



Port du Légué

Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port



Rapport de la phase 1

Contrat POC-1942

Siège social

36, quai de la Douane – 29200 Brest – France
Tel : +33 298 44 24 51
Email : info@actimar.fr – Web : www.actimar.fr

ACTIMAR
Au service de la mer

Table des matières

1.	MOTIF ET OBJECTIF	21
2.	DESCRIPTION DES EVOLUTIONS MORPHO-SEDIMENTAIRES PASSEES	24
2.1	BREVE DESCRIPTION DU CONTEXTE HYDRO-MORPHO-SEDIMENTAIRE	24
2.1.1	Forçages météo-océaniques	25
2.1.2	Hydrologie et nature des fonds.....	28
2.2	EVOLUTIONS HISTORIQUES A MOYEN/LONG TERME (PLURI-DECENNALE A PLURI-CENTENNALE).....	32
2.2.1	Rappel de l'historique des aménagements.....	32
2.2.2	Tendances d'évolutions générales du fond de la baie de Saint-Brieuc	36
2.2.3	Tendances d'évolutions dans l'estuaire.....	41
2.3	EVOLUTIONS RECENTES A MOYEN/COURT TERME (PLURI-DECENNALE A PLURI-ANNUELLE)	46
2.3.1	Données disponibles	46
2.3.2	Evolutions sur la zone du port de plaisance et des bassins à flot	48
2.3.3	Evolution sur le secteur de l'avant-port, devant le môle, et sur la plage du Valais.....	54
2.4	SYNTHESE	68
3.	METHODOLOGIE SPECIFIQUE MISE EN ŒUVRE POUR L'ESTIMATION DES APPORTS SEDIMENTAIRES DU GOUËT	71
3.1	ANALYSES DE SEDIMENT	71
3.2	EVALUATION DE LA CHARGE EN SUSPENSION A PARTIR DES EVOLUTIONS MORPHOLOGIQUES DE FOND	74
4.	MODELISATION : MISE EN PLACE	77
4.1	OBJECTIF.....	77

4.2	CONSTRUCTION DES MODELES	77
4.2.1	Code de calcul	77
4.2.2	Sources de données	77
4.2.3	Maillages.....	80
4.3	MISE EN PLACE DES MODELES HYDRODYNAMIQUE ET D'ETATS DE MER	83
4.3.1	Paramétrage du modèle hydrodynamique et d'états de mer.....	83
4.3.2	Vérification / Calibration.....	84
4.4	MISE EN PLACE DES MODELES DE DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE	91
4.4.1	Dynamique sableuse.....	91
4.4.2	Dynamique des sédiments fins.....	91
4.5	DEFINITION DES SCENARIOS	93
4.5.1	Scénarios courts	93
4.5.2	Simulations longues	96

5. MODELISATION : RESULTATS DES SIMULATIONS A L'ECHELLE D'UNE MAREE..... 100

5.1	COURANTS.....	100
5.1.1	Dynamique de la marée	100
5.1.2	Influence des conditions (marnage, vagues et débit amont) sur les courants	100
5.2	VAGUES.....	107
5.3	DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE	109
5.3.1	Dynamiques des sables	109
5.3.2	Dynamiques des vases	112

6. SYNTHESE SUR LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE 115

6.1	SECTEUR EN AMONT DE L'ECLUSE (BASSINS A FLOT, PORT DE PLAISANCE).....	115
6.2	TENDANCE AU COMPLEMENT SUR LE SECTEUR DE L'AVANT-PORT	115
6.2.1	Rappel des tendances observées	115
6.2.2	Dynamique des sédiments marins.....	116
6.2.3	Influence du Gouët.....	117

6.3	DYNAMIQUE DEVANT LE MOLE ET SUR LE SECTEUR DE LA FLECHE SEDIMENTAIRE	118
6.3.1	Rappel des tendances observées	118
6.3.2	Analyse des résultats de modélisation.....	118
6.4	DYNAMIQUE DE L'ESTRAN AU DROIT DE LA PLAGE DU VALAIS	119
6.5	LIMITATIONS DE LA MODELISATION.....	120

7. BILANS SEDIMENTAIRES SUR UNE ANNEE : SIMULATIONS LONGUES 132

7.1	STRATEGIE DE MODELISATION.....	132
7.1.1	Sédiments sableux	132
7.1.2	Sédiments vaseux	135
7.2	EVALUATION DES VOLUMES DE SEDIMENTS DEPOSES DANS L'AVANT-PORT NATURELLEMENT	135
7.2.1	Sédiment sableux.....	135
7.2.2	Sédiment vaseux.....	138
7.3	EFFETS DES DEPOTS DEVANT LE MOLE (COTE EXTERIEUR)	139
7.3.1	Sédiment sableux.....	139
7.3.2	Sédiment vaseux.....	140
7.4	SYNTHESE	144

8. ANNEXES..... 145

8.1	ANNEXE 1 : COMPLEMENTS SUR LES EVOLUTIONS BATHYMETRIQUES HISTORIQUES .	145
8.2	ANNEXE 2 : DONNEES GRANULOMETRIQUES SUR LE SECTEUR AMONT (PORT DE PLAISANCE, BASSINS A FLOT).....	148
8.3	ANNEXE 3 : DIFFERENTIELS BATHYMETRIQUES SUR LA ZONE DU PORT DE PLAISANCE ET DES BASSINS A FLOT	150
8.4	ANNEXE 4 : COMPLEMENT SUR LES COMPARAISONS DES LEVES – ANALYSES PAR PROFILS, SECTEUR DE L'AVANT-PORT/ZONE EXTERIEURE	151
8.5	ANNEXE 5 : COMPLEMENTS SUR LES ANALYSES PAR ZONES SUR LE SECTEUR DE L'AVANT-PORT/ZONE EXTERIEURE	161
8.6	ANNEXE 6 : CONCENTRATION EN MES AU COURS D'UNE MAREE DE VIVE-EAU (02/02/2018, COEFFICIENT 109) LIEE AUX DEPOTS DES SEDIMENTS DRAGUES.....	162
8.7	ANNEXE 7 : FIGURES AU FORMAT A3 POUR LES SCENARIOS COURTS	164

8.7.1	Courant	164
8.7.2	Vague.....	189
8.7.3	Dynamique des sables	197
8.7.4	Dynamique des vases	250
8.8	ANNEXE 8 : FIGURES AU FORMAT A3 POUR LES SCENARIOS LONGS	289

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 298

Table des illustrations

Figure 1-1. Localisation du port du Légué dans la baie de Saint-Brieuc	21
Figure 1-2. Port du Légué et localisation des zones de dragage dans l'avant-port (bleu) et de dépôt derrière la digue (jaune)	22
Figure 2-1 Levé LIDAR RGE ALTI d'août 2011 sur l'ensemble de l'Anse d'Yffiniac (référence verticale : zéro hydrographique au Légué).....	25
Figure 2-2 Références Altimétriques Maritimes du SHOM (2020) pour le site du Légué.	26
Figure 2-3 Roses des vents à Saint-Brieuc pour les années 2002 à 2009 (source : rapports Actimar de 2012 et Creocan de 2019).	26
Figure 2-4 Exploitation de la base de données IOWAGA sur la période 2002-2009 sous forme de cartes de moyennes/maximums annuels de Hs, et de roses de Hs (mer totale ou mers du vent) au niveau de deux stations situées à proximité du site du Légué.	27
Figure 2-5 Conditions d'agitation simulées par CREOCEAN en 2019 pour une houle centennale de NNE associées à un niveau de pleine mer de vive-eau.....	28
Figure 2-6 Débits fluviaux du Gouët et du Gouëdic alimentant le port du Légué.	28
Figure 2-7 Concentrations de matières en suspension (MES en mg/l) moyennes (annuelles ou trimestrielles) mesurées par satellite entre 2016 et 2020 (source : MARC/IFREMER).	29
Figure 2-8 Carte de turbidité moyenne annuelle en surface à partir de mesures ponctuelles (CNEXO, 1981).	30
Figure 2-9 Cartes de granulométrie médiane et de teneur en vase du sédiment superficiel (source : LCHF, 1977)	31
Figure 2-10 Carte des faciès sédimentaires du fond de baie de Saint-Brieuc (Bonnot-Courtois et Dreau, 2002).	31
Figure 2-11 Exemples de cartes anciennes montrant les premiers aménagements de l'estuaire du Légué (e.g. quai de l'aiguillon en 1770).	32
Figure 2-12 Plans du port du Légué en 1878 et 1916 (source : DHI, 2015) et image aérienne du site en 1951 (source : IGN).	33
Figure 2-13 Plan du port du Légué à la fin des années 70 (source : CCI)	34
Figure 2-14 Images aériennes de l'embouchure du Gouët avant et après la construction de l'endiguement à la pointe Cesson, et schéma du projet d'aménagement tel qu'il avait été envisagé initialement (rapport CNEXO-COB, 1981).	35
Figure 2-15 Construction du môle entre septembre 1999 et juin 2021 (fond de plan : image aérienne IGN de 2015).....	35

Figure 2-16 Données bathymétriques anciennes (lots SHOM de 1867, 1927 et 2001, et sondes du LCHF de 1977), et localisation du profil de comparaison.....	36
Figure 2-17 Données bathymétriques du SHOM de 1927.	38
Figure 2-18 Comparaisons des évolutions de 1867 à 2011 le long du profil illustré sur la Figure 2-16.	38
Figure 2-19 Différentiel bathymétrique entre 2011 (données RGE ALTI) et 1927 (lot SHOM). Le contour noir correspond à la zone considérée pour évaluer la tendance générale d'évolution (cf. encadré statistiques).	39
Figure 2-20 : Comparaison d'une photographie aérienne ancienne (1926, Ifremer) et d'une image satellite actuelle (source : CREOCEAN, 2019).	40
Figure 2-21 Différentiel bathymétrique entre juin 2020 (données LIDAR UBS) et août 2011 (RGE ALTI) dans l'anse d'Yffiniac. Les évolutions sont détaillées le long d'un profil orienté SSO-NNE.	40
Figure 2-22 Teneur en vase des sédiments de fond sur la zone du fond de l'avant-port, du port de plaisance, des bassins à flot, et du déversoir (source : rapport LCHF, 1977).	42
Figure 2-23 Proportion de vase marine dans le sédiment de fond sur la zone du port de plaisance, des bassins à flot, et du déversoir (source : rapport LCHF, 1977).	42
Figure 2-24 Analyses granulométriques réalisées par le laboratoire Eurofins en juillet 2019 sur la zone amont incluant le port de plaisance, les bassins à flot, et le déversoir.	43
Figure 2-25 Visualisation du colmatage du bras amont (avec un estran initialement couvert de sédiments grossiers) par des sédiments fins (vase).	44
Figure 2-26 Visualisation d'un estran initialement couvert de sédiments grossiers (cailloutis...), secteur « Sous-La-Tour ».....	44
Figure 2-27. Carottages sédimentaires réalisés par la DDE des Côtes-d'Armor en 1978.	45
Figure 2-28. Analyses granulométriques réalisées par le laboratoire Eurofins en juillet 2019 sur la zone de l'avant-port.	45
Figure 2-29. Cartes de granulométrie médiane et de fraction vaseuse dans les anses d'Yffiniac et de Morieux (source : rapport CNEXO, 1980).	46
Figure 2-30 Emprises des levés bathymétriques mis à disposition par la CCI pour les analyses morpho-sédimentaires à l'extérieur du site et dans le secteur de l'avant-port.	47
Figure 2-31 Emprises des levés bathymétriques mis à disposition par la CCI pour les analyses morpho-sédimentaires sur le secteur des bassins à flot et du port de plaisance.	47
Figure 2-32. Levés topo-bathymétriques (CCI22) de 2009, 2015 et 2021 sur le secteur des bassins à flot et du port de plaisance.	48
Figure 2-33 Evolutions des fonds de 2009 à 2021 (en m) – secteur port de plaisance/bassins à flot.	49
Figure 2-34. Evolutions des fonds de 2009 à 2021 (en m/an) – secteur port de plaisance/bassins à flot.	49

Figure 2-35. Localisation et orientation des profils utilisés pour les analyses morpho-sédimentaires – secteur port de plaisance/bassins à flot.....	50
Figure 2-36. Comparaison des levés bathymétriques le long du profil PDP1.	50
Figure 2-37. Comparaison des levés bathymétriques le long du profil PDP2.	51
Figure 2-38. Comparaison des levés bathymétriques le long du profil PDP3.	51
Figure 2-39. Contours définis pour les bilans sédimentaires – secteur port de plaisance/bassins à flot.	52
Figure 2-40. Evolution au cours du temps des cotes bathymétriques (moyenne et percentile 90) et des volumes de sédiment au-dessus du niveau +3 m CM (avec une indication d'épaisseur équivalente sur la surface considérée) pour la zone « secteur_amont ».	52
Figure 2-41. Evolution au cours du temps des cotes bathymétriques (moyenne, percentile 90) et des volumes de sédiment au-dessus du niveau +3 m CM (avec une indication d'épaisseur équivalente sur la surface considérée) pour la zone « port_de_plaisance ».	53
Figure 2-42. Evolution au cours du temps des cotes bathymétriques (moyenne, percentile 90) et des volumes de sédiment au-dessus du niveau +3 m CM (avec une indication d'épaisseur équivalente sur la surface considérée) pour la zone « Bassins ».	53
Figure 2-43 . Levé topo-bathymétrique (CCI22) de 1983.....	54
Figure 2-44. Levés topo-bathymétriques (CCI22) de 2005 à 2020 à l'extérieur du site et dans le secteur de l'avant-port.	55
Figure 2-45. Evolutions des fonds entre 1983 et 2005.	57
Figure 2-46. Evolutions des fonds entre 2005 et 2020.	57
Figure 2-47. Evolutions des fonds entre 2011 et 2020.	58
Figure 2-48. Evolutions des fonds entre mars 2020 et mars 2021.	58
Figure 2-49. Profils définis pour les analyses morpho-sédimentaires - secteur de l'avant-port et zone extérieure.	60
Figure 2-50. Comparaison des levés bathymétriques le long des profils AVP1, AVP3, et AVP6.	60
Figure 2-51. Comparaison des levés bathymétriques le long des profils AVPL1, AVPL2, DL1, et DL2.	61
Figure 2-52. Comparaison des levés bathymétriques le long des profils DT3 à DT6.	61
Figure 2-53. Comparaison des levés bathymétriques le long du profil « Valais ».	62
Figure 2-54. Synthèse des dynamiques d'accrétion/érosion et progradation/recul obtenues à partir des analyses comparatives des levés bathymétriques de la CCI entre juillet 2001 et mars 2020. ...	62
Figure 2-55. Contours définis pour les bilans sédimentaires - secteur de l'avant-port et zone extérieure.	63

Figure 2-56. Evolution au cours du temps des volumes de sédiment au-dessus du niveau +5 m CM (avec une indication d'épaisseur équivalente sur la surface considérée) pour l'ensemble des zones du secteur aval (incluant l'avant-port, devant le môle et le secteur de la plage du Valais).	64
Figure 2-57 Comparaison des variations du volume sédimentaire et du volume oscillant de marée sur l'ensemble de l'avant-port (zone AVP_GLOB étendue jusqu'à l'écluse/barrage déversoir) entre fin 2005 et début 2021.	65
Figure 2-58. Analyses granulométriques réalisées par la société ASTERIE et juin/juillet 2005 de part et d'autre de la digue de l'avant-port.....	66
Figure 2-59. Analyses granulométriques réalisées par la CCI en décembre 2020 pour 3 stations situées de part et d'autre de la digue de protection de l'avant-port.....	67
Figure 2-60. Evolution de la fraction vaseuse du sédiment superficiel sur la période 2007-2021 aux 3 stations de suivi de la CCI (cf. Figure 2-59.), ainsi que sur les secteurs de la flèche sableuse et de la plage du Valais.	67
Figure 3-1 Rappel de la localisation des prélèvements sédimentaires réalisés par le laboratoire Eurofins en juillet 2019 dans le port de plaisance et dans les bassins à flot.	72
Figure 3-2 Estimation des flux solides (kg/s) et des concentrations de MES (mg/l) à partir des différentiels volumiques de sédiment sur la zone « secteur_ament » entre 2009 et 2021. Cas où $W_s=0.1$ mm/s.....	75
Figure 3-3 Estimation des flux solides (kg/s) et des concentrations de MES (mg/l) à partir des différentiels volumiques de sédiment sur la zone « port_de_plaisance » entre 2009 et 2021. Cas où $W_s=0.1$ mm/s.....	75
Figure 3-4 Estimation des flux solides (kg/s) et des concentrations de MES (mg/l) à partir des différentiels volumiques de sédiment sur la zone « Bassins » entre 2009 et 2021. Cas où $W_s=0.1$ mm/s.....	76
Figure 4-1. Localisation des instruments de mesures lors de la campagne	79
Figure 4-2. Maillage et bathymétrie du modèle : emprise globale.....	81
Figure 4-3. Maillage et bathymétrie du modèle pour les simulations courtes (maillage 1) : zoom sur la zone d'étude	82
Figure 4-4. Maillage et bathymétrie du modèle pour les simulations longues (maillage 2) : zoom sur la zone d'étude	82
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).	84
Figure 4-6. Comparaison des niveaux d'eau prédits par le SHOM et par le modèle en 3 ports. La couleur renseigne sur la densité des points.	85
Figure 4-7. Comparaison modèle-mesures pendant la campagne de mesures au point ADCP.....	86
Figure 4-8. Comparaison modèle-mesures pendant la campagne de mesures au point ADCP : indicateurs statistiques. La couleur renseigne sur la densité des points.	87

Figure 4-9 Comparaison modèle-mesures des Hs aux 3 points instrumentés d'un capteur de pression	89
Figure 4-10 Comparaison modèle-mesures de la période moyenne ($T_{m0.1}$) aux 3 points instrumentés d'un capteur de pression	90
Figure 4-11 Concentration moyenne mensuelle au large du Légué d'après les données satellitales MARC Ifremer).	92
Figure 4-12 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.	93
Figure 4-13 Synthèse des caractéristiques des états de mer au large du Port du Légué	94
Figure 4-14 Hauteurs significatives extrêmes au point d'intérêt au large du port du Légué.	95
Figure 4-15 Localisation du point HOMERE étudié pour le calcul de transport solide entrant dans le port.	97
Figure 4-16 Localisation des analyses granulométriques disponibles réalisées par la CCI dans la zone d'étude.	97
Figure 4-17. Concentration moyenne annuelle de MES dans le Golfe Normand Breton sur la période 2016-2020 (source MARC/Ifremer).	98
Figure 4-18. Volumes de sédiments dragués par mois dans l'avant-port du Légué. Les couleurs correspondent aux différentes années.	98
Figure 4-19. Volumes de sédiments dragués dans le port du Légué, déposés derrière la digue et stockés à terre par an.	99
Figure 4-20. Débit du Gouët en aval du barrage de Saint Barthélémy.....	99
Figure 5-1 Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1.	101
Figure 5-2 Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) - Scénario 1.....	102
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.	103
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.....	104
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	105
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	106
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.....	108

Figure 5-8 Transport solide résiduel au cours d'une marée pour l'ensemble des scénarios courts	110
Figure 5-9 Evolution des fonds au cours d'une marée pour l'ensemble des scénarios courts	111
Figure 5-10 Localisation des séries temporelles	112
Figure 5-11 Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 2	113
Figure 5-12 Cartographie des maximum de la contrainte exercée sur le fond pour le scénario 2 ..	113
Figure 5-13 Séries temporelles des épaisseurs de dépôt vaseux et des contraintes exercées sur le fond pour les 8 scénarios.	114
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).	122
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).	123
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.....	124
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).	125
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).....	126
Figure 6-6 Sensibilité des épaisseurs de vase (marine) déposées en fonction du débit fluvial prescrit en amont.....	127
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 m ³ /s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.....	128
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.....	129
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.....	130
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 l maillage 2 (maille à 12 m dans l'avant-port)	133
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.....	136

