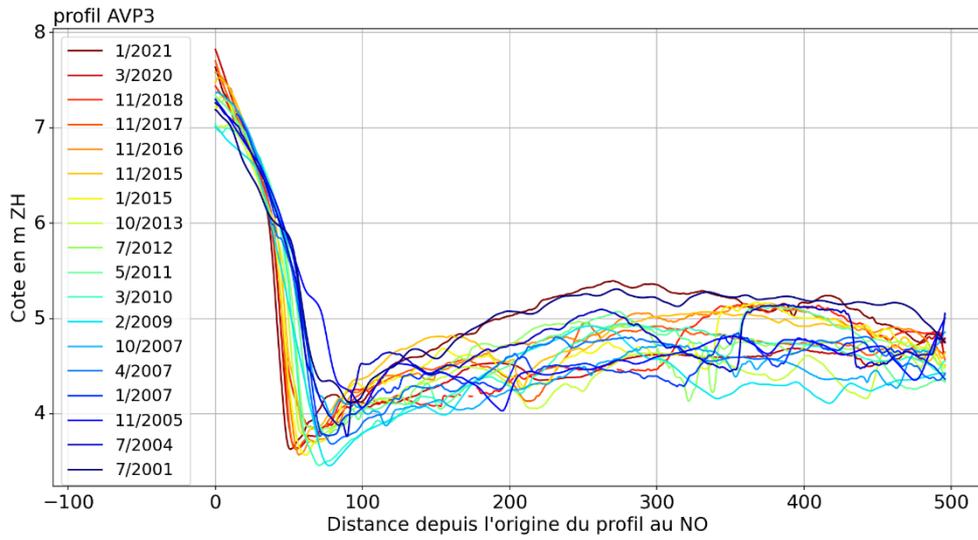
### 8.4 ANNEXE 4 : COMPLEMENT SUR LES COMPARAISONS DES LEVES – ANALYSES PAR PROFILS, SECTEUR DE L'AVANT-PORT/ZONE EXTERIEURE

Les comparaisons des levés de la CCI (1983 à 2021) sont illustrées pour l'ensemble des profils définis sur le secteur de l'avant-port et de la zone extérieure (cf. Figure 2-49).



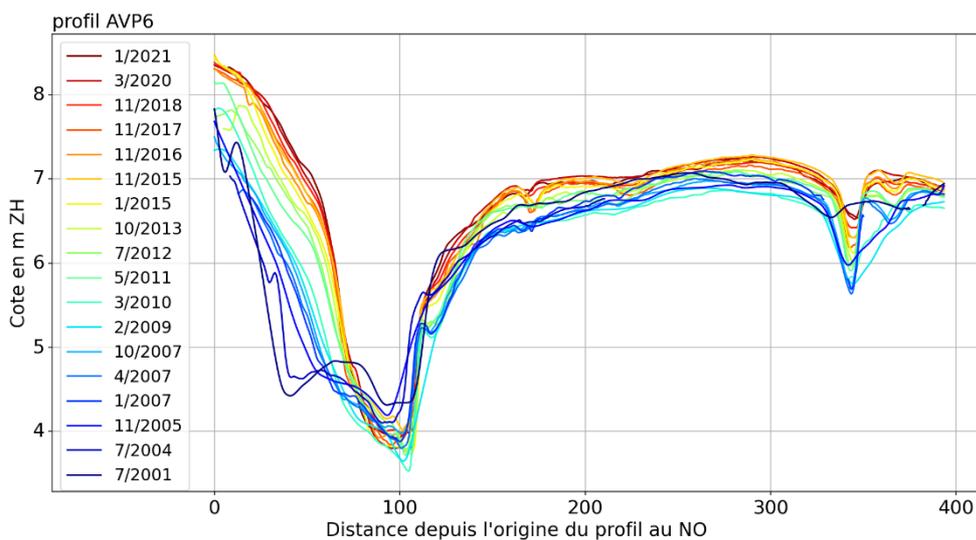
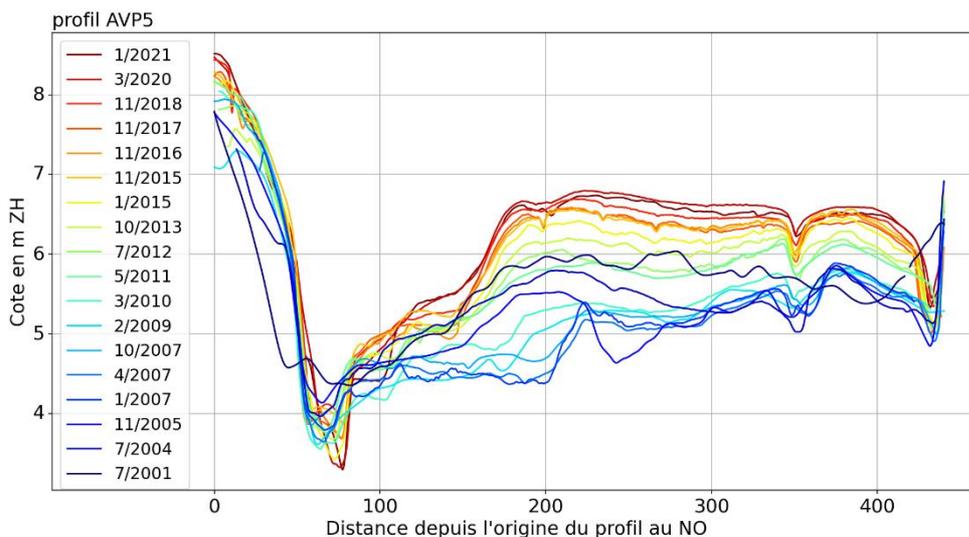
# Rapport d'avancement de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc



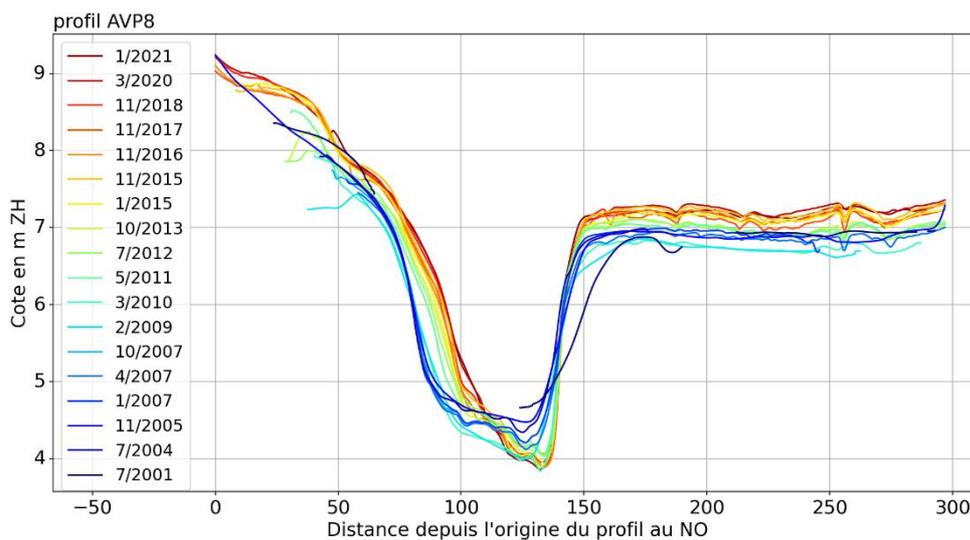
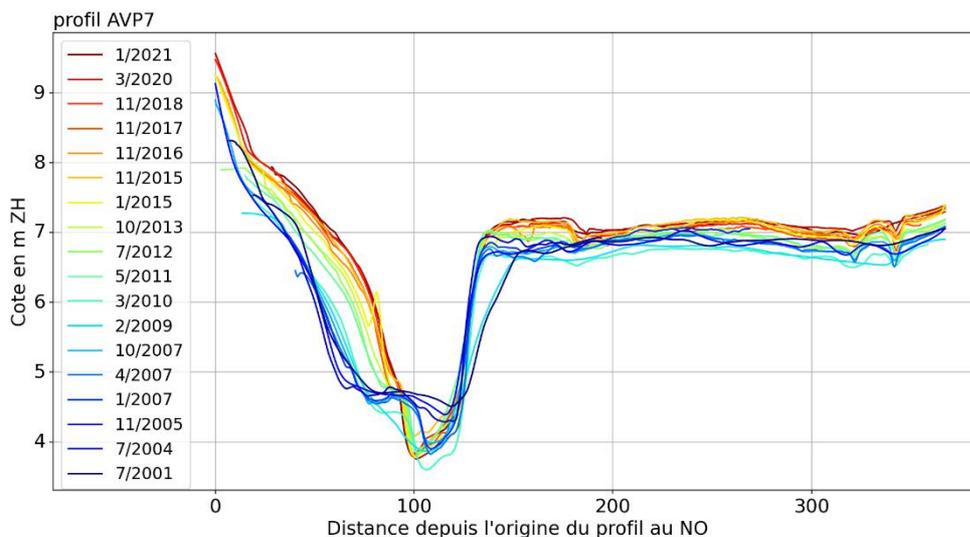
# Rapport d'avancement de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc



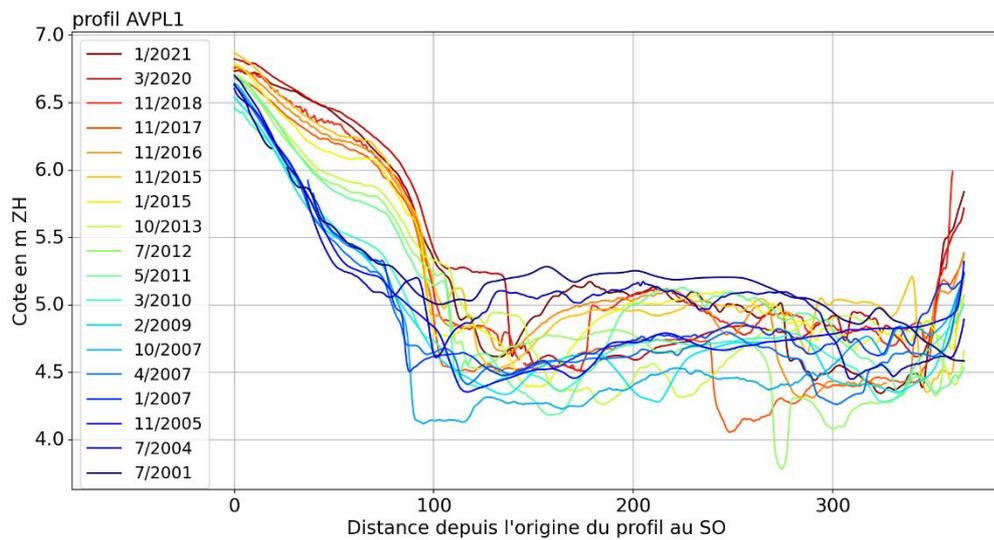
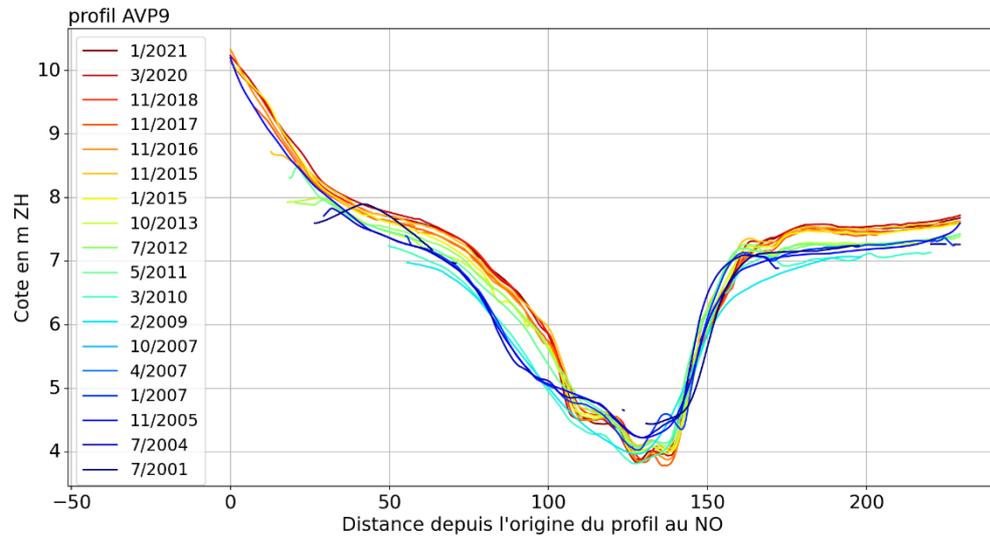
# Rapport d'avancement de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc



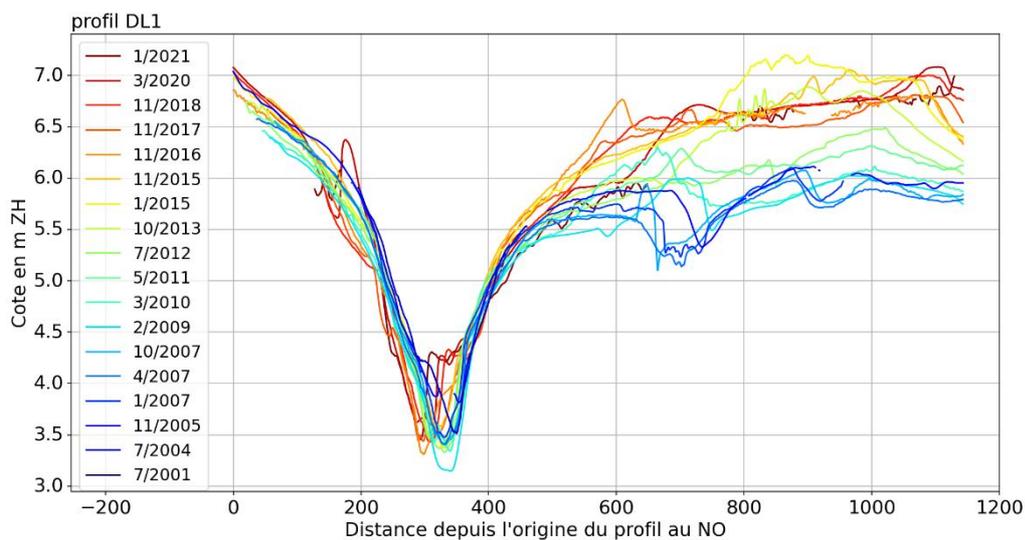
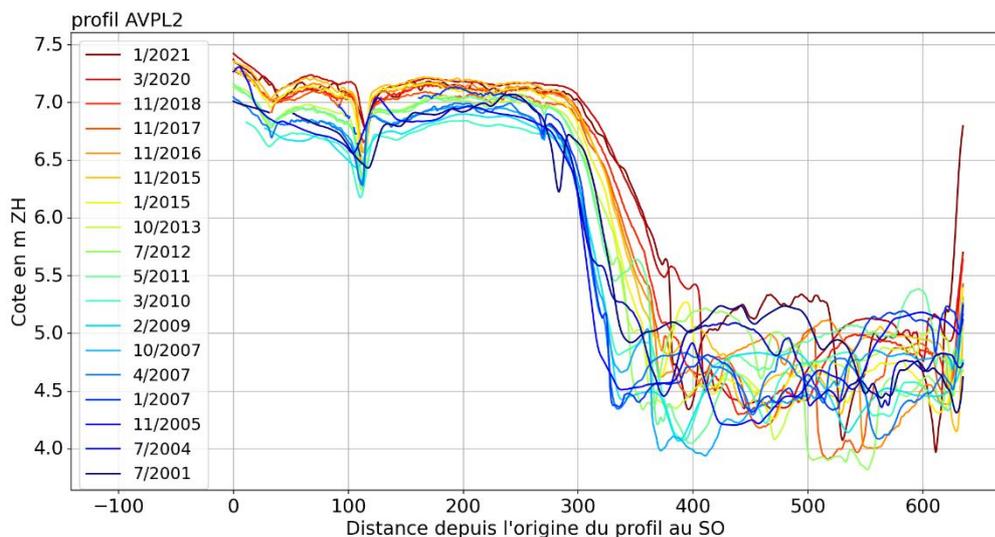
# Rapport d'avancement de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc



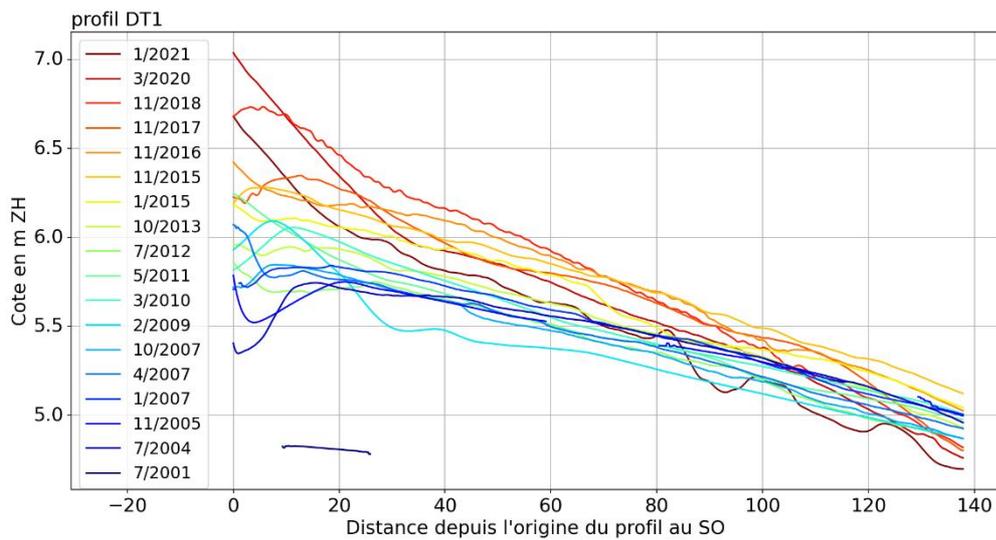
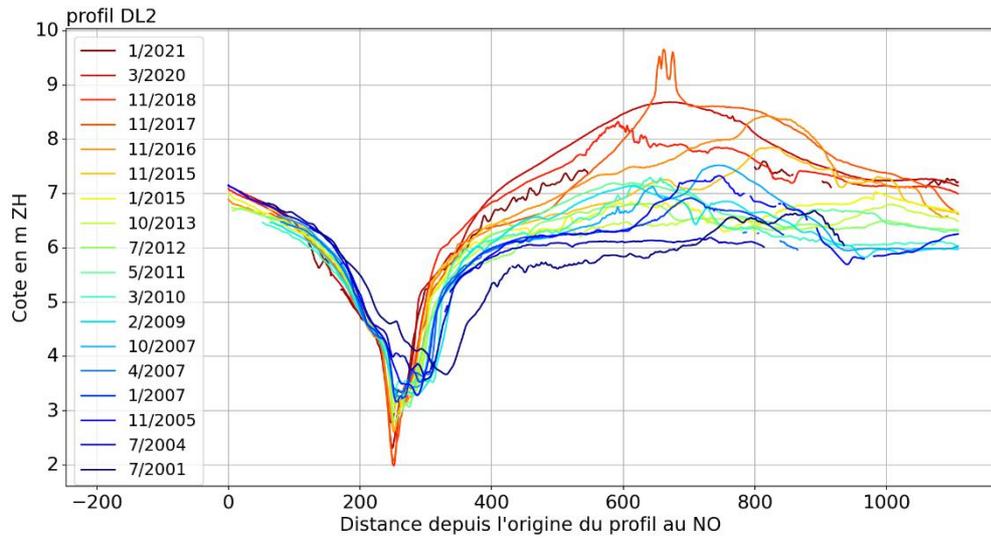
# Rapport d'avancement de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc



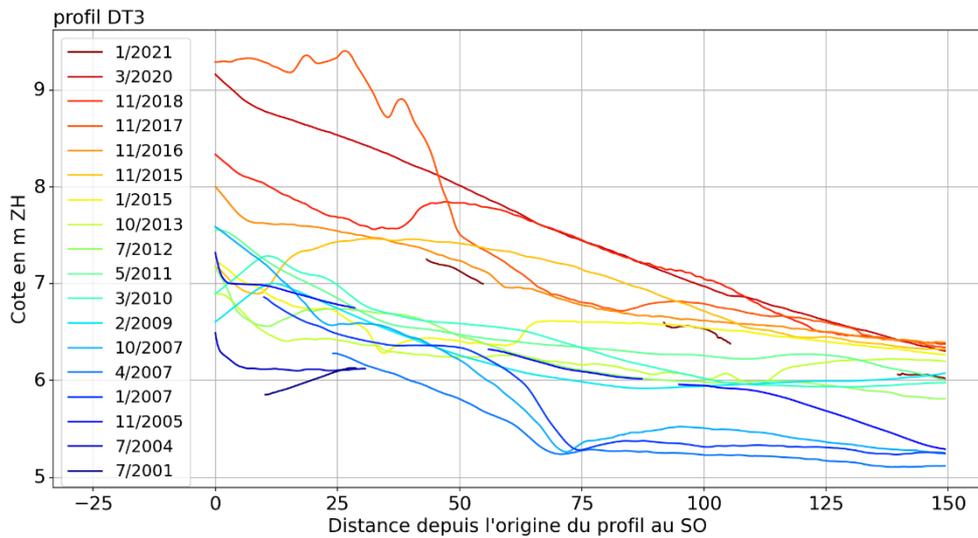
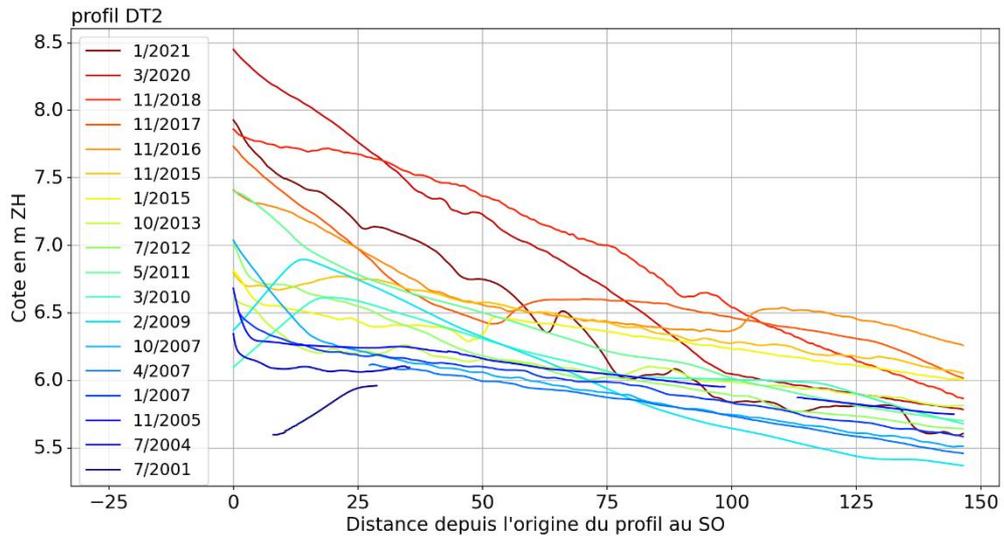
# Rapport d'avancement de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc



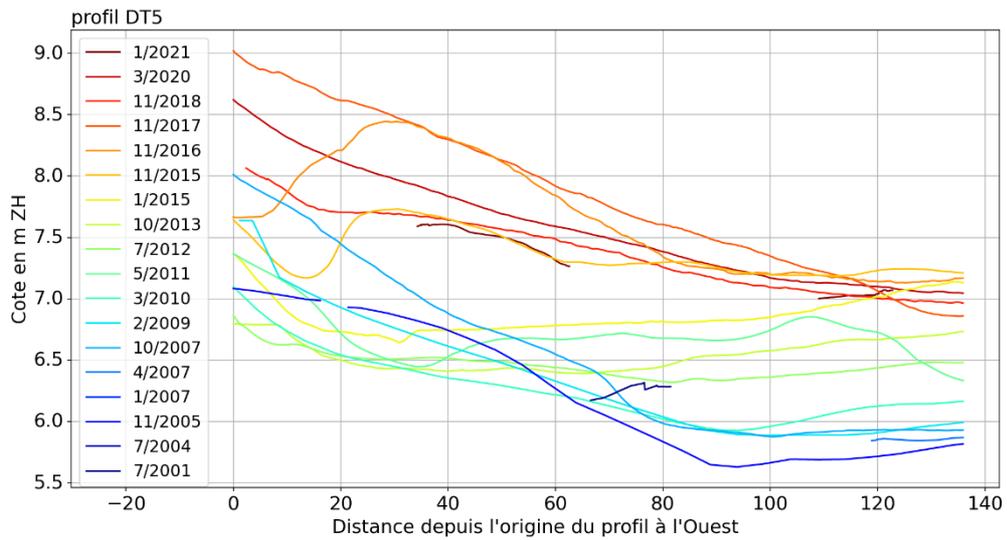
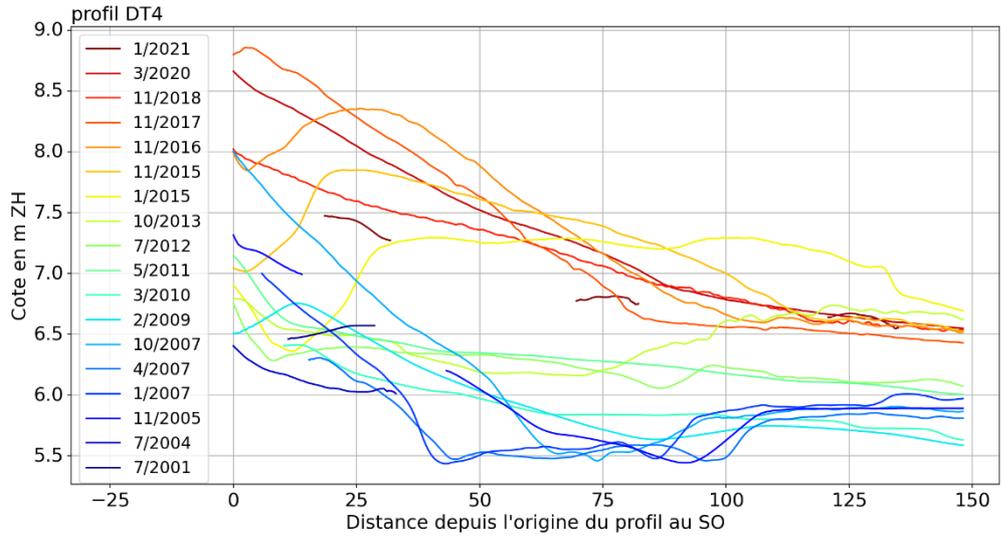
# Rapport d'avancement de la phase n°1