Figure 7-3 Evolution des fonds sableux au bout d'un an de simulation lors de la simulation A (bathymétrie 2020).	137
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).	137
Figure 7-5 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation : apport maritime	138
Figure 7-6 Présentation du MNT utilisé pour le test de sensibilité avec bathymétrie arasée dans la zone de dépôt.	139
Figure 7-7 Cartographie du transport résiduel au cours du cycle de marée du 06/01/2018 matin (marée de vive-eau 92).....	140
Figure 7-8 Localisation des zones de dépôts.	141
Figure 7-9 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation : apport lié au dépôt des sédiments dragués	142
Figure 7-10 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation à une échelle élargie : comparaison des résultats entre les apports maritimes et les apports lié au dépôt des sédiments dragués.....	143
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). ..	145
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).	146
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).	146
Figure 8-4 Evolution historique de la position de l'isobathe 0 m CM.	147
Figure 8-5 Evolution historique de la position de l'isobathe +3 m CM.....	147
Figure 8-6. Analyses granulométriques réalisées par la CCI22 en octobre 2001 (source : rapport IDRA, 2002).	148
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).	149
Figure 8-8. Analyses granulométriques réalisées par la Direction Départementale de l'Equipement en 1983 sur le sédiment le plus vaseux potentiellement dragué afin d'évaluer l'efficacité de la couche filtre de l'endiguement à contenir les polluants de la vase mise à décanter (source : rapport PB Environnement, 1983).	149
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).....	150

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).....	161
Figure 8-11 Concentration en MES au cours d'une marée de vive-eau (02/02/2018, coefficient 109) liée aux dépôts des sédiments dragués – Marée montante	162
Figure 8-12 Concentration en MES au cours d'une marée de vive-eau (02/02/2018, coefficient 109) liée aux dépôts des sédiments dragués – Marée descendante.....	163
Figure 8-13 Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 1/4.	165
Figure 8-14: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 2/4.....	166
Figure 8-15: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 3/4.....	167
Figure 8-16: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 4/4.....	168
Figure 8-17: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 1/4.....	169
Figure 8-18: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 2/4.....	170
Figure 8-19: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 3/4.....	171
Figure 8-20: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 4/4.....	172
Figure 8-21: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 1.	173
Figure 8-22: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 1.	174
Figure 8-23: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 2.	175
Figure 8-24: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 2.	176
Figure 8-25: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 3.	177
Figure 8-26: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 3.	178
Figure 8-27: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 4.	179
Figure 8-28: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 4.	180
Figure 8-29: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 5.	181
Figure 8-30: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 5.	182
Figure 8-31: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 6.	183

Figure 8-32: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 6.	184
Figure 8-33: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 7.	185
Figure 8-34: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 7.	186
Figure 8-35: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 8.	187
Figure 8-36: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 8.	188
Figure 8-37: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 2.	190
Figure 8-38: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 3.	191
Figure 8-39: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 4.	192
Figure 8-40: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 5.	193
Figure 8-41: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 6.	194
Figure 8-42: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 7.	195
Figure 8-43: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 8.	196
Figure 8-44: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 1 - Zoom sur l' avant-port.	198
Figure 8-45: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 2 - Zoom sur l' avant-port.	199
Figure 8-46: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 3 - Zoom sur l' avant-port.	200
Figure 8-47: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 4 - Zoom sur l' avant-port.	201
Figure 8-48: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 5 - Zoom sur l' avant-port.	202
Figure 8-49: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 6 - Zoom sur l' avant-port.	203
Figure 8-50: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 7 - Zoom sur l' avant-port.	204
Figure 8-51: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 8 - Zoom sur l' avant-port.	205

Figure 8-52: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 1 - Zoom sur le site d'étude.	206
Figure 8-53: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom sur le site d'étude.	207
Figure 8-54: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 3 - Zoom sur le site d'étude.	208
Figure 8-55: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 4 - Zoom sur le site d'étude.	209
Figure 8-56: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 5 - Zoom sur le site d'étude.	210
Figure 8-57: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom sur le site d'étude.	211
Figure 8-58: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 7 - Zoom sur le site d'étude.	212
Figure 8-59: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 8 - Zoom sur le site d'étude.	213
Figure 8-60: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 1 - Baie de Saint-Brieuc.	214
Figure 8-61: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 3 - Baie de Saint-Brieuc.	215
Figure 8-62: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 1 - Zoom sur l' avant-port.	217
Figure 8-63: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom sur l' avant-port.	218
Figure 8-64: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 3 - Zoom sur l' avant-port.	219
Figure 8-65: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 4 - Zoom sur l' avant-port.	220
Figure 8-66: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 5 - Zoom sur l' avant-port.	221
Figure 8-67: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom sur l' avant-port.	222
Figure 8-68: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 7 - Zoom sur l' avant-port.	223
Figure 8-69: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 8 - Zoom sur l' avant-port.	224

Figure 8-70: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 1 - Zoom sur le site d'étude.	225
Figure 8-71: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom sur le site d'étude.	226
Figure 8-72: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 3 - Zoom sur le site d'étude.	227
Figure 8-73: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 4 - Zoom sur le site d'étude.	228
Figure 8-74: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 5 - Zoom sur le site d'étude.	229
Figure 8-75: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom sur le site d'étude.	230
Figure 8-76: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 7 - Zoom sur le site d'étude.	231
Figure 8-77: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 8 - Zoom sur le site d'étude.	232
Figure 8-78: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 1.	234
Figure 8-79: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 1.	235
Figure 8-80: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 2.	236
Figure 8-81: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 2.	237
Figure 8-82: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 3.	238
Figure 8-83: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 3.	239
Figure 8-84: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 4.	240
Figure 8-85: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 4.	241
Figure 8-86: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 5.	242
Figure 8-87: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 5.	243
Figure 8-88: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 6.	244
Figure 8-89: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 6.	245
Figure 8-90: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 7.	246
Figure 8-91: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 7.	247
Figure 8-92: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 8.	248
Figure 8-93: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 8.	249

Figure 8-94: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 1.
..... 251

Figure 8-95: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 1..... 252

Figure 8-96: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 1..... 253

Figure 8-97: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 2.
..... 254

Figure 8-98: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 2..... 255

Figure 8-99: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 2..... 256

Figure 8-100: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 3.
..... 257

Figure 8-101: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 3..... 258

Figure 8-102: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 3..... 259

Figure 8-103: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 4.
..... 260

Figure 8-104: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 4..... 261

Figure 8-105: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 4..... 262

Figure 8-106: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 5.
..... 263

Figure 8-107: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 5..... 264

Figure 8-108: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 5..... 265

Figure 8-109: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 6.
..... 266

Figure 8-110: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 6..... 267

Figure 8-111: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 6..... 268

Figure 8-112: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 1. 270

Figure 8-113: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 2. 271

Figure 8-114: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 3. 272

Figure 8-115: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 4. 273

Figure 8-116: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 5. 274

Figure 8-117: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 6. 275

Figure 8-118: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 1 - Zoom sur le site d'étude. 277

Figure 8-119: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom sur le site d'étude.	278
Figure 8-120: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 3 - Zoom sur le site d'étude.	279
Figure 8-121: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 4 - Zoom sur le site d'étude.	280
Figure 8-122: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 5 - Zoom sur le site d'étude.	281
Figure 8-123: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom sur le site d'étude.	282
Figure 8-124: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom du pont de pierre à l'avant-port.....	283
Figure 8-125: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom du pont de pierre à l'avant-port.....	284
Figure 8-126: Epaisseurs de vases déposées à la fin du 1e cycle de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de 12 m3/s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.....	285
Figure 8-127: Epaisseurs de vases déposées à la fin du 2e cycle de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de 12 m3/s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.....	286
Figure 8-128: Epaisseurs de vases déposées à la fin du 3e cycle de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de 12 m3/s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.....	287
Figure 8-129: Epaisseurs de vases déposées à la fin du 4e cycle de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de 12 m3/s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.....	288
Figure 8-130 Evolution des fonds sableux au bout d'un an de simulation lors de la simulation A (bathymétrie 2020).	290
Figure 8-131 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).	291
Figure 8-132 Cartographie du transport résiduel au cours du cycle de marée du 06/01/2018 matin (marée de vive-eau 92) ; Bathymétrie initiale correspondant à la bathymétrie arasée devant le mole.	293
Figure 8-133 Cartographie du transport résiduel au cours du cycle de marée du 06/01/2018 matin (marée de vive-eau 92) ; Bathymétrie initiale correspondant à celle de 2020.	294
Figure 8-134 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation : apport lié au dépôt des sédiments dragués	295
Figure 8-135 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation à une échelle élargie : apports maritimes.	296

Figure 8-136 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation à une échelle élargie : apports liés au dépôt des sédiments dragués..... 297

Suivi des modifications

Version	Modifications	Rédacteurs	Validation	Date
V0.1	Version initiale	Baptiste Mengual Aurélie Rivier	Benoît Waeles Olivier Raillard	18/03/2022
V1.0	Rapport complet	Baptiste Mengual Aurélie Rivier	Benoît Waeles Olivier Raillard	19/05/2022
V2.1	Prise en compte des remarques	Baptiste Mengual Aurélie Rivier		08/09/2022
V2.2	Ajout des figures au format A3 en annexe	Aurélie Rivier		28/09/2022

Liste de diffusion

Arnaud Marrec	Région Bretagne

1. MOTIF ET OBJECTIF

Le port du Légué est situé sur la Communauté d'Agglomération de Saint-Brieuc, et s'étend sur environ 3,5 km depuis le pont de Pierre jusqu'à l'extrémité de la digue d'enclôture de la Pointe de Cesson, à l'embouchure du Gouët.



Figure 1-1. Localisation du port du Légué dans la baie de Saint-Brieuc

Son avant-port de commerce (zone à échouage) nécessite d'être dragué (voir figure ci-dessous) pour ses besoins opérationnels. La technique de dragage telle que définie dans l'arrêté préfectoral consiste à retirer à marée basse les sédiments dans la zone de dragage de l'avant-port et à aller les déposer dans une zone localisée derrière le môle, à l'aide d'engins de chantier motorisés.



Figure 1-2. Port du Légué et localisation des zones de dragage dans l'avant-port (bleu) et de dépôt derrière la digue (jaune)

À la suite de la décision d'arrêter la pratique actuelle de dragage en juin 2020, de nouvelles solutions pérennes qui ne dépendent pas de la réalisation du 4ème quai sont recherchées afin à la fois de maintenir l'accès au port de commerce, de préserver l'environnement de la réserve Naturelle de la Baie de Saint Brieuc et de limiter les phénomènes qui font l'objet de plaintes par les riverains (bruits et gênes visuelles des engins, ensablement de la plage du Valais, apparition d'une langue de sable...).

Les principaux objectifs de cette étude sont les suivants :

- Comprendre les mouvements sédimentaires observés depuis la création de l'extension de l'avant-port, du môle de protection du plan d'eau et des dépôts récurrents de sédiment réalisés par la CCI ;
- Réévaluer la redistribution sédimentaire des matériaux à draguer de l'avant-port en faisant évoluer les pratiques passées et en identifiant les conditions de rejet les moins impactantes pour la baie et les plus favorables à la dispersion des sédiments dragués ;
- Evaluer l'intérêt d'une revalorisation des sables extraits après séparation granulométrique en vue de recharger les plages voisines de l'avant-port.

Le plan de travail a été conçu (par la Région Bretagne) en trois phases :

- La phase 1 doit permettre de décrire le fonctionnement hydro-sédimentaire actuel de la zone d'étude, à l'échelle de la baie et du port et en intégrant le fonctionnement des ouvrages hydrauliques ;

- En phase 2 une analyse est conduite sur les effets hydro-sédimentaires des aménagements successifs du port et des pratiques, offrant ainsi une vision explicative des évolutions constatées ;
- Sur la base des précédents enseignements, la phase 3 débouche sur des propositions de solutions efficaces de gestion de sédiments qui préservent l'environnement.

La réalisation de l'étude repose de manière assez fondamentale sur des modélisations numériques qui simulent les conditions hydrodynamiques et les mouvements sédimentaires sous l'action combinée des courants et de l'agitation.

Ce document constitue le rapport de la phase 1, il est composé des volets suivants :

- Une première analyse morpho-sédimentaire qui documente et explique à partir des observations, les évolutions passées et récentes à l'échelle de la baie et du port ;
- Une présentation des outils de modélisation déployés et des vérifications / calages effectués en s'appuyant sur des données d'observations ;
- Une présentation et une analyse des résultats de modélisation obtenus sur les conditions hydrodynamiques (courant, agitation) et le transport sédimentaire à différentes échelles de temps ;
- Une synthèse du fonctionnement hydro-sédimentaire de la zone d'étude, combinant les résultats des premières analyses et les enseignements des modélisations.

2. DESCRIPTION DES EVOLUTIONS MORPHO-SEDIMENTAIRES PASSEES

Les analyses morpho-sédimentaires reposent sur l'exploitation de données bathymétriques et sédimentologiques disponibles sur la zone d'étude. Pour les évolutions morphologiques, un nombre important de levés bathymétriques (entre 1983 et 2021) mis à disposition par la Chambre de Commerce et d'Industrie des Côtes d'Armor (CCI) constitue la base principale des analyses.

De nombreux documents d'archives (également mis à disposition par la CCI) viennent compléter ces analyses, et apportent notamment des informations sur la nature des sédiments mobilisés (plus ou moins sablo/vaseux) et sur les tendances évolutives morpho-sédimentaire à plus long terme d'un système estuarien largement aménagé. Ces documents incluent des études d'impact ou de faisabilité en lien avec les différentes phases de modernisation du port avant la création de l'endiguement à la Pointe Cesson (études réalisées entre 1975 et 1985 par la CCI, le LCHF, PB Environnement ou la société CNEXO-COB), ou avant la construction de la digue de protection de l'avant-port (études réalisées entre 1996 et 1998 par SOGREAH et BCEOM).

2.1 BREVE DESCRIPTION DU CONTEXTE HYDRO-MORPHO-SEDIMENTAIRE

Le port du Légué est localisé en fond de baie de Saint-Brieuc, en Bretagne Nord. C'est un port aménagé le long de l'estuaire du Gouët qui débouche à l'entrée de l'anse d'Yffiniac. Les données topographiques RGEAlti de 2011 (Lidar) sur le site du Légué et plus globalement sur l'ensemble de l'anse d'Yffiniac sont illustrées sur la Figure 2-1. A l'embouchure du Légué, la cote du fond varie globalement entre +4 et +7 m CM.

Les éléments de contexte sur les forçages météo-océaniques présentés par la suite sont principalement issus des rapports d'étude SOGREAH (2006), Actimar (2012) et CREOCEAN (2019). Leur description est volontairement succincte car les circulations hydrodynamiques et les conditions de vagues sur la zone d'étude seront plus largement décrites et analysées dans la section dédiée à la modélisation numérique (mise en place dans le cadre de la présente étude).

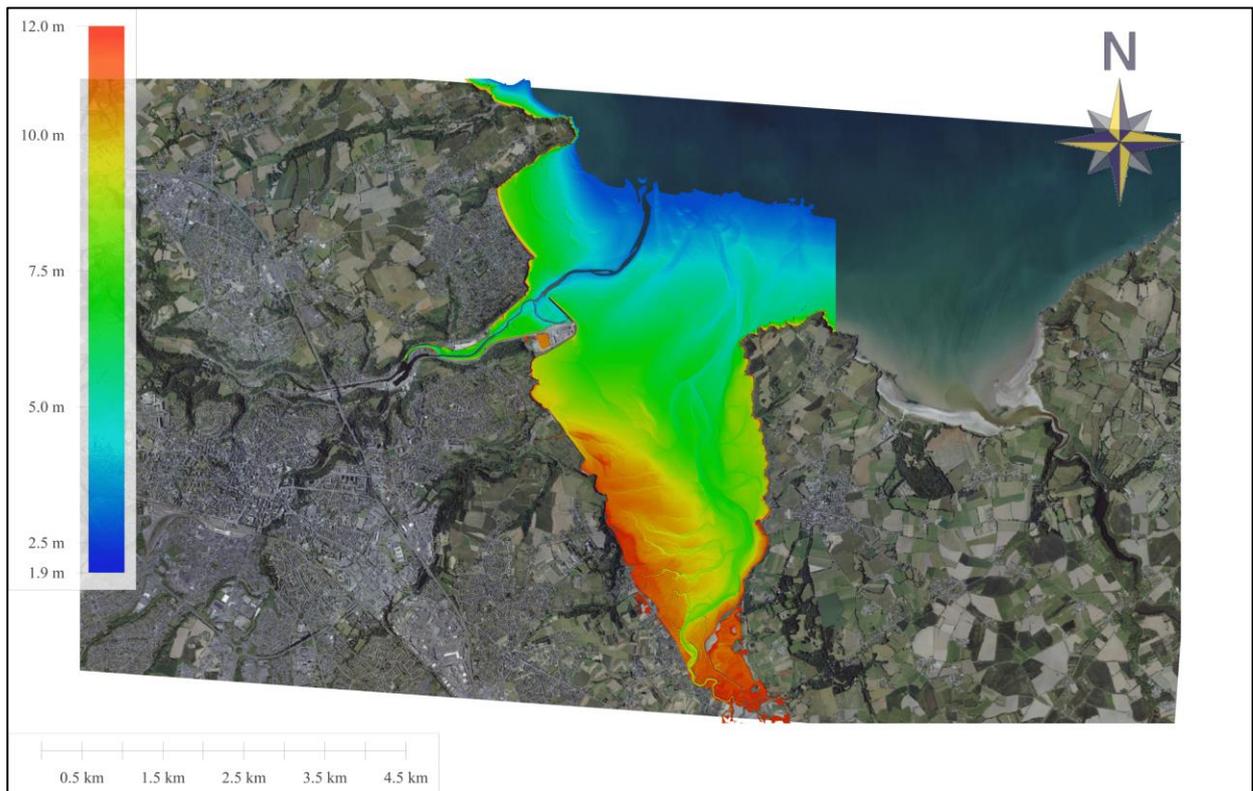


Figure 2-1 Levé LIDAR RGE ALTI d'août 2011 sur l'ensemble de l'Anse d'Yffiniac (référence verticale : zéro hydrographique au Légué).

2.1.1 FORÇAGES METEO-OCEANIQUES

2.1.1.1 La marée

La marée dans le secteur du Légué est de type semi-diurne (ondes dominantes M2, S2, N2, K2, MU2, M4, NU2, MS4, L2 et K1) et présente une asymétrie avec un flot plus court que le jusant. Le niveau moyen est 6.46 m au-dessus du zéro des cartes marines à la bouée du Légué (Figure 2-2). A cette station, la différence entre les niveaux de PHMA (Plus Haute Mer Astronomique) et de PBMA (Plus Basse Mer Astronomique) est de 12.59 m. Le marnage oscille en moyenne entre 5 m en morte-eau et 10 m en vive-eau.

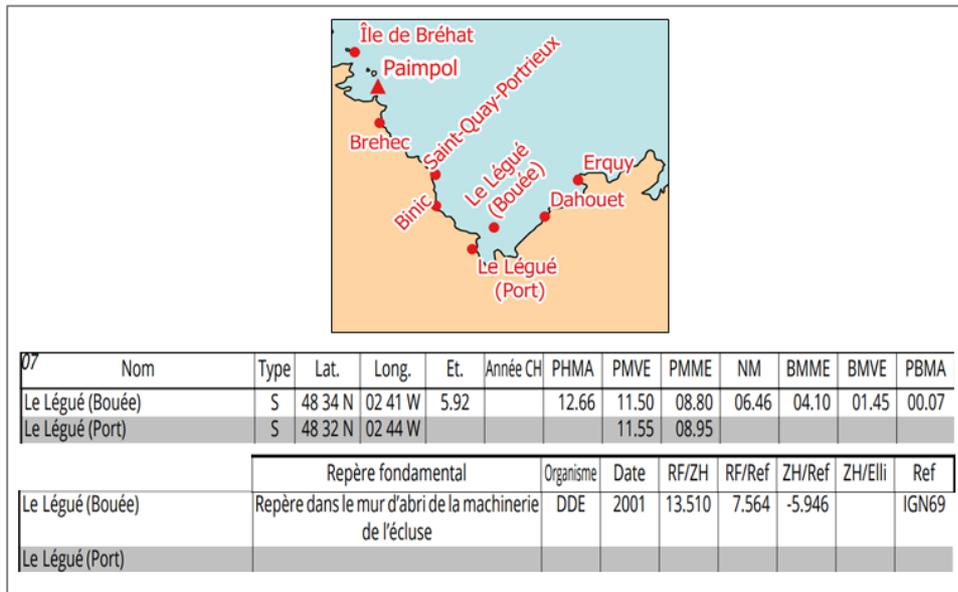


Figure 2-2 Références Altimétriques Maritimes du SHOM (2020) pour le site du Légué.

Compte tenu d'amplitudes de marée très importantes (y compris en morte-eau), la marée constitue le forçage principal de la circulation hydrodynamique. Pour un coefficient de marée de 95, les vitesses maximales devant le site du Légué sont de l'ordre de 1 m/s pour le flot et de 0.7 m/s pour le jusant. D'une manière générale, à coefficient de marée égal, les pics de vitesses intervenant à mi-marée sont plus importants au flot qu'au jusant. Les courants autour de la pointe Cesson sont influencés par le remplissage et le vidage du fond de l'anse d'Yffiniac.

2.1.1.2 Le vent

Les régimes dominants sont de secteur Sud-Ouest, avec néanmoins des occurrences significatives de vents de secteur Nord-Est (Figure 2-3) potentiellement soutenus (> 8m/s). Compte tenu d'un fetch relativement long selon cette orientation, et de l'orientation de l'ouverture du port, ces vents de NE sont les plus défavorables vis-à-vis de l'agitation (mers de vent) incidente dans l'avant-port.

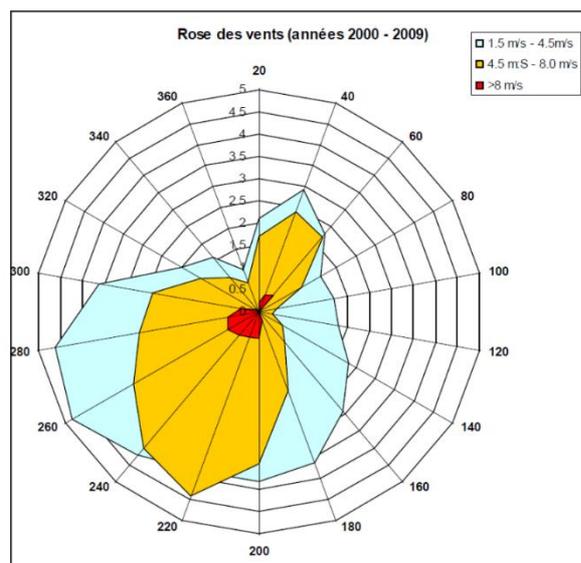


Figure 2-3 Roses des vents à Saint-Brieuc pour les années 2002 à 2009 (source : rapports Actimar de 2012 et Creocan de 2019).

2.1.1.3 Conditions de vagues

Les analyses des conditions de vagues présentées dans le rapport Actimar de 2012, basées sur l'exploitation de la réanalyse IOWAGA NORGAS de l'IFREMER sur la période 2002-2009, sont synthétisées sur la Figure 2-4. Les distributions de hauteurs significatives (Hs) moyennes et maximales à l'échelle annuelle sont illustrées, ainsi que des roses de Hs au large et devant le site du Légué. On peut tout d'abord souligner la forte atténuation de la houle, qui n'est que partiellement réfractée, entre l'entrée de la baie de Saint-Brieuc et le site du Légué.

Les roses de Hs mettent en évidence une prédominance des houles de Nord. Au point du large (48°34'N 2°42'W), la moyenne annuelle des Hs est environ de 0.4 m (max. 2 à 2.5 m). Au point localisé devant le site du Légué (48°32'N 2°42'W), la moyenne annuelle des Hs n'est plus que d'environ 0.25 m (max. 1 à 1.5 m). Les vagues de secteur Nord-Nord-Est ont une occurrence d'environ 10%. Les roses de Hs spécifiques aux mers de vent montrent qu'elles proviennent en majorité des secteurs Nord et Nord-Nord-Est

A partir de la même base de données (IOWAGA), les conditions de vagues extrêmes à considérer dans le cadre du projet de création d'un 4^{ème} quai ont été évaluées puis simulées par CREOCEAN en 2019. Pour une houle centennale d'orientation défavorable (Nord-Nord-Est) associée à un niveau de pleine mer de vive-eau, on peut souligner une très forte atténuation de la houle incidente en arrière du môle, sur la zone d'échouage de l'avant-port bien entendu, ainsi que sur le secteur de la plage du Valais au Sud de l'endiguement (terre-plein) (Figure 2-5).

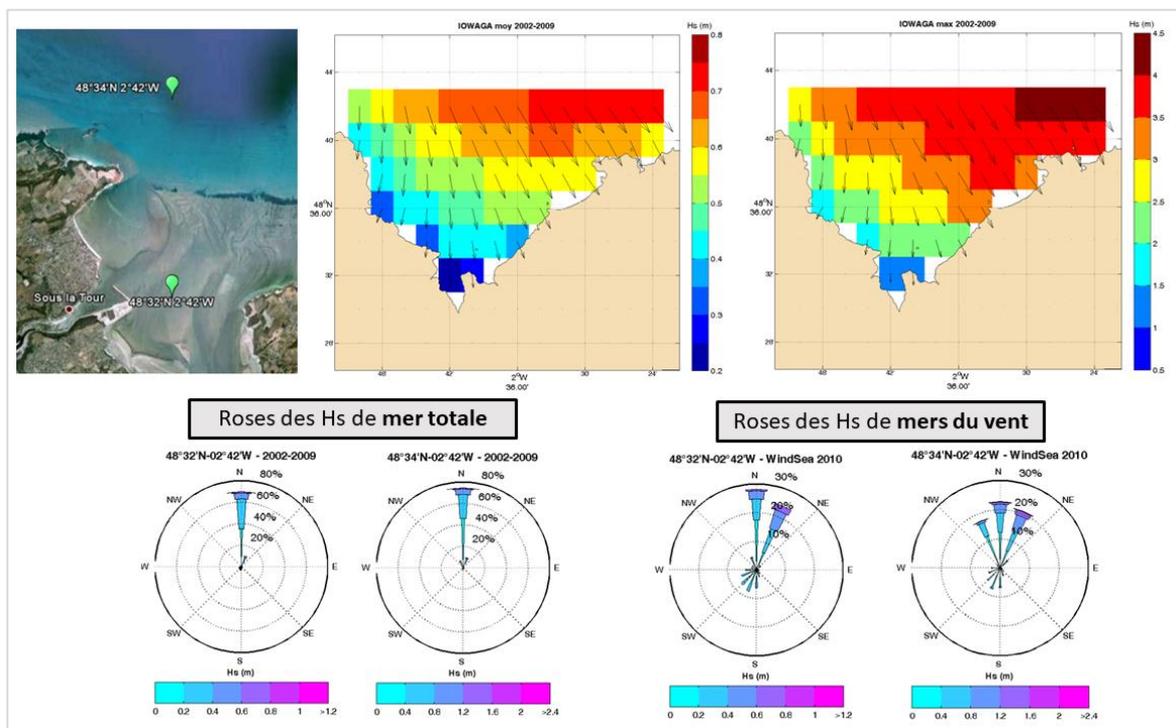


Figure 2-4 Exploitation de la base de données IOWAGA sur la période 2002-2009 sous forme de cartes de moyennes/maximums annuels de Hs, et de roses de Hs (mer totale ou mers du vent) au niveau de deux stations situées à proximité du site du Légué.

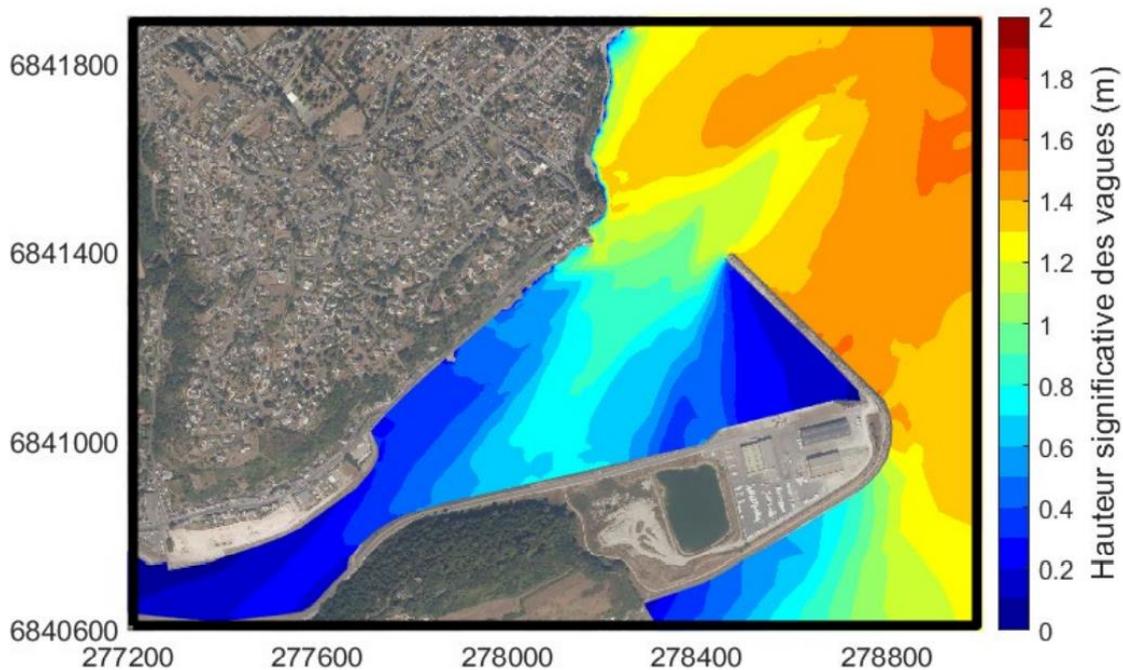


Figure 2-5 Conditions d'agitation simulées par CREOCEAN en 2019 pour une houle centennale de NNE associées à un niveau de pleine mer de vive-eau.

2.1.2 HYDROLOGIE ET NATURE DES FONDS

2.1.2.1 Débits et apports fluviaux

Les éléments relatifs aux apports fluviaux sont principalement issus des rapports Seamer (2006) et Actimar (2012). Le bassin portuaire est alimenté depuis l'amont par les eaux du Gouët et du Gouëdic, ce dernier se déversant à la jonction des deux bassins à flot. A noter que le débit du Gouët est contrôlé par le barrage de Saint-Barthélémy, et que le Gouëdic reçoit les eaux de la STEP de Saint-Brieuc. Les débits caractéristiques de ces deux cours d'eau mesurés à Ploufragan (en aval du barrage de Saint-Barthélémy situé environ 10 km en amont) sont présentés sur la Figure 2-6. On constate que le débit moyen est relativement faible (environ 3 m³/s), les valeurs décennales et centennales devenant significatives.

	Débit moyen m ³ /s	Débit décennal m ³ /s	Débit centennal m ³ /s
Gouët	2.3	42	105
Gouëdic	0.4	65	93
Total	2.7	≤ 107	≤ 198

Figure 2-6 Débits fluviaux du Gouët et du Gouëdic alimentant le port du Légué.

A noter que les cours d'eau du bassin versant drainent des quantités importantes de sels nutritifs, plus particulièrement de l'ammonium (teneurs élevées pour Le Légué), du phosphate, et de l'azote.

Concernant les apports sédimentaires ainsi que les niveaux de turbidités induits, peu de données existent concernant le Gouët et le Gouëdic. Un exercice de quantification des apports de sédiments fins a été réalisé à partir des évolutions morphologiques cartographiées à l'échelle du

port de plaisance et des bassins à flot. La méthodologie et les résultats sont présentés dans la section 3.

2.1.2.2 Turbidité

Les variations de turbidité sont principalement contrôlées par les courants de marée et les vagues à l'origine de la (re-)mise en suspension des sédiments fins, ainsi que par les crues fluviales qui apportent des éléments en suspension au milieu marin côtier.

Les cartes de concentrations de sédiments en suspension observées par satellite entre 2016 et 2020 (données mises à disposition par le projet MARC/Ifremer) indiquent des moyennes annuelles de quelques mg/l dans la baie de Saint-Brieuc, avec des moyennes saisonnières logiquement plus importantes en hiver qu'en été, compte tenu des variations dans les régimes de forçages (Figure 2-7).

Plus proches de la zone d'étude, des mesures en différents points de la baie ont été réalisées par le CNEXO-COB en 1981 autour de la pleine mer pour des conditions variées de marée (ME et VE) et d'hydrologie. Une carte de turbidité moyenne annuelle est proposée (Figure 2-8). Devant le site du Légué, une turbidité moyenne de 4 à 5 NTU est indiquée, soit entre 6 et 8 mg/l (d'après la relative suivante fournie dans le rapport CNEXO-COB de 1981 : $MES = 1.619 \times NTU - 0.436$).

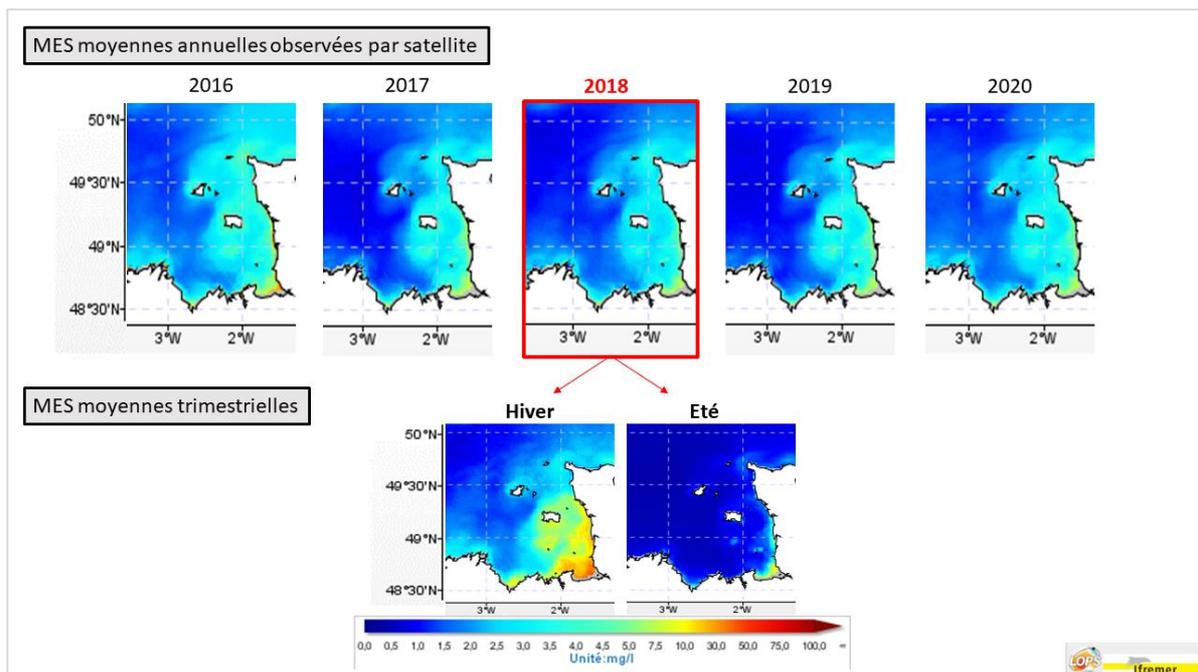
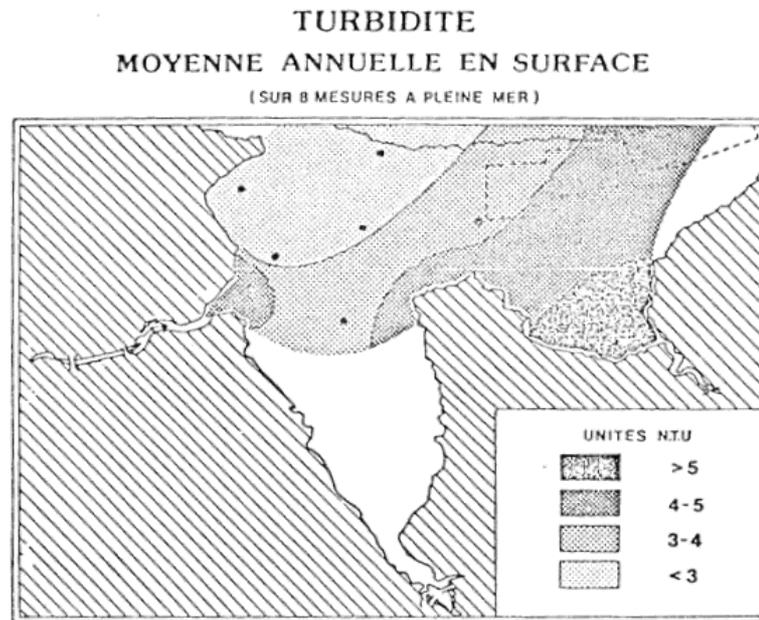


Figure 2-7 Concentrations de matières en suspension (MES en mg/l) moyennes (annuelles ou trimestrielles) mesurées par satellite entre 2016 et 2020 (source : MARC/IFREMER).



(Source C.N.E.X.O. 1981)

Figure 2-8 Carte de turbidité moyenne annuelle en surface à partir de mesures ponctuelles (CNEXO, 1981).

2.1.2.3 Nature des fonds

La nature des fonds a été cartographiée par le LCHF en 1977 (Figure 2-9), c'est-à-dire avant les aménagements réalisés à l'embouchure du Gouët (i.e. construction d'un terre-plein à la pointe Cesson, puis d'une digue de protection de l'avant-port ; cf. section 2.2.1).

Les sédiments dominants dans l'anse d'Yffiniac sont des sables fins ne contenant pas de fractions notables de vases, avec une granulométrie moyenne comprise entre 110 et 150 µm. Ces sables présentent une taille décroissante du Nord au Sud de l'anse et une fraction calcaire variable. A l'embouchure du Gouët, le compartiment sédimentaire de quelques mètres d'épaisseur (source DDE, 1978) est essentiellement constitué de sable très fin (autour de 125 µm). Au fond de l'anse d'Yffiniac, le sédiment correspond à un silt vaseux avec de nombreux schorres végétalisés (Figure 2-9 ; Figure 2-10). Les évolutions historiques et récentes de la couverture sédimentaire sur le site du Légué sont plus largement abordés dans la suite du rapport.

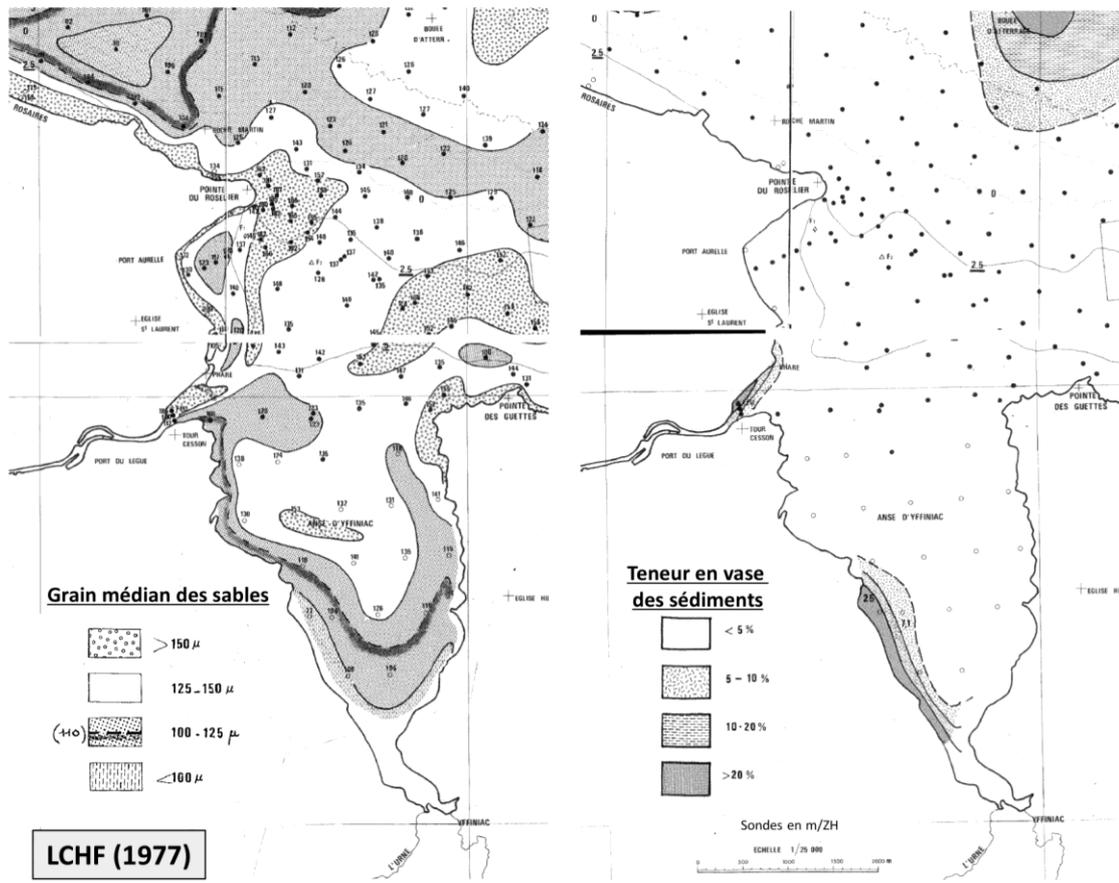


Figure 2-9 Cartes de granulométrie médiane et de teneur en vase du sédiment superficiel (source : LCHF, 1977)

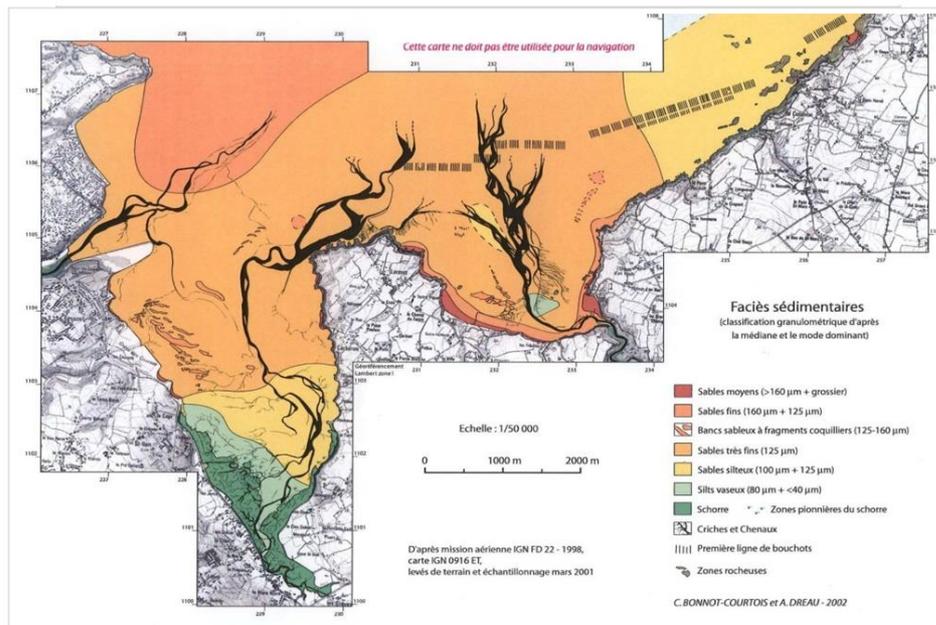


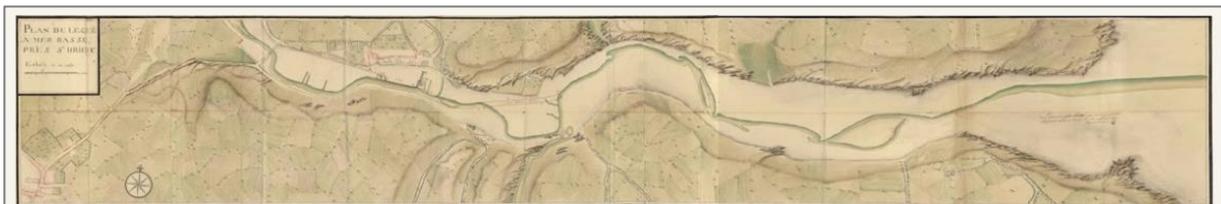
Figure 2-10 Carte des faciès sédimentaires du fond de baie de Saint-Brieuc (Bonnot-Courtois et Dreau, 2002).

2.2 EVOLUTIONS HISTORIQUES A MOYEN/LONG TERME (PLURI-DECENNALE A PLURI-CENTENNALE)

2.2.1 RAPPEL DE L'HISTORIQUE DES AMENAGEMENTS

De son embouchure jusqu'à environ 2 km en amont, l'estuaire du Gouët a fait l'objet de nombreux aménagements depuis le 18^{ème} siècle, qui ont conduit à des évolutions substantielles de son fonctionnement hydro-sédimentaire.

Le premier projet d'aménagement est proposé en 1758 avec la construction du quai de l'Aiguillon (160 m de long) le long de la rive gauche. Ce quai, construit en 1759, visait en partie à contraindre le cours sinueux du Gouët (cf. plan de 1770 ; Figure 2-11). Par la suite, les quais ont progressivement été étendus (1 km en 1794 ; source : synthèse DHI, 2015) .



Plan dressé par Mr Chocat de Grandmaison en 1756 (dimensions: 2 m 58 / 0 m 54)²

Le plan représente la totalité de l'estuaire du Gouët, des faubourgs de St-Brieuc à la pointe à l'Aigle

Plan de 1770 - État du havre du Légué après la construction du Quai d'Aiguillon

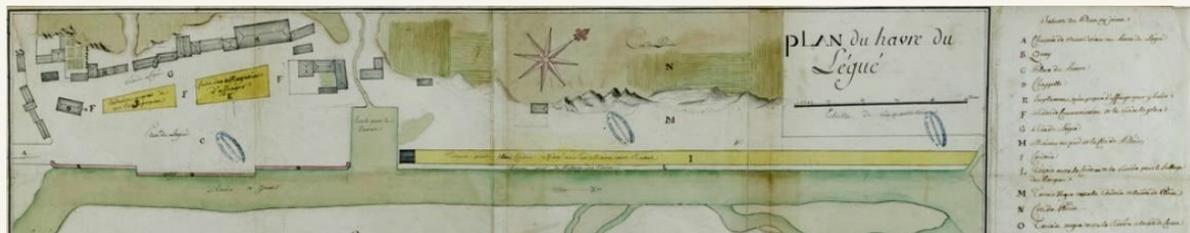


Figure 2-11 Exemples de cartes anciennes montrant les premiers aménagements de l'estuaire du Légué (e.g. quai de l'aiguillon en 1770).

En 1847, la création d'un bassin latéral communiquant à la mer par un chenal est proposée, ainsi qu'un bassin à flot remplaçant le port d'échouage. Il faut attendre la fin du 19^{ème} siècle pour que les travaux d'aménagement s'accélèrent et que le Légué devienne un port à bassin. Un premier bassin à flot et une écluse sont construits à partir de 1868 (achevé en 1885), puis un second bassin à flot en 1915 (Figure 2-12). Ces aménagements ont largement contribué au développement du port et à la diversification de ses activités (pêche, commerce, industrie).

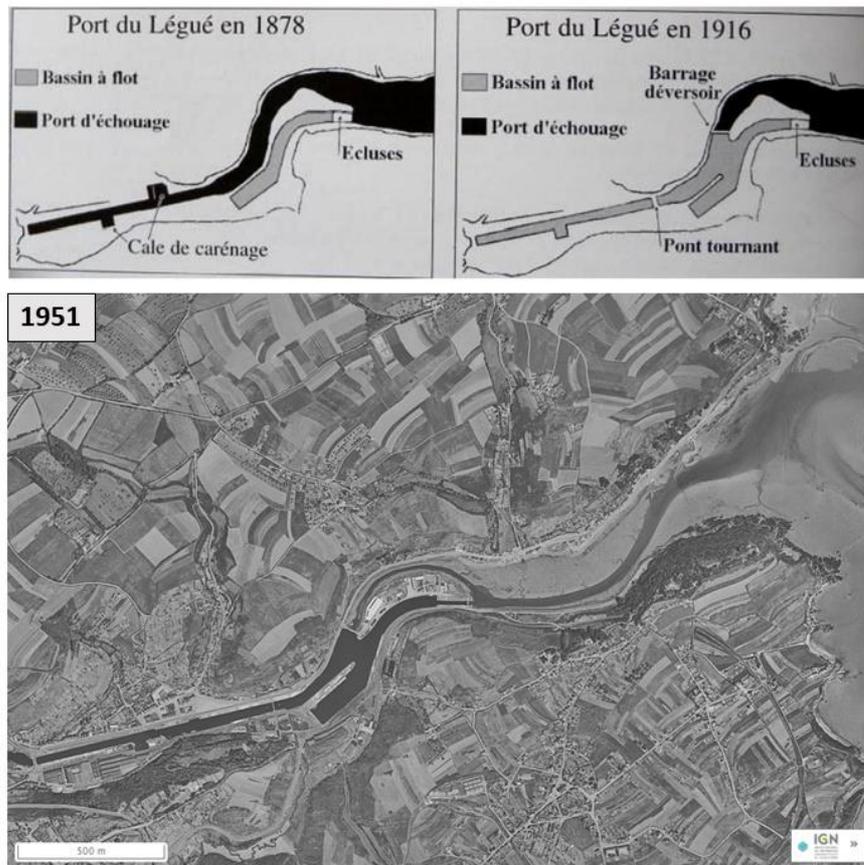


Figure 2-12 Plans du port du Légué en 1878 et 1916 (source : DHI, 2015) et image aérienne du site en 1951 (source : IGN).

A noter qu'en amont de notre site d'étude, le barrage de Saint-Barthélémy a été construit sur le Gouët entre 1975 et 1978 sur l'ancienne retenue d'eau qui avait été établie en 1920 (production d'électricité ; à environ 10 km en amont de l'embouchure). Le barrage mesure 45 mètres de haut et 200 mètres de longueur de crête. Il retient un volume de 7 millions de m³ d'eau sur une étendue de 81 hectares, qui forme ainsi la retenue de La Méaugon.

Dans sa configuration à la fin des années 70 (Figure 2-13), le port du Légué comprend un avant-port ou port d'échouage où les bateaux de commerce peuvent accoster à haute mer suite à la création du terre-plein de la Ville-Gilette en 1975 (33 000 m²). Le bassin n°1 dispose de 605 m de linéaire de quais avec une cote nominale des fonds à +5.50 m CM. Le bassin n°2 fait environ 1 km de long pour 30 m de largeur avec une cote nominale variable comprise entre +6.5 et +7.5 m CM. Les bassins sont reliés à l'avant-port par une écluse à sas permettant l'admission de navires de 80 m de long, 12.5 m de large et de 4.8 m de tirant d'eau. Le barrage déversoir destiné à régulariser le niveau des bassins à flot, se situe à la cote +11.4 m CM. Le barrage-déversoir permet donc d'évacuer les débits excédentaires dus aux crues éventuelles de deux cours d'eau alimentant les bassins.

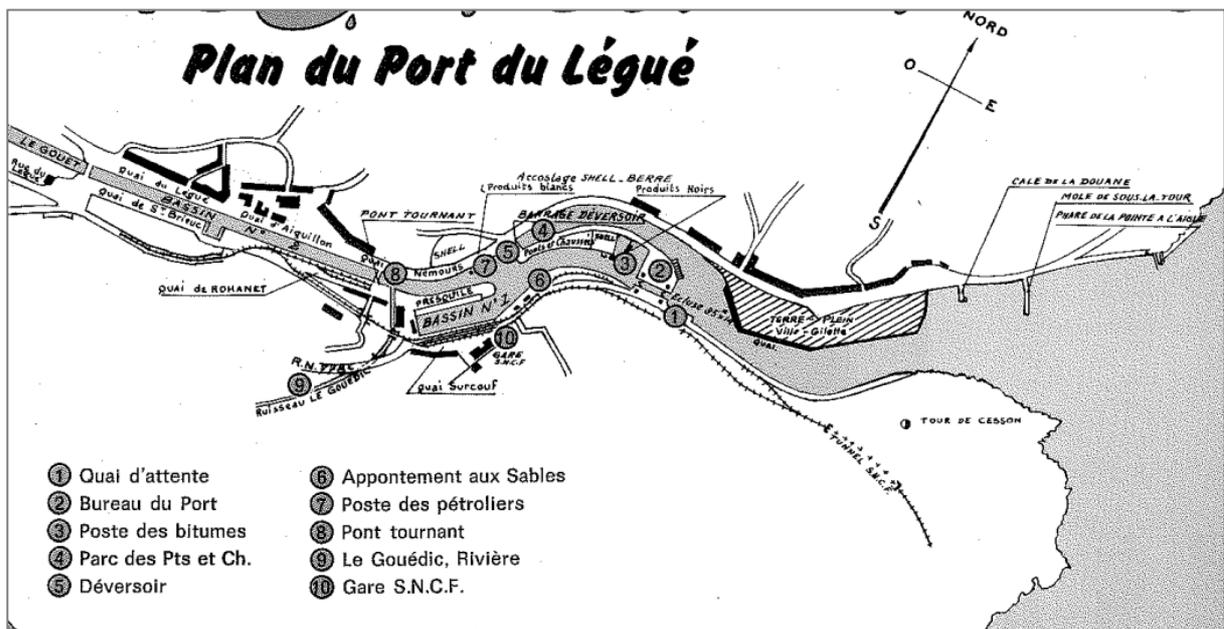


Figure 2-13 Plan du port du Légué à la fin des années 70 (source : CCI)

L'évolution des flottes de cabotage vers un accroissement du tonnage des navires, ainsi que l'envasement régulier des fonds, ont motivé les projets de modernisation du port du Légué afin d'assurer la pérennité de ses activités (LCHF, 1977).

En 1983, le projet de modernisation du port comporte un dévasage des bassins et de l'avant-port du Légué ainsi que la création d'un endiguement dans le prolongement de la pointe Cesson, destiné à recevoir les produits des dragages et à permettre la réalisation d'un terre-plein industrialo-portuaire. On peut noter que le projet était initialement plus ambitieux car l'endiguement devait s'étendre sur 27 hectares, contre 13 ha en pratique (Figure 2-14). Les travaux d'aménagement sont principalement réalisés en 1984 et 1985 (enclôture refermée en août 1985). Le remblaiement de l'endiguement a été réalisé avec les sédiments dragués dans les bassins ainsi qu'avec du sable (environ 200 000 m³) prélevé directement à l'embouchure devant la pointe Cesson.

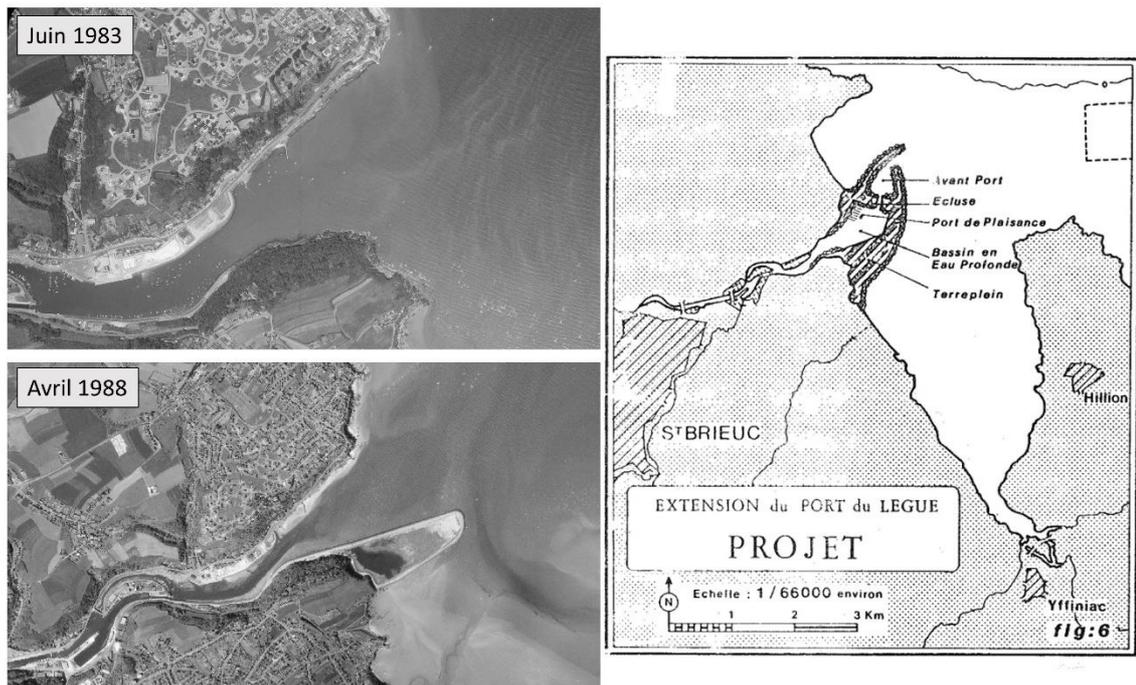


Figure 2-14 Images aériennes de l'embouchure du Gouët avant et après la construction de l'endiguement à la pointe Cesson, et schéma du projet d'aménagement tel qu'il avait été envisagé initialement (rapport CNEEXO-COB, 1981).

Enfin, un môle de 450 m de longueur a été construit entre septembre 1999 et juin 2001 afin de protéger un poste à quai le long de la face nord de l'endiguement contre l'effet de la houle et des courants (Figure 2-15). Les quais ont été construits en 2001 (quais n°1 et 2) et en 2007 (quai central n°3).



Figure 2-15 Construction du môle entre septembre 1999 et juin 2021 (fond de plan : image aérienne IGN de 2015).

L'analyse de ces séquences d'évolutions, et donc des effets des aménagements, est complexe puisqu'à des échelles de temps comparables, les phénomènes suivants peuvent moduler la dynamique du site :

- Tendances évolutives générales du fond de la baie de Saint-Brieuc
- Evolutions à long terme des apports fluviaux et des conditions de turbidité des eaux côtières en lien avec d'importantes déforestations, à partir de 1400 AD, et d'une augmentation des précipitations automnales et hivernales (Poirier et al., 2016). Ces conditions de turbidité ont pu considérablement augmenter jusqu'au 18^{ème} siècle, et les dépôts vaseux (drapages par-dessus des fonds sableux) qui sont des processus relativement lents et progressifs viennent en suivant.

2.2.2 TENDANCES D'ÉVOLUTIONS GÉNÉRALES DU FOND DE LA BAIE DE SAINT-BRIEUC

Les tendances d'évolutions morphologiques à long terme ont été analysées à partir des données du SHOM (lots bathymétriques de 1867, 1927 et 2001), du LCHF (1977) et du levé LIDAR RGE Alti de 2011 (Figure 2-16). Ces analyses se basent sur des différentiels bathymétriques ainsi que sur la comparaison des données le long d'un profil de recoupement des différents levés.

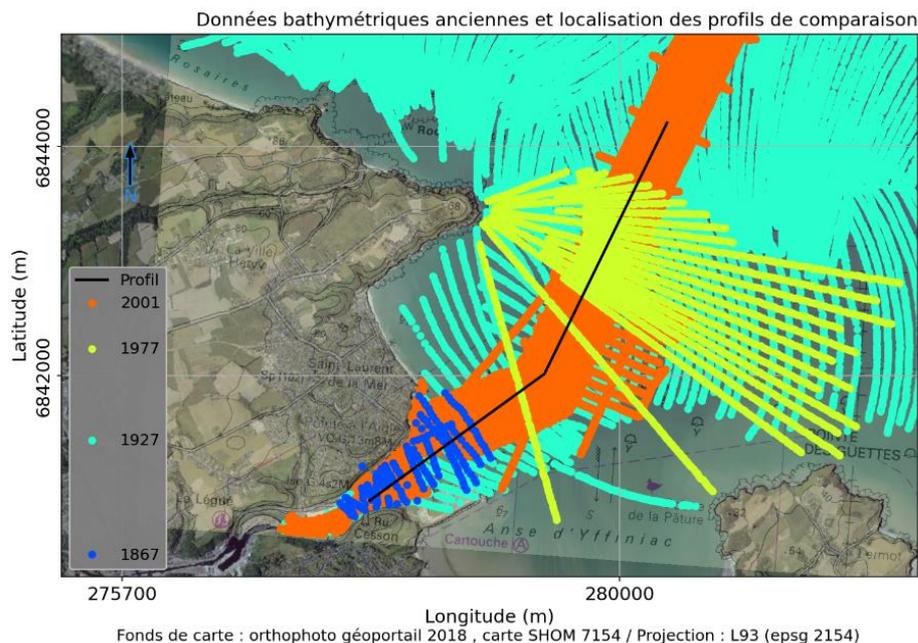


Figure 2-16 Données bathymétriques anciennes (lots SHOM de 1867, 1927 et 2001, et sondes du LCHF de 1977), et localisation du profil de comparaison.

Les données du SHOM de 1927 fournissent une information riche sur la bathymétrie avant les phases d'aménagement de la pointe Cesson (i.e. avant la construction du terre-plein du môle). De la pointe du Roselier (qui marque l'entrée de l'Anse d'Yffiniac côté Nord-Ouest) jusqu'à l'embouchure du Gouët, les fonds passent progressivement de +2 m CM devant la pointe du Roselier jusqu'à +5 m CM (pente de 0.15%) à l'embouchure du Gouët, où l'on peut observer des variations du fond plus marquées (Figure 2-17 et Figure 2-18).

Ces données ont été utilisées pour évaluer la tendance à long terme autour de la zone d'étude. D'après le différentiel bathymétrique entre 1927 et 2011, le dépôt serait en moyenne de +0.05 m à l'échelle de la zone délimitée en noir (Figure 2-19) depuis près de 100 ans, ce qui est faible compte tenu des marges d'erreur des levés bathymétriques ou LIDAR. En effet, un certain nombre d'incertitudes liées aux acquisitions de données peuvent être rappelées :

- concernant les sondages à main (ou plomb de sonde), les suivis historiques du SHOM, ponctuels et généralement espacés d'une centaine de mètres, ont eu tendance à privilégier les points hauts vis-à-vis des risques de navigation, ce qui a tendance à introduire un biais dans l'appréciation des évolutions bathymétriques. On peut également mentionner l'erreur potentielle sur la correction de marée (ou réduction de sonde). Au cours des levés anciens, on définissait le niveau d'eau dans la zone de levé en se basant sur la marée mesurée dans des ports proches du levé. Ces méthodes simplifiées conduisent parfois à des écarts importants lors de la réduction des sondes, avec des erreurs (en vertical) dépassant fréquemment 0.5 m et pouvant atteindre 1 m (SHOM, 2004). Pour l'ensemble de ces raisons, les marges d'erreurs verticales associées aux levés anciens du SHOM seraient comprises entre 0.1 et 1.5 m.
- les données LIDAR peuvent également présenter des décalages systématiques à partir de certaines profondeurs. Néanmoins, ces décalages verticaux n'excèdent généralement pas 0.2 m.

En cumulant les incertitudes respectives de chaque levé, la tendance au dépôt à partir du différentiel sur la période 1927-2011 n'apparaît donc pas significative. Tel qu'évoqué dans le rapport du LCHF de 1977, on peut néanmoins souligner que certaines zones de sédimentation préférentielle entre 1927 et 1977 pourraient être liées à l'implantation de bouchots à partir de 1965 entre la pointe du Roselier et celle des Guettes (sans que des données ne permettent une quantification du phénomène). En effet, ces derniers favorisent le piégeage des sédiments fins du fait de :

- la réduction locale de l'intensité des courants et de l'agitation ;
- du relargage de fèces par les organismes filtreurs, qui influencent la taille des floccs (vitesse de chute plus importante) et favorisent ainsi le dépôt.

D'autre part, si aucune tendance générale ne se dégage depuis 1927 (du moins pas au-delà des marges d'erreur des différentiels bathymétriques qui sont cartographiés), les fonds devant la zone d'étude ont en revanche localement significativement évolué et on observe une alternance de zones en érosion et en accrétion à des échelles qui sont celles d'un système de bancs sableux et de chenaux.

Les analyses réalisées à partir d'autres différentiels bathymétriques (e.g. 1927-1977 ou 1927-2001) aboutissent à la même conclusion. Ces différentiels ainsi que des comparaisons sur l'évolution de la position de certaines isobathes au cours du temps sont présentés dans en Annexes (section 8.1).

Sur la Figure 2-18, une accrétion de l'ordre du mètre est mise en évidence entre 1867 et 1927 à l'embouchure du Gouët. Néanmoins, le décalage systématique entre les deux levés semble indiquer que cet écart correspond à un biais (cf. éléments relatifs aux marges d'erreur évoqués précédemment).

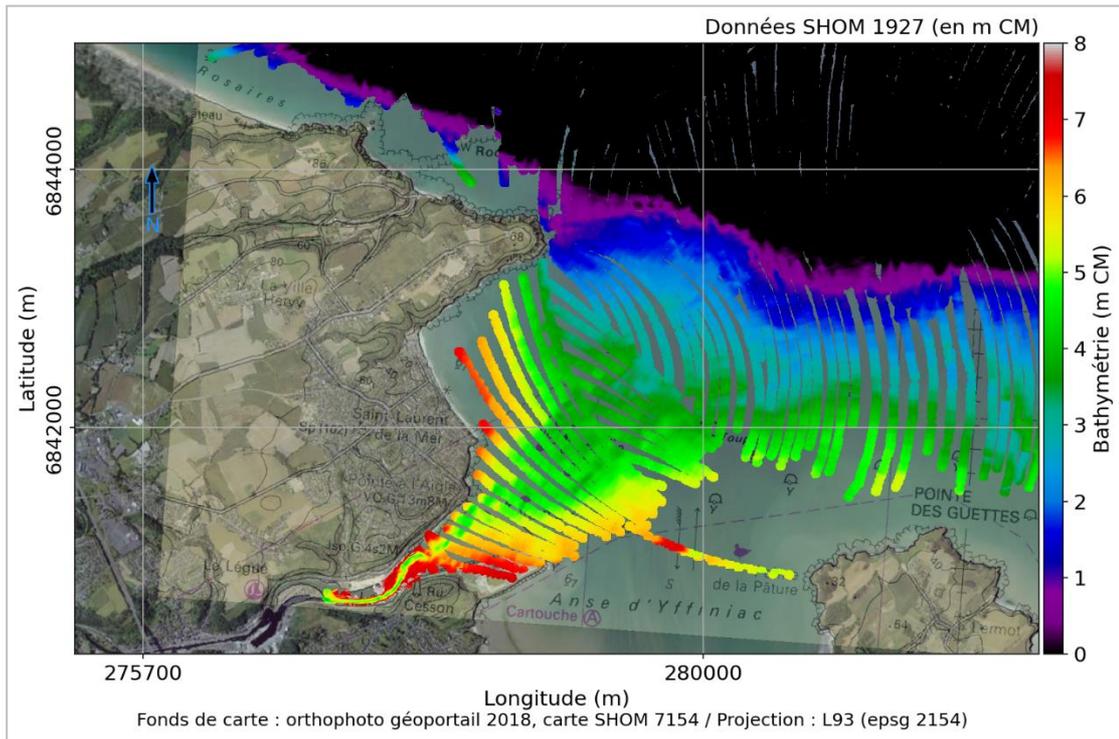


Figure 2-17 Données bathymétriques du SHOM de 1927.

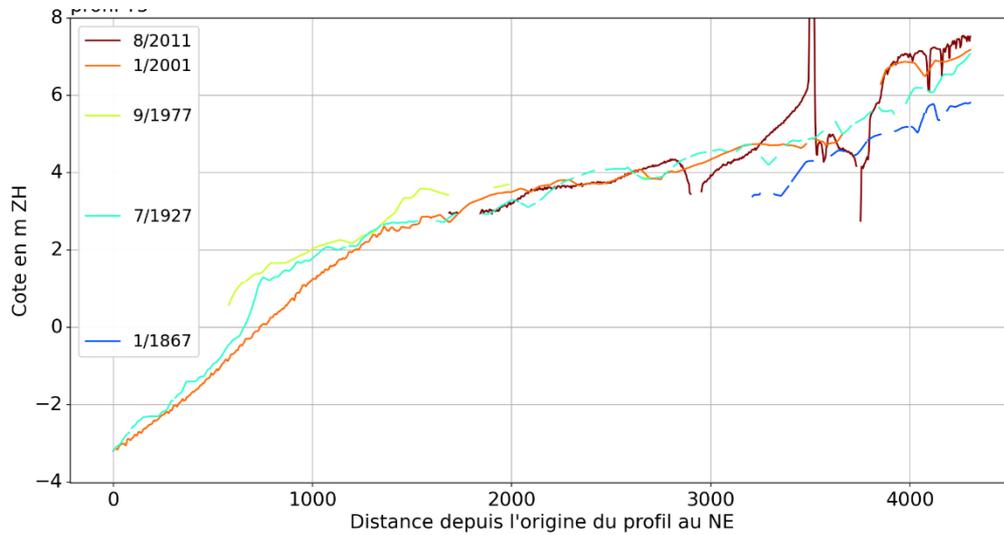


Figure 2-18 Comparaisons des évolutions de 1867 à 2011 le long du profil illustré sur la Figure 2-16.

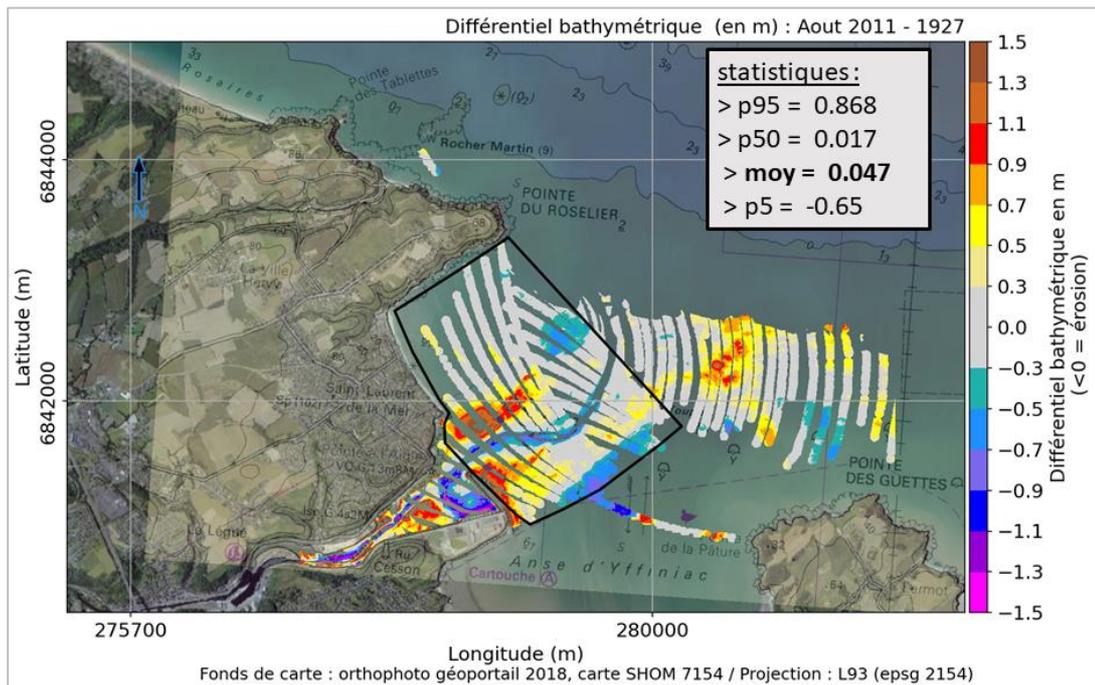


Figure 2-19 Différentiel bathymétrique entre 2011 (données RGE ALTI) et 1927 (lot SHOM). Le contour noir correspond à la zone considérée pour évaluer la tendance générale d'évolution (cf. encadré statistiques).

Au Sud du site du Légué, le développement du schorre végétalisé en fond de l'anse d'Yffiniac est significatif sur une échelle de temps d'un siècle, à l'image des évolutions illustrées entre 1926 et aujourd'hui (Figure 2-20). Il peut être lié à un changement de nature de sédiment superficiel et/ou à un comblement de l'anse. La sédimentation fine est manifeste et compte tenu des épaisseurs de vase visible dans certains chenaux au travers du schorre, on peut penser que le fond de l'anse se comble à mesure qu'elle s'envase. L'envasement est a priori en lien avec une turbidité des eaux côtières qui est devenue conséquente il y a quelques siècles. On peut penser que le comblement, par envasement et développement conjoint d'une végétation halophile (qui elle-même favorise la sédimentation fine en atténuant les conditions hydrodynamiques sur l'estran), va se poursuivre et qu'à terme va couvrir toute la largeur de l'anse d'Yffiniac, pour n'être entrecoupée que localement par les chenaux d'estran (dont celui qui résulte de l'écoulement de l'Urne tout au fond de l'anse). Le différentiel bathymétrique entre les données LIDAR de 2020 (données UBS) et 2011 (RGEALti) semble confirmer qu'une tendance à la sédimentation intervient au niveau du schorre végétalisé (Figure 2-21). Un suivi sur de plus longues échelles de temps serait cependant nécessaire afin de mettre en évidence des tendances plus marquées et ainsi s'écarter des marges d'erreur inhérentes aux techniques d'acquisition.

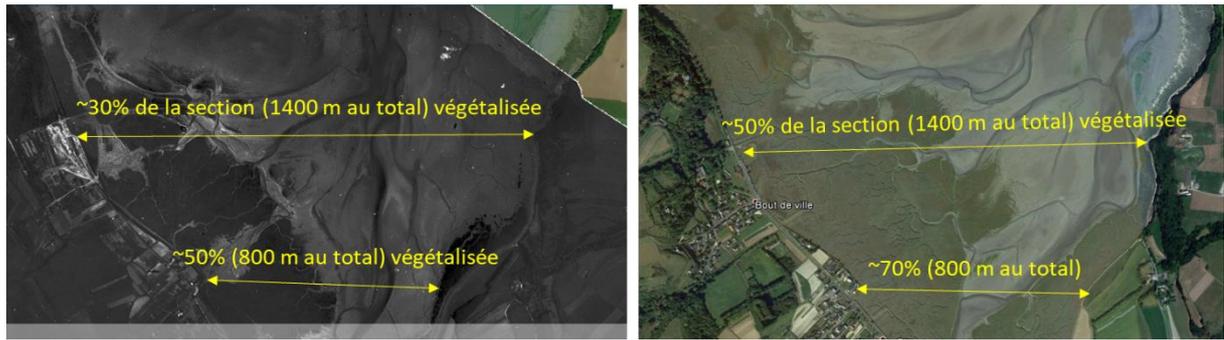


Figure 2-20 : Comparaison d'une photographie aérienne ancienne (1926, Ifremer) et d'une image satellite actuelle (source : CREOCEAN, 2019).

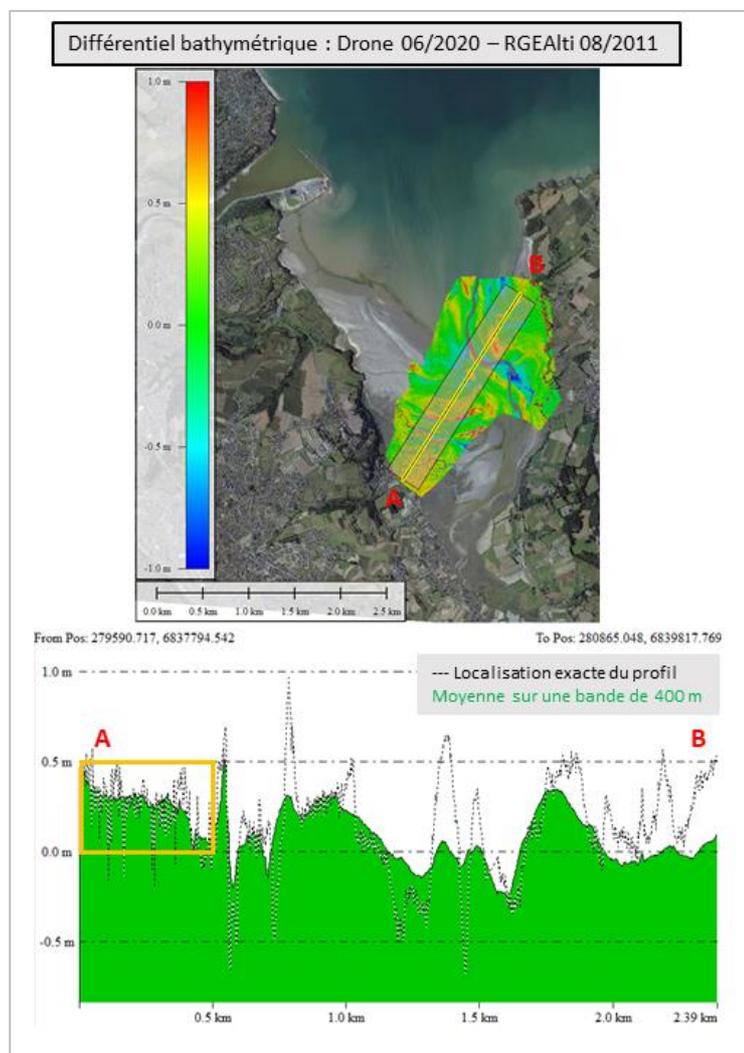


Figure 2-21 Différentiel bathymétrique entre juin 2020 (données LIDAR UBS) et août 2011 (RGE ALTI) dans l'anse d'Yffiniac. Les évolutions sont détaillées le long d'un profil orienté SSO-NNE.

2.2.3 TENDANCES D'ÉVOLUTIONS DANS L'ESTUAIRE

Dans l'estuaire, les différents aménagements réalisés au 19^{ème} et 20^{ème} siècles ont eu des effets potentiellement importants sur les conditions hydrodynamiques et hydro-sédimentaires :

- Bassins à flot fin 19^{ème} /début 20^{ème} siècle : réduction du volume oscillant de marée et donc des courants de remplissage et de vidage de l'estuaire.
- La construction du terre-plein de la pointe de Cesson au milieu des années 80, dont les effets sur les conditions de site sont difficiles à appréhender puisque cela revient à allonger l'estuaire avec une forme en entonnoir susceptible d'amplifier l'onde de marée. Un potentiel effet d'ombrage par rapport aux forçages hydrodynamiques est aussi susceptible d'intervenir dans les zones situées au site de l'endiguement (e.g. secteur de la pointe du Valais).
- Digue à l'embouchure vers 2000 : réduction des conditions d'agitation ; chenalisation contrainte vers la rive gauche et approfondissement à l'embouchure pour conserver la section mouillée ; réduction des courants en rive droite de ce qui constitue désormais la section aval de l'estuaire.

Depuis la création des bassins à flot, un comblement progressif de l'estuaire est observé. En amont, les bassins constituent une zone de décantation des vases. Les dépôts sédimentaires sont estimés à 5000 m³/an sur cette zone (LCHF, 1977). Dans le rapport PB Environnement de 1983, il est notamment mentionné d'importants problèmes d'envasement, avec des épaisseurs de vase sur le fond de l'ordre d'un mètre dans les bassins, et atteignant jusqu'à 2-3 m à la confluence du Gouët et du Gouëdic. A notre connaissance, les premières données de nature des fonds disponibles sur le secteur amont sont postérieures à la construction des bassins et datent de 1977 (LCHF). Ces données indiquent une teneur en vase comprise entre 5 et 20% en arrière de l'écluse et augmentant rapidement vers l'amont (>60% ; Figure 2-22). D'après cette étude, la proportion de vases marines est dominante jusqu'en amont de l'écluse (50-75% dans la première moitié du bassin n°1), et reste non négligeable dans le bassin n°2 (10-25%) (Figure 2-23). Les analyses granulométriques réalisées par PB Environnement en 1983, les Ponts et Chaussées en 1985, ou la CCI en 2001 et 2019 confirment que le sédiment est resté essentiellement vaseux jusqu'à aujourd'hui (voire se serait davantage envasé), avec des teneurs en fines comprises entre 65 et 85% sur la majeure partie du secteur en amont de l'écluse. Les données de 1983 à 2001 sont présentées en Annexes (section 8.2) et les analyses récentes de juillet 2019 sont illustrées sur la Figure 2-24.

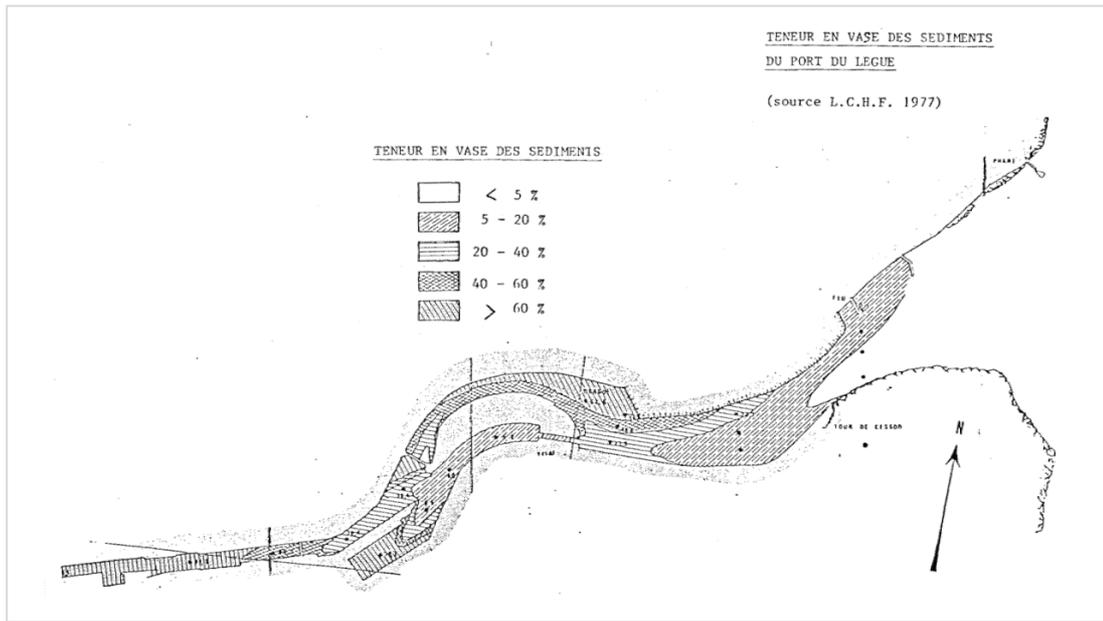


Figure 2-22 Teneur en vase des sédiments de fond sur la zone du fond de l'avant-port, du port de plaisance, des bassins à flot, et du déversoir (source : rapport LCHF, 1977).

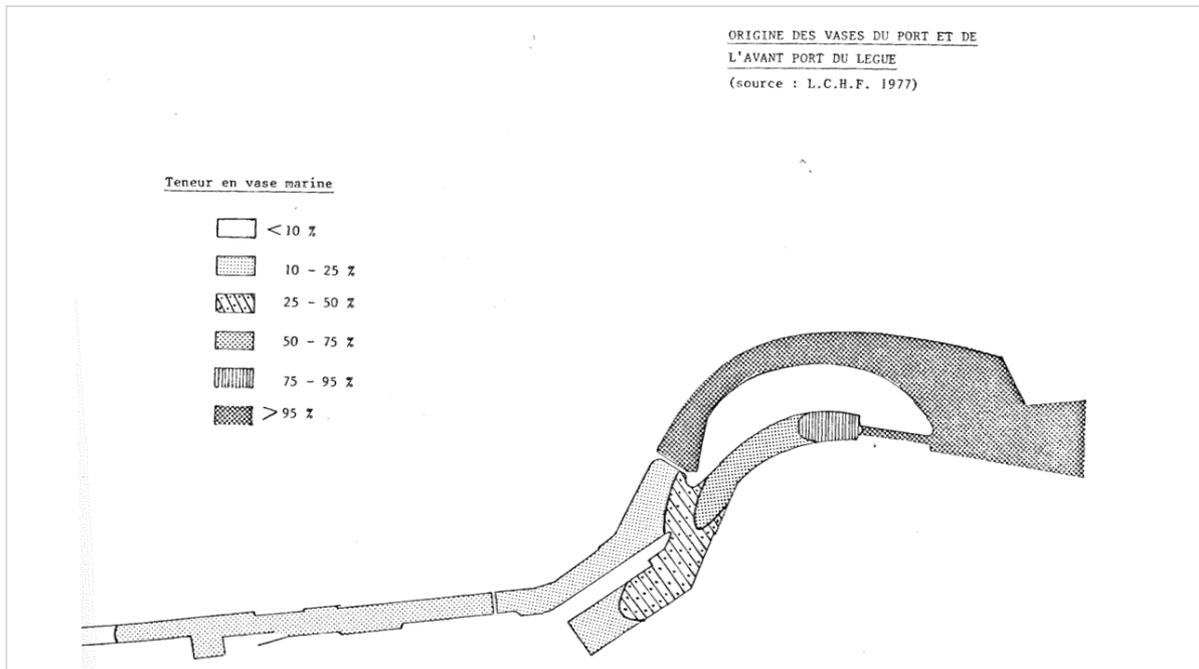


Figure 2-23 Proportion de vase marine dans le sédiment de fond sur la zone du port de plaisance, des bassins à flot, et du déversoir (source : rapport LCHF, 1977).

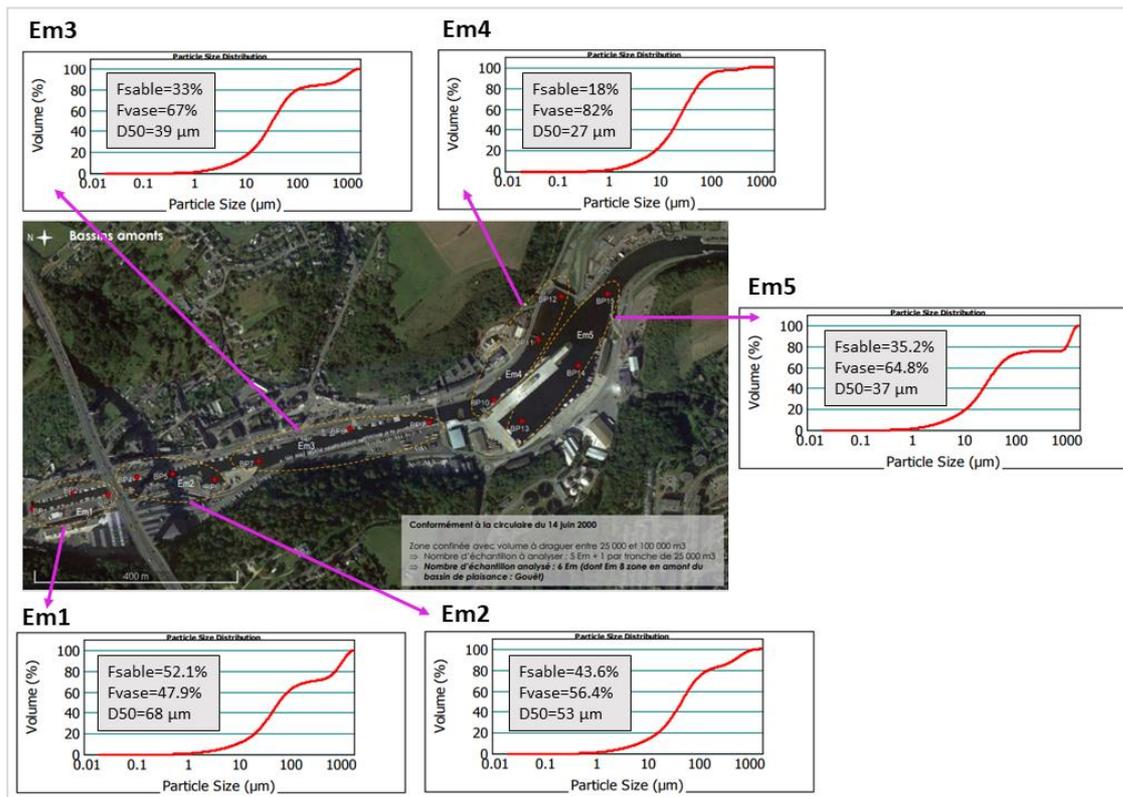


Figure 2-24 Analyses granulométriques réalisées par le laboratoire Eurofins en juillet 2019 sur la zone amont incluant le port de plaisance, les bassins à flot, et le déversoir.

Une tendance au comblement par des sédiments majoritairement vaseux est également observée en aval de l'écluse. Des problèmes d'envasement le long de l'apportement de Ville-Gillette sont mentionnés en 1983 (source : PB Environnement), soit moins de 10 ans après sa construction. Des photographies anciennes montrent des fonds, notamment en partie haute des estrans, largement couverts de matériaux grossiers (cailloutis, galets). L'évolution est particulièrement marquée en amont, avec un site qui a été largement comblé par des banquettes de vase (Figure 2-25). Plus en aval, des images à différentes époques montrent un changement progressif de nature des sédiments superficiels, de part et d'autre de l'estuaire (Figure 2-26).

Les analyses de sédiment réalisées entre 1977 et 1985 témoignent d'un sédiment relativement vaseux sur la partie amont de l'avant-port, avec des teneurs en vase autour de 40% (cf. section 8.2 en Annexes). A l'embouchure du Gouët, les carottes sédimentaires réalisés par la DDE des Côtes-d'Armor en 1978 indiquent que le compartiment sédimentaire était caractérisé par une couche de 6 à 7 m de sable fin (carottes 1, 2 et 3 ; Figure 2-27), avec une légère fraction vaseuse pour la station la plus en amont (carotte 1).

Les analyses granulométriques récentes de juillet 2019 montrent que :

- la teneur en vase sur le secteur amont de l'avant-port est en moyenne de 79% (moyenne sur 3 échantillons), soit deux fois plus que dans les années 80. Bien que d'autres mesures seraient nécessaires pour confirmer cette tendance, elle semble cohérente avec à la dynamique d'envasement observée au cours du 20^{ème} siècle.
- Le sédiment est significativement plus vaseux à l'embouchure du Gouët, avec des teneurs en vase en moyenne de 40% contre 5% avant les phases d'aménagement à la pointe de

Cesson. Cet envasement est la conséquence directe de la construction du môle en 2000. Ces évolutions sont plus largement décrites dans la section 2.3.3.

Les nombreuses données et études sédimentaires ne permettent cependant pas de distinguer clairement les apports vaseux amont des apports maritimes (interprétations contradictoires sur l'origine des vases dans les rapports LCHF (1977) et CNEXO-COB (1981)). Le LCHF mentionne une proportion de vase apportée par le Gouët et le Gouëdic négligeable en aval de l'écluse avec une majorité de vases marines (> 95% ; Figure 2-23). Au contraire, le CNEXO suggère une part non négligeable de fines d'origine fluviale jusqu'à l'embouchure de l'estuaire (Figure 2-29). La modélisation mise en place par la suite permettra d'apporter des éléments de réponse sur ce point.

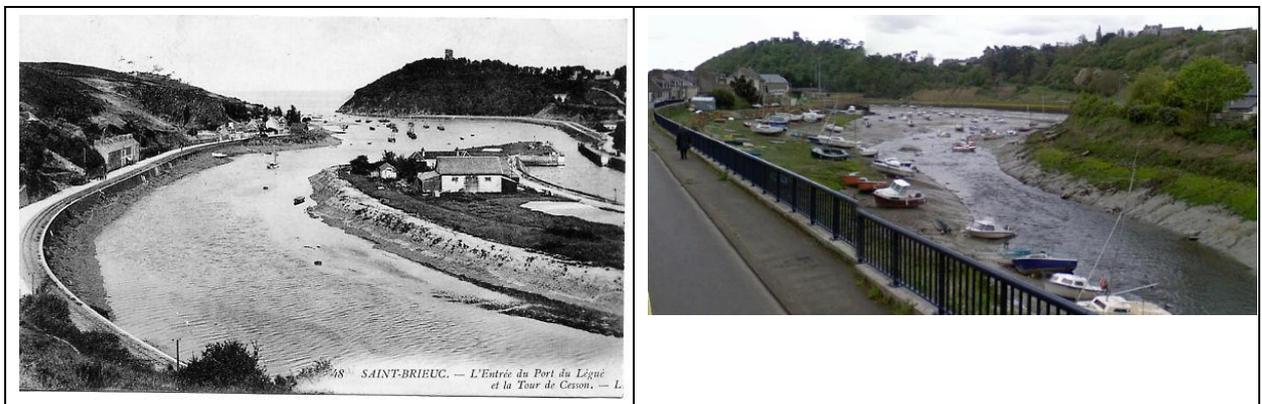


Figure 2-25 Visualisation du colmatage du bras amont (avec un estran initialement couvert de sédiments grossiers) par des sédiments fins (vase).

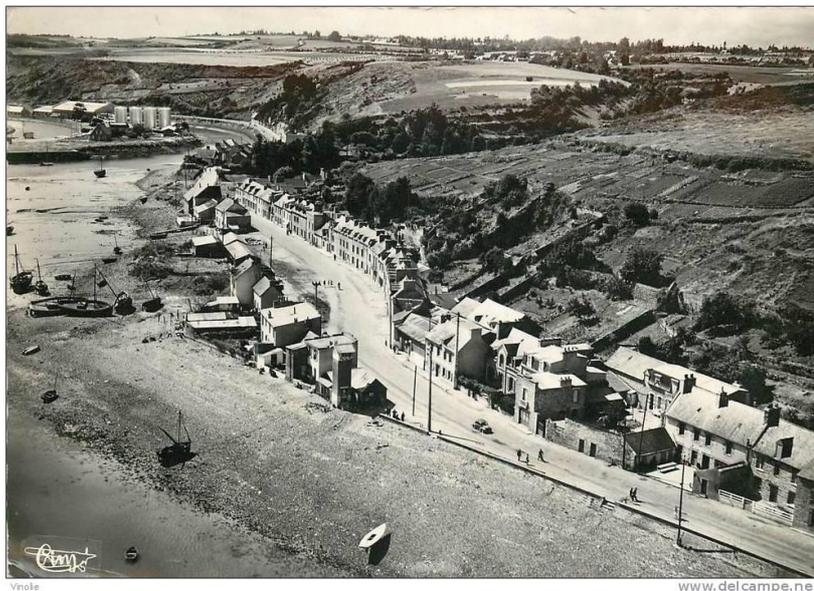


Figure 2-26 Visualisation d'un estran initialement couvert de sédiments grossiers (cailloutis...), secteur « Sous-La-Tour ».

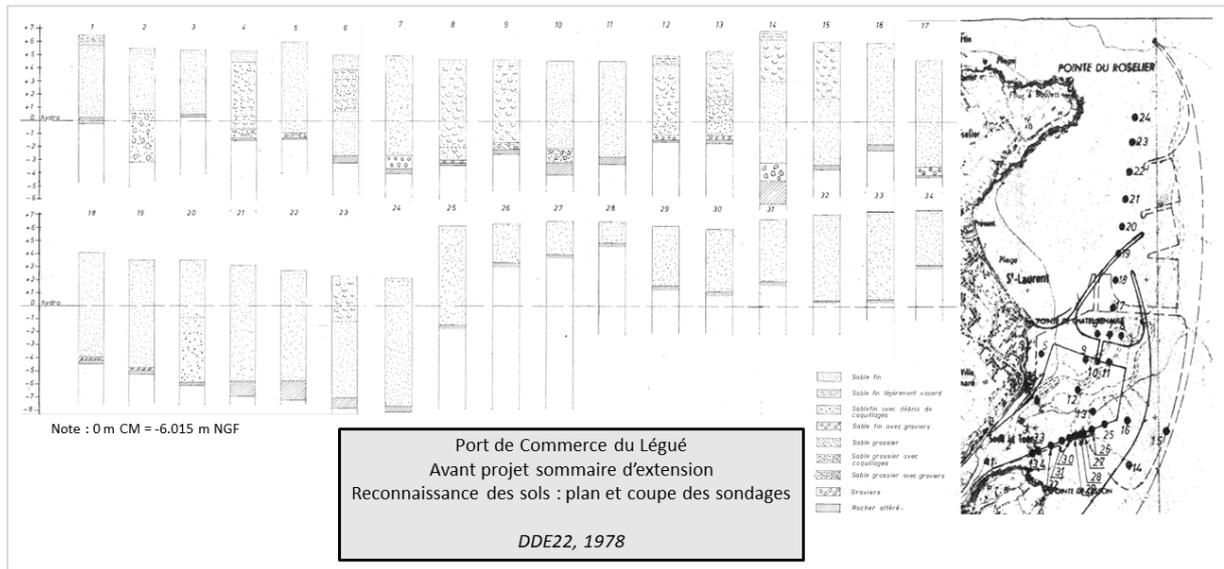


Figure 2-27. Carottages sédimentaires réalisés par la DDE des Côtes-d'Armor en 1978.

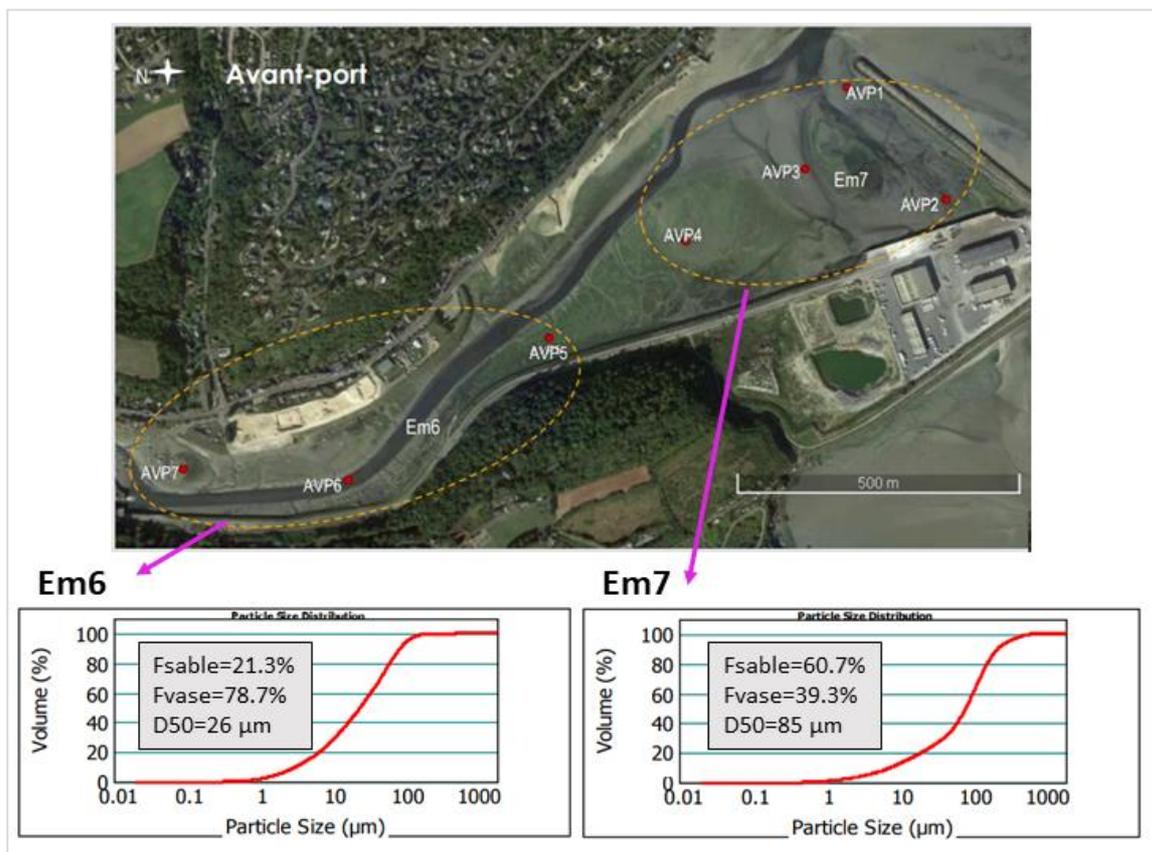


Figure 2-28. Analyses granulométriques réalisées par le laboratoire Eurofins en juillet 2019 sur la zone de l'avant-port.

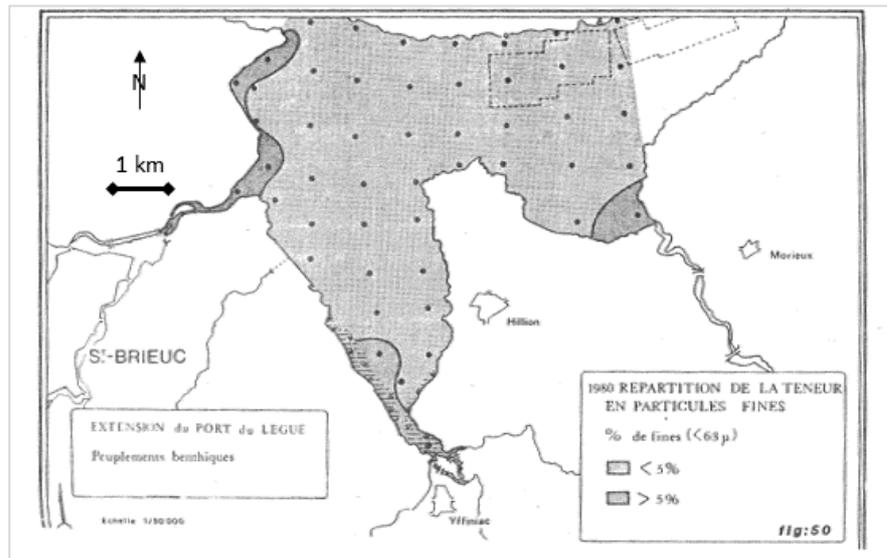


Figure 2-29. Cartes de granulométrie médiane et de fraction vaseuse dans les anses d'Yffiniac et de Morieux (source : rapport CNEOX, 1980).

2.3 EVOLUTIONS RECENTES A MOYEN/COURT TERME (PLURI-DECENNALE A PLURI-ANNUELLE)

2.3.1 DONNEES DISPONIBLES

Les évolutions morpho-sédimentaires récentes sont étudiées depuis le levé de la CCI de 1983, soit juste avant la construction du terre-plein de la pointe Cesson.

Vingt levés bathymétriques mis à disposition par la CCI et principalement réalisés par MESURIS, GEOXYZ et INGENIO, ont été utilisés afin de décrire les évolutions morpho-sédimentaires sur l'ensemble du port du Légué (1983, 2001, 2004, 2005, 2007, puis un suivi annuel à biennuel entre 2009 et 2021). Ces levés ont été réalisés au sondeur multifaisceaux depuis 2004, et ont une résolution de 1 à 5 m pour les levés récents, et jusqu'à plusieurs dizaines de mètres pour le plus ancien de 1983. Les emprises des différents levés sont représentées sur les Figure 2-30 et Figure 2-31. A noter que le levé désigné comme datant de janvier 2021 a en réalité été effectué entre novembre 2020 et février 2021.

En complément des levés de la CCI, les données suivantes sont disponibles pour nos analyses :

- un levé LIDAR de mars 2021 fourni par l'Université de Bretagne Sud (UBS, Laboratoire Géosciences Océan). La couverture spatiale est proche de l'emprise spatiale des levés CCI sur le secteur de l'avant-port et de la zone extérieure. La résolution spatiale des données est de 10 cm.
- Le levé LIDAR RGE ALTI d'août 2011 (cf. Figure 2-1) à 1 m de résolution.

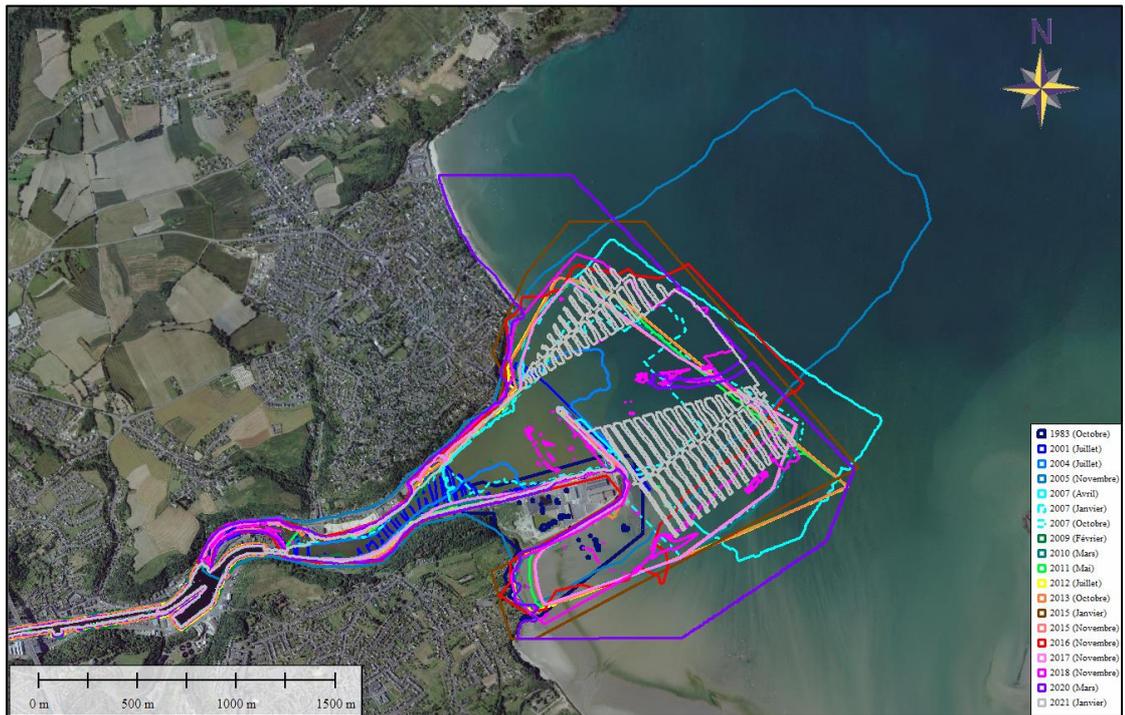


Figure 2-30 Emprises des levés bathymétriques mis à disposition par la CCI pour les analyses morpho-sédimentaires à l'extérieur du site et dans le secteur de l'avant-port.



Figure 2-31 Emprises des levés bathymétriques mis à disposition par la CCI pour les analyses morpho-sédimentaires sur le secteur des bassins à flot et du port de plaisance.

2.3.2 EVOLUTIONS SUR LA ZONE DU PORT DE PLAISANCE ET DES BASSINS A FLOT

Les levés sur le secteur en amont de l'écluse mettent en évidence des tendances à la sédimentation relativement marquées entre 2009 et 2021 (Figure 2-32). Dans les sections suivantes, les tendances d'évolutions sont décrites par le biais d'analyses complémentaires basées sur des différentiels bathymétriques, des comparaisons le long de profils, ainsi que sur des bilans sédimentaires par zones.

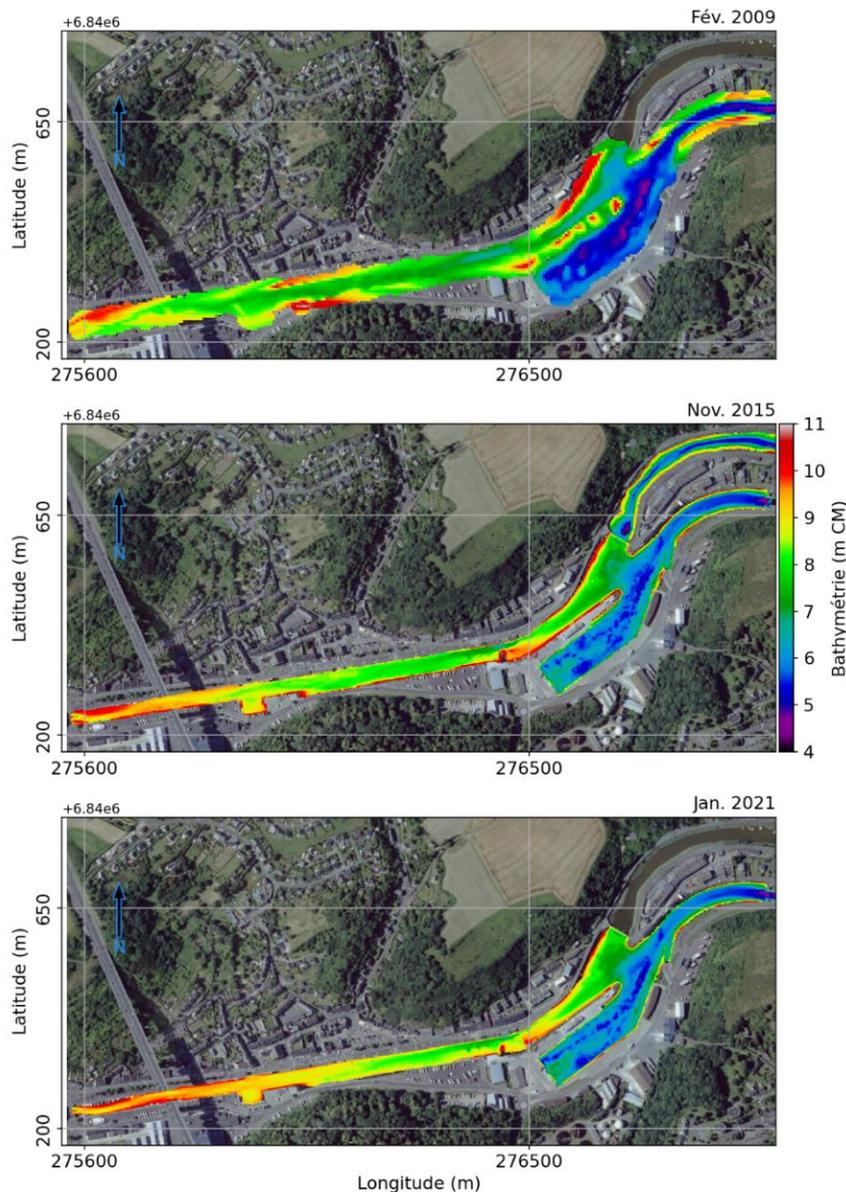


Figure 2-32. Levés topo-bathymétriques (CCI22) de 2009, 2015 et 2021 sur le secteur des bassins à flot et du port de plaisance.

2.3.2.1 Analyses par différentiels bathymétriques

Le différentiel bathymétrique entre 2021 et 2009 montre une tendance nette à l'accrétion, comprise entre 5 et 15 cm/an, avec des zones de dépôts préférentielles dans le bassin à flot n°2 ainsi que de la partie amont du port de plaisance (Figure 2-33, Figure 2-34). A l'échelle des 12 ans, les épaisseurs déposées sont de l'ordre de 0.7 à 1 m et atteignent localement plus de 1.5 m. Les différentiels bathymétriques entre les levés successifs disponibles sur la période sont illustrés en Annexes (section 8.3).

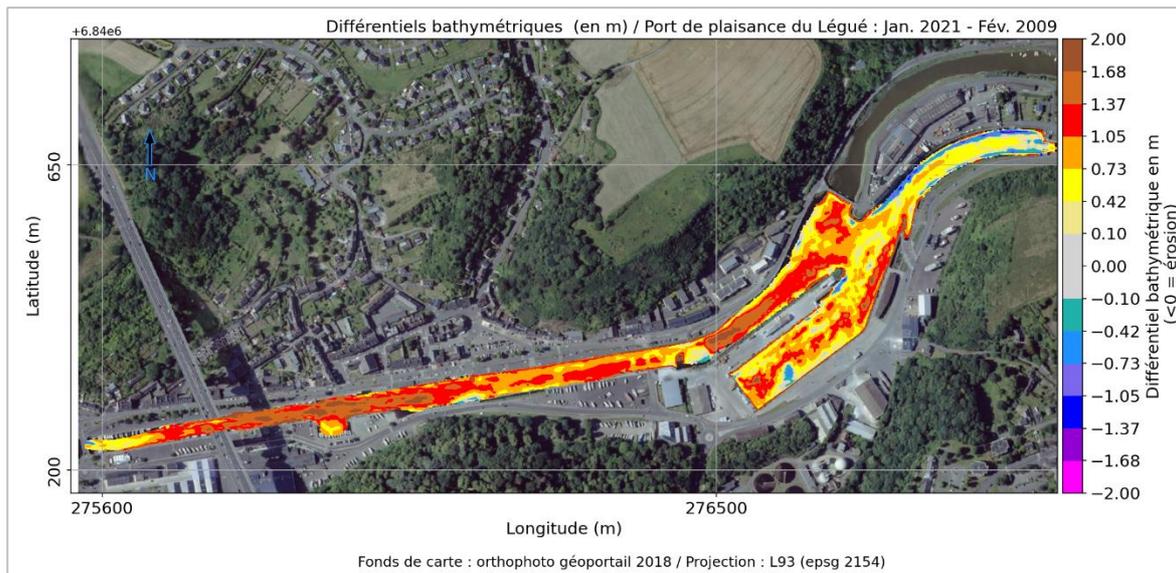


Figure 2-33 Evolutions des fonds de 2009 à 2021 (en m) – secteur port de plaisance/bassins à flot.

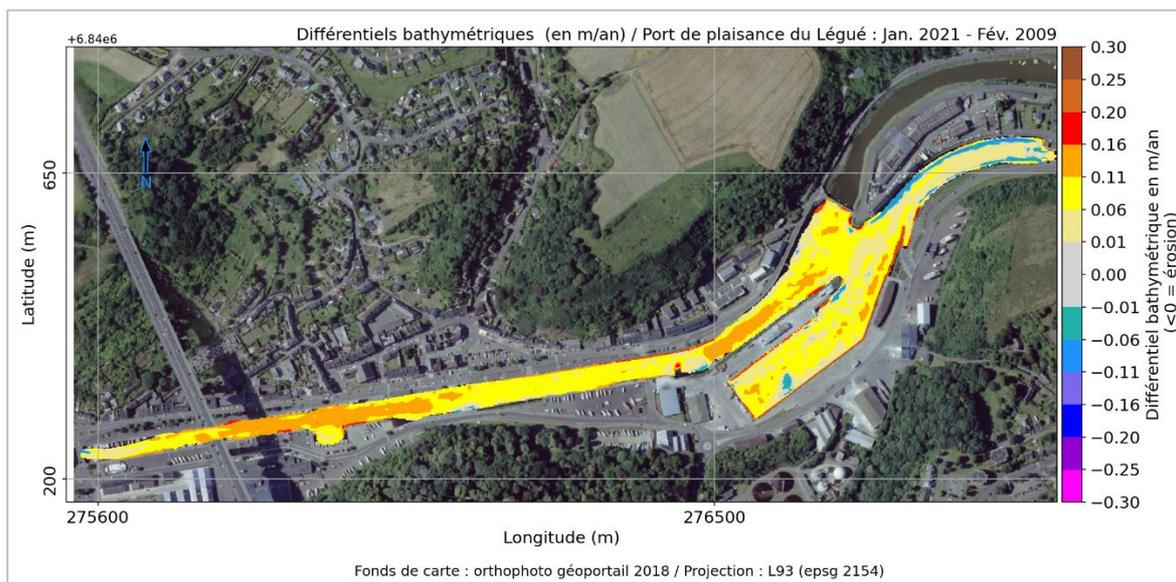


Figure 2-34. Evolutions des fonds de 2009 à 2021 (en m/an) – secteur port de plaisance/bassins à flot.

2.3.2.2 Analyses le long de profils

Les levés de 2009, 2015 et 2021 sont comparés le long de trois profils (Figure 2-35) répartis sur le secteur amont. Le long du profil PDP1, on observe un dépôt de l'ordre d'un mètre sur la partie la plus amont du port de plaisance, qui est principalement survenu entre 2009 et 2015 (Figure 2-36). Sur le reste du profil, la tendance de dépôt semble plus progressive au cours du temps,

avec une accrétion maximale au centre du port de plaisance (environ 1.5 m). On peut noter que les évolutions sont plus irrégulières à l'extrémité aval du profil PDP1, qui correspond à la zone de confluence avec le Gouëdic. Dans les bassins à flot, les dépôts sont relativement modérés (0.5 m) à proximité de l'écluse mais augmentent fortement vers l'amont, et atteignent plus de 1.5 m dans le bassin n°2 (Figure 2-37 ; Figure 2-38). D'une manière générale, les évolutions les plus importantes sont intervenues entre 2009 et 2015 sur ce secteur.

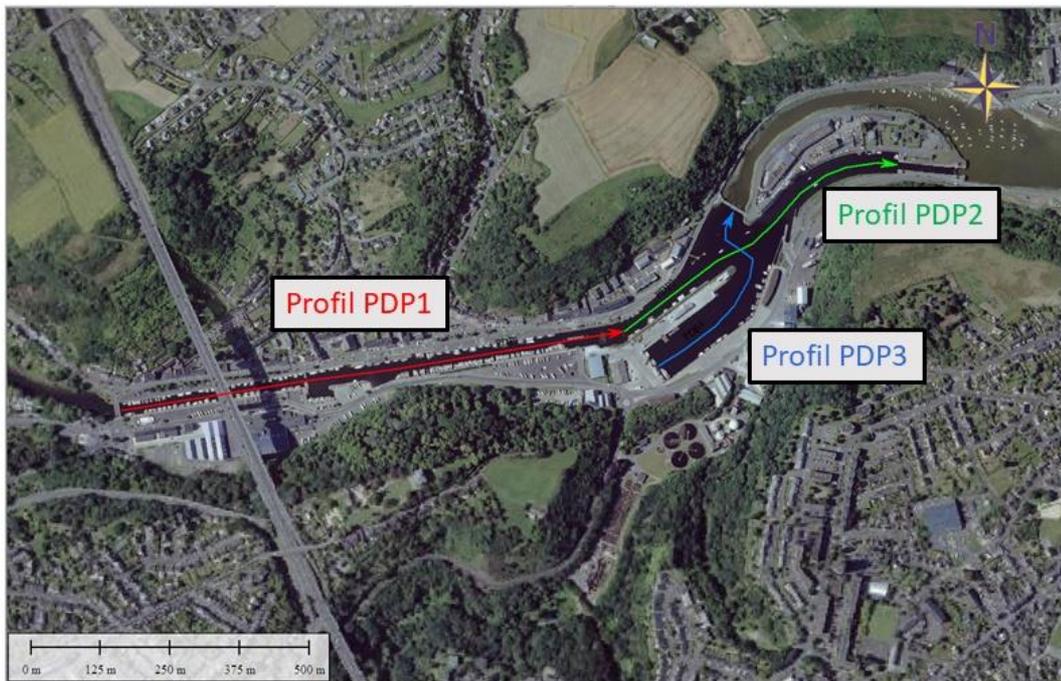


Figure 2-35. Localisation et orientation des profils utilisés pour les analyses morpho-sédimentaires – secteur port de plaisance/bassins à flot.

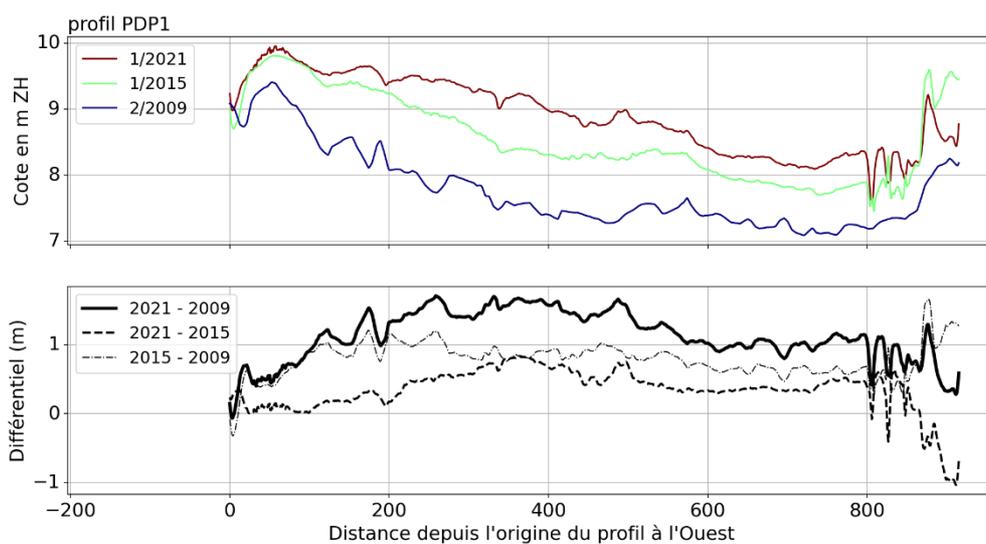


Figure 2-36. Comparaison des levés bathymétriques le long du profil PDP1.

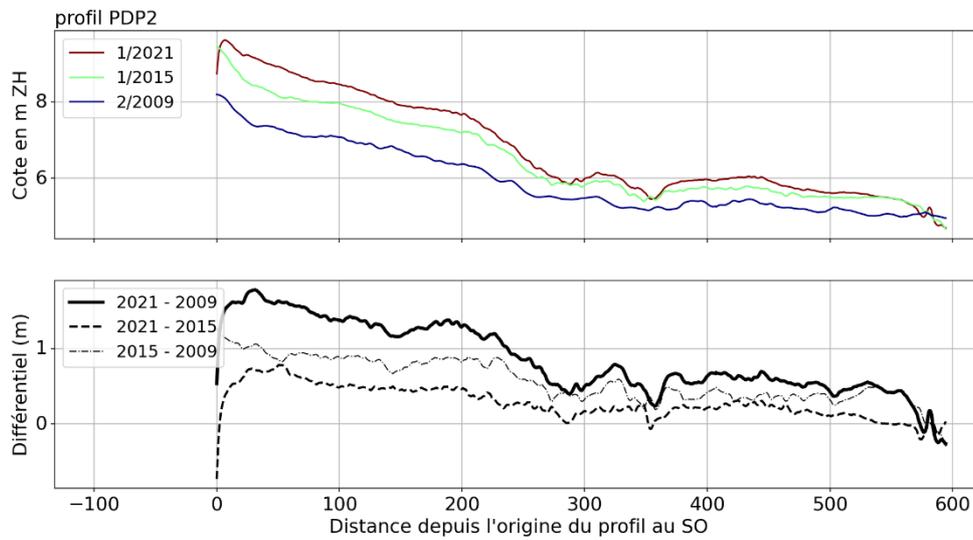


Figure 2-37. Comparaison des levés bathymétriques le long du profil PDP2.

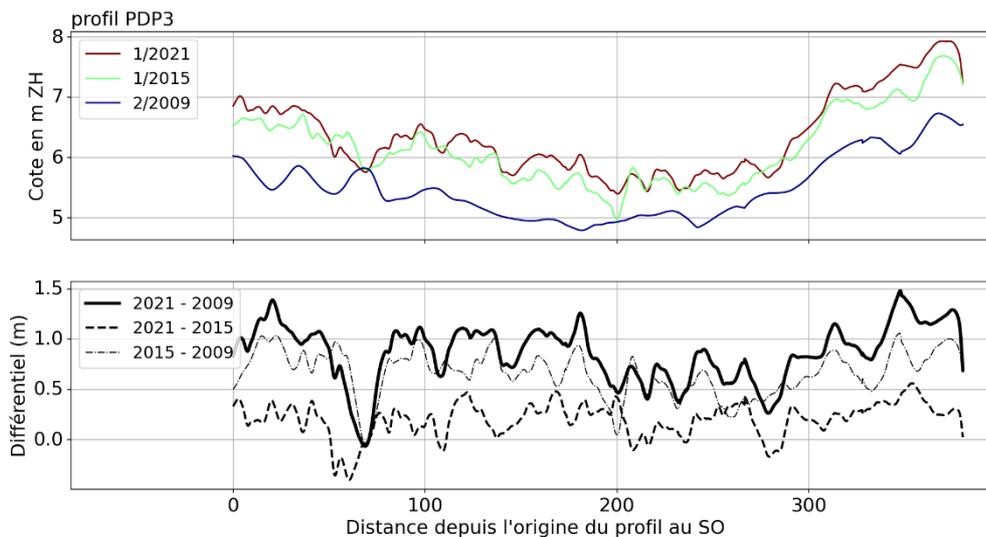


Figure 2-38. Comparaison des levés bathymétriques le long du profil PDP3.

2.3.2.3 Analyses par zones

Des bilans sédimentaires sont réalisés sur 3 zones (Figure 2-39) en calculant pour chaque levé le volume au-dessus de la cote +3 m CM. Les variations de volume du compartiment sédimentaire sont ainsi évaluées au cours du temps. Sur l'ensemble de la zone (« secteur_amont » ; Figure 2-40), environ 53 000 m³ de sédiments se sont déposés sur la période 2009-2021, soit 4417 m³/an. On peut souligner que cette tendance est proche de l'estimation de 5000 m³/an faite par le LCHF en 1977. Les variations de volume sur les zones « port_de_plaisance » et « Bassins » sont respectivement de 23 000 et 30 000 et m³ (soit 43 et 57% du total ; Figure 2-41 et Figure 2-42). En rapportant les différentiels volumiques aux surfaces de chaque zone, on obtient des épaisseurs équivalentes déposées de 0.7 m sur le secteur « Bassin », de 1 m sur le secteur « port_de_plaisance », et de 0.8 m sur l'ensemble de la zone (soit 6 à 8 cm/an).

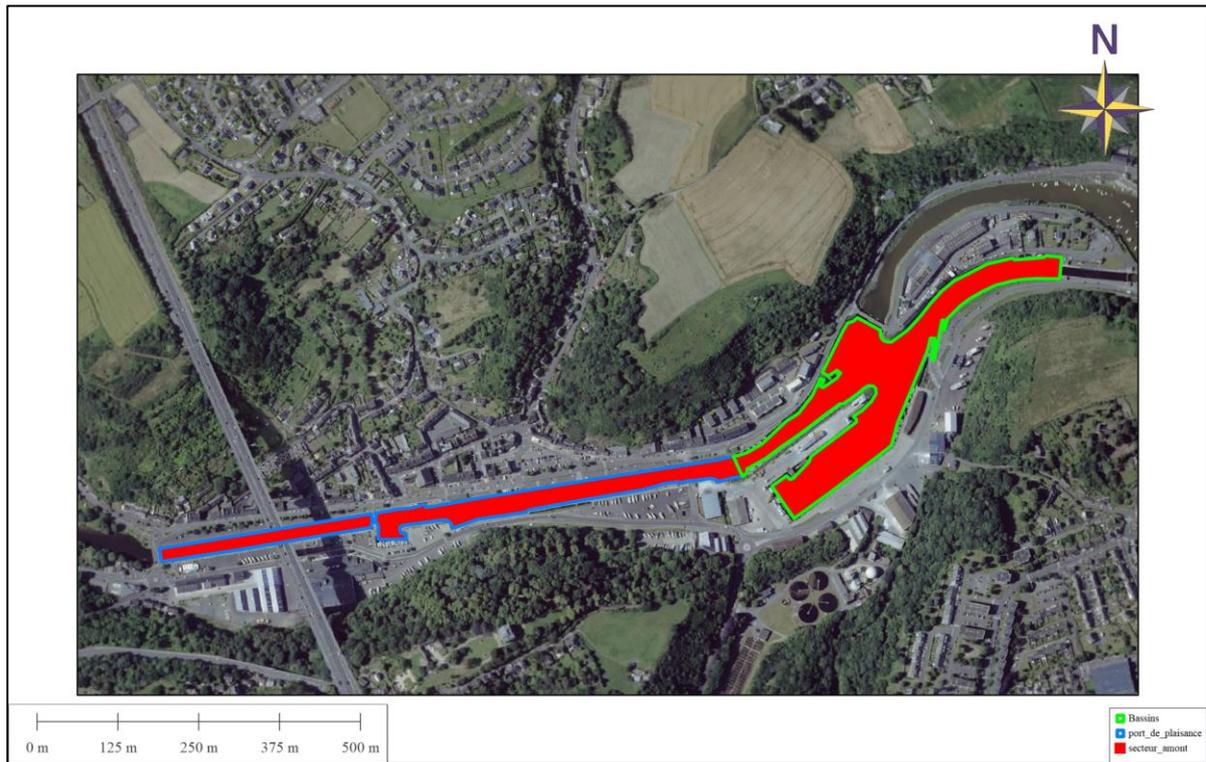


Figure 2-39. Contours définis pour les bilans sédimentaires – secteur port de plaisance/bassins à flot.

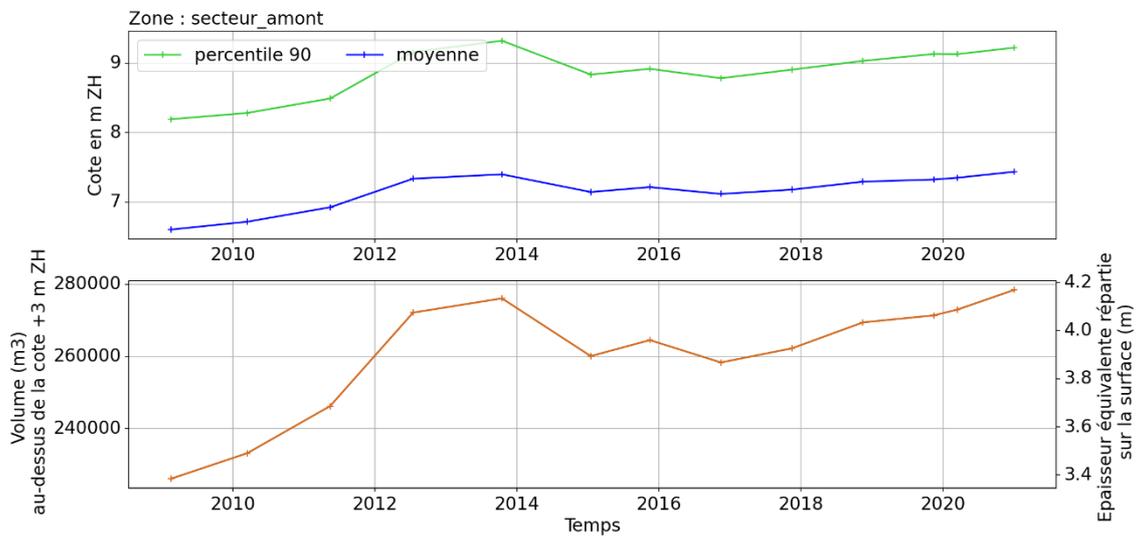


Figure 2-40. Evolution au cours du temps des cotes bathymétriques (moyenne et percentile 90) et des volumes de sédiment au-dessus du niveau +3 m CM (avec une indication d'épaisseur équivalente sur la surface considérée) pour la zone « secteur_amont ».

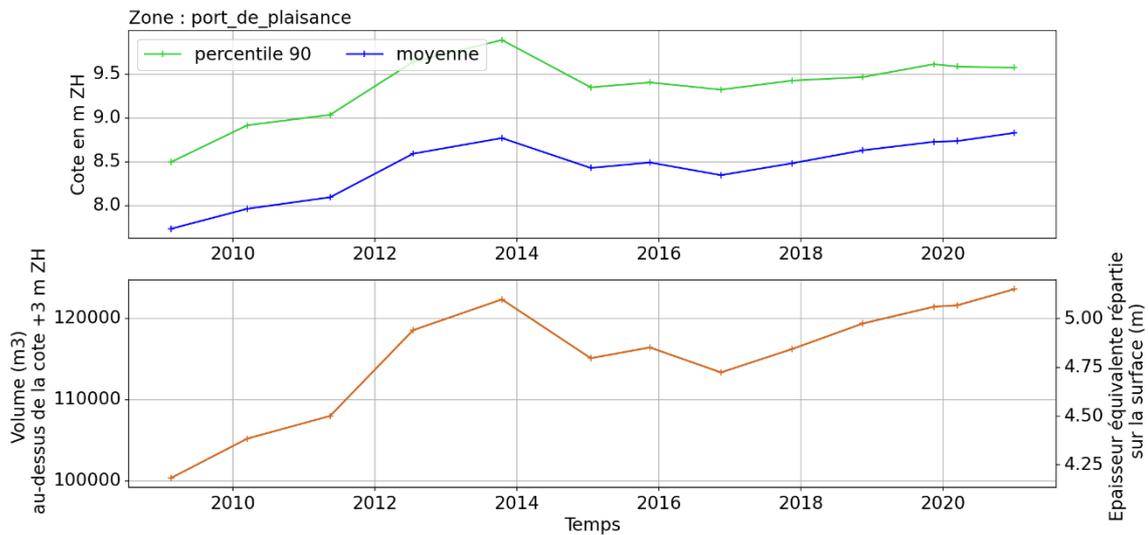


Figure 2-41. Evolution au cours du temps des cotes bathymétriques (moyenne, percentile 90) et des volumes de sédiment au-dessus du niveau +3 m CM (avec une indication d'épaisseur équivalente sur la surface considérée) pour la zone « port_de_plaisance ».

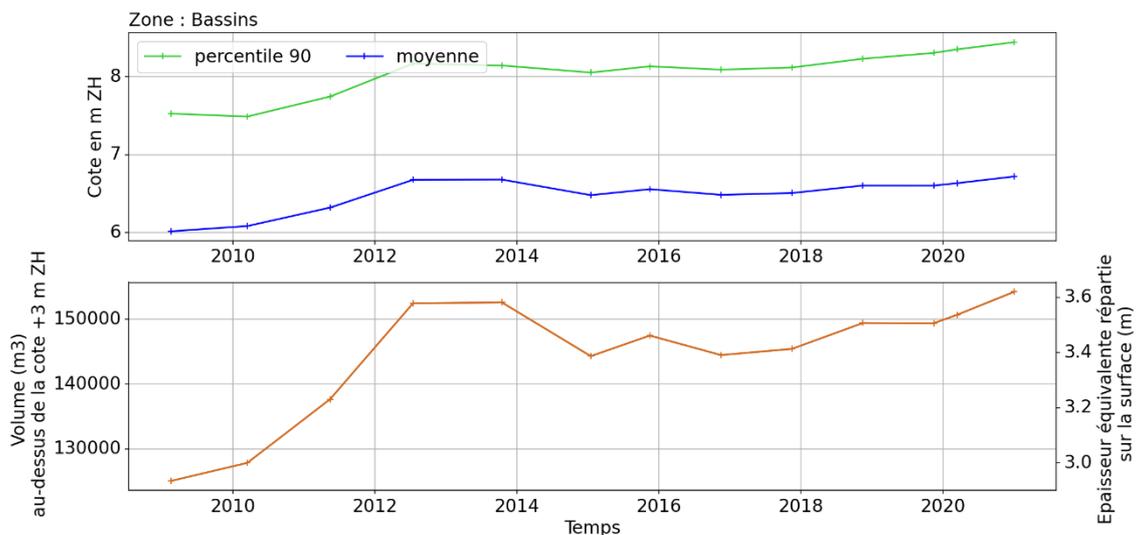


Figure 2-42. Evolution au cours du temps des cotes bathymétriques (moyenne, percentile 90) et des volumes de sédiment au-dessus du niveau +3 m CM (avec une indication d'épaisseur équivalente sur la surface considérée) pour la zone « Bassins ».

2.3.2.4 Nature des fonds

Les analyses historiques de la couverture sédimentaire sur le secteur amont (section 0) ont mis en évidence que le sédiment était resté essentiellement vaseux depuis la création des bassins jusqu'à aujourd'hui. Les dépôts qui sont intervenus sur ce secteur au cours des 15 dernières années sont donc essentiellement vaseux.

2.3.3 EVOLUTION SUR LE SECTEUR DE L'AVANT-PORT, DEVANT LE MOLE, ET SUR LA PLAGE DU VALAIS

Les données topo-bathymétriques à l'extérieur du site et dans l'avant-port mettent en évidence des tendances d'évolution marquées entre 1983 et aujourd'hui (Figure 2-43 et Figure 2-44). De la même manière que dans la section 2.3.2, ces tendances sont décrites par le biais d'analyses complémentaires basées sur des différentiels bathymétriques, des comparaisons le long de profils, ainsi que sur des bilans sédimentaires par zones.

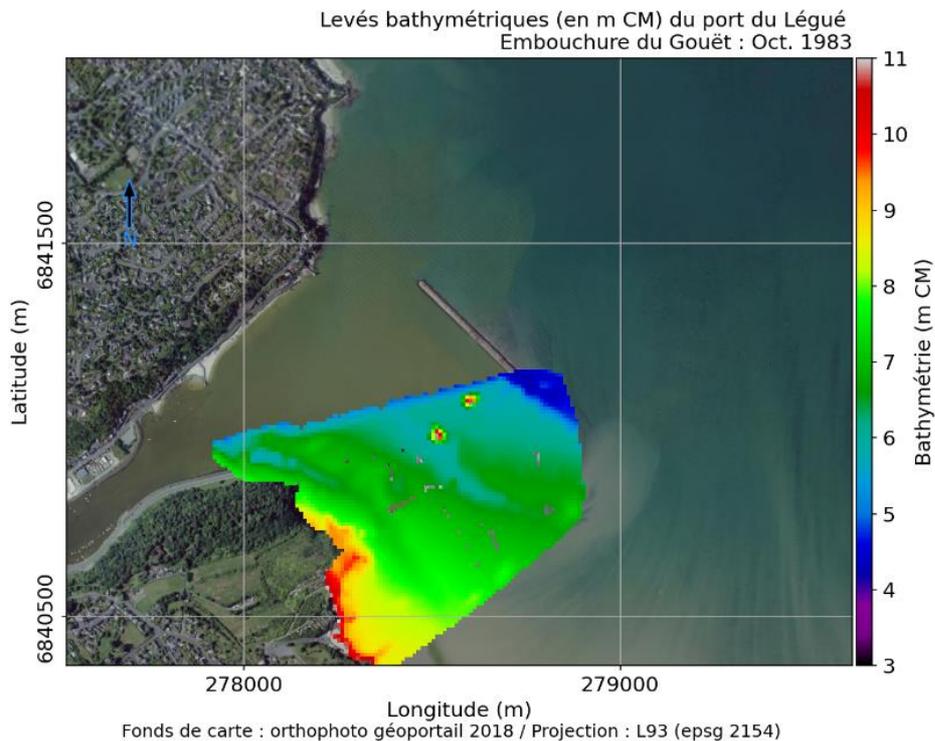