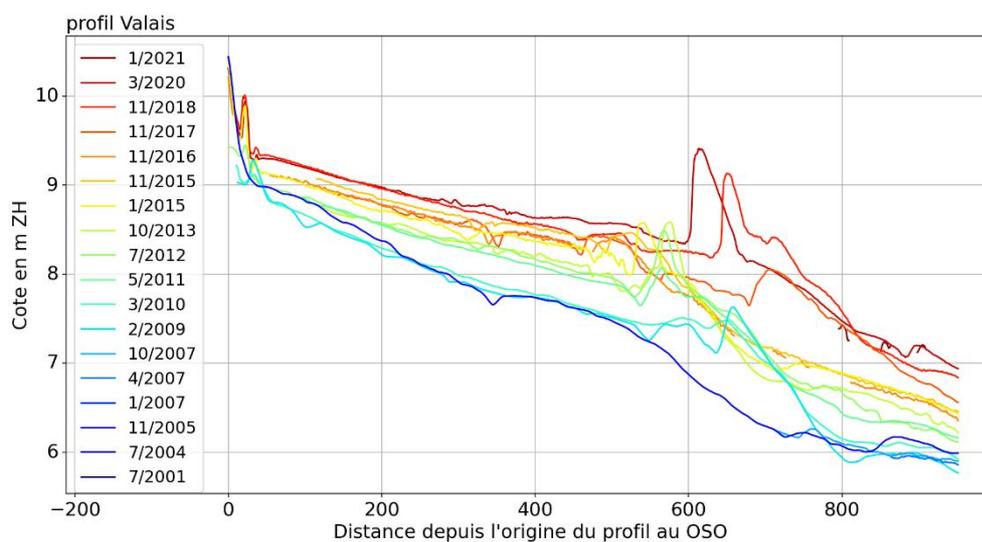
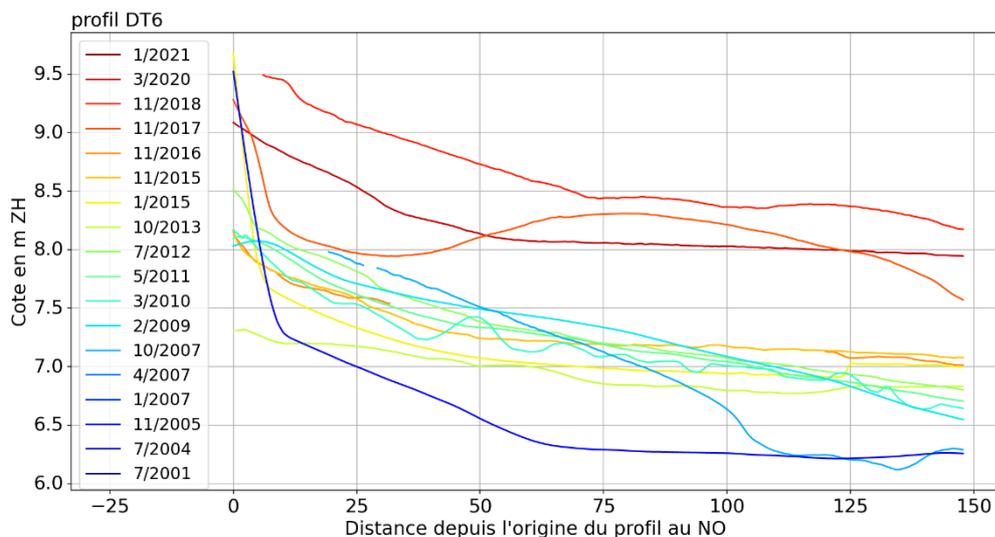
## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc



# Rapport d'avancement de la phase n°1

## Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué – Saint-Brieuc





### 8.5 ANNEXE 5 : COMPLEMENTS SUR LES ANALYSES PAR ZONES SUR LE SECTEUR DE L'AVANT-PORT/ZONE EXTERIEURE

### Moyenne et percentile 90 des cotes bathymétriques (m CM ; i.e. au-dessus du 0 hydrographique)

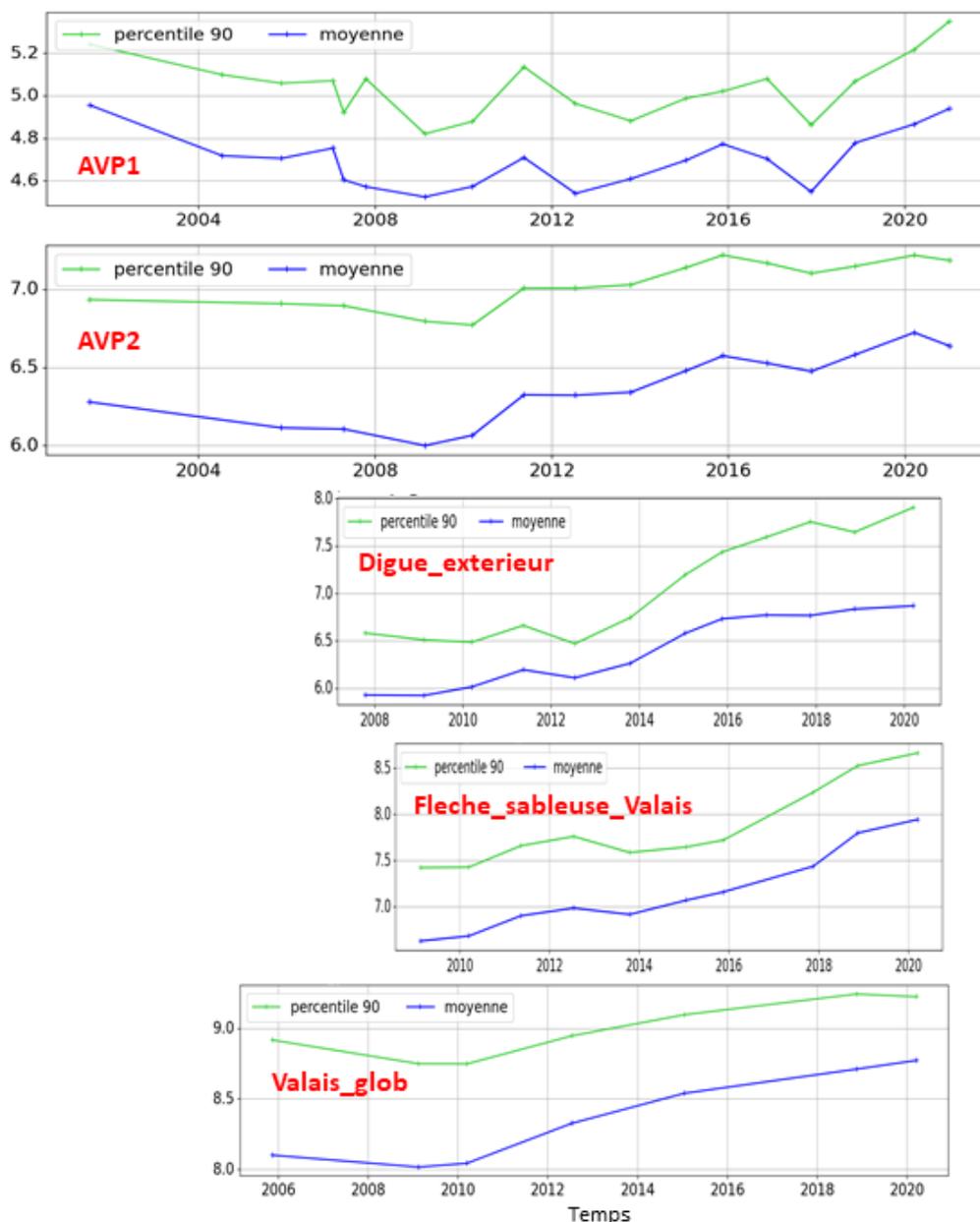


Figure 8-10. Evolution au cours du temps des cotes bathymétriques (moyenne, percentile 90 et maximale) pour l'ensemble des zones du secteur aval (incluant l'avant-port, devant le môle et le secteur de la plage du Valais).

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACTIMAR, 2012. PORT DE SAINT-BRIEUC LE LÉGUÉ – PROJET 4ÈME QUAI : ÉTUDE D'AGITATION, COURANTOLOGIE ET SÉDIMENTATION. Rapport d'étude.
- BCEOM, 1998. Extension du port de Saint-Brieuc / Le Légué - Projet d'infrastructures à court terme.
- CNEXO-COB, 1981. Extension du port du Légué de Saint Brieuc, étude d'impact sur l'environnement. Rapport d'étude.

- CREOCEAN, 2019. Port de Saint-Brieuc le Légué – Projet de construction d'un 4ème quai et son terre-plein dans l'avant-port. Mission de maîtrise d'œuvre – MC2 : Etudes hydrauliques  
Rapport «Hydrodynamique/Hydrosédimentaire.
- DHI, 2015. Plan de prévention des risques littoraux et d'inondation de la baie de Saint-Brieuc -  
Analyse historique.
- LCHF, 1977. Etudes relatives à l'extension du port du Légué (Laboratoire Central d'Hydraulique de France).
- Le Hir, P., 2008. Aide mémoire de dynamique sédimentaire.
- PB Environnement, 1983. Rétablissement des profondeurs et construction d'un endiguement à la pointe Cesson - Port de Saint-Brieuc / Le Légué (CCI).
- Poirier, C., Poitevin, C., Chaumillon, E., 2016. Comparison of estuarine sediment record with modelled rates of sediment supply from a western European catchment since 1500. *Comptes Rendus Geoscience* 348, 479–488.
- SOGREAH, 1996. Extension du port du Légué, Phase transitoire. Etude d'agitation, de courantologie et de sédimentologie. Rapport d'étude.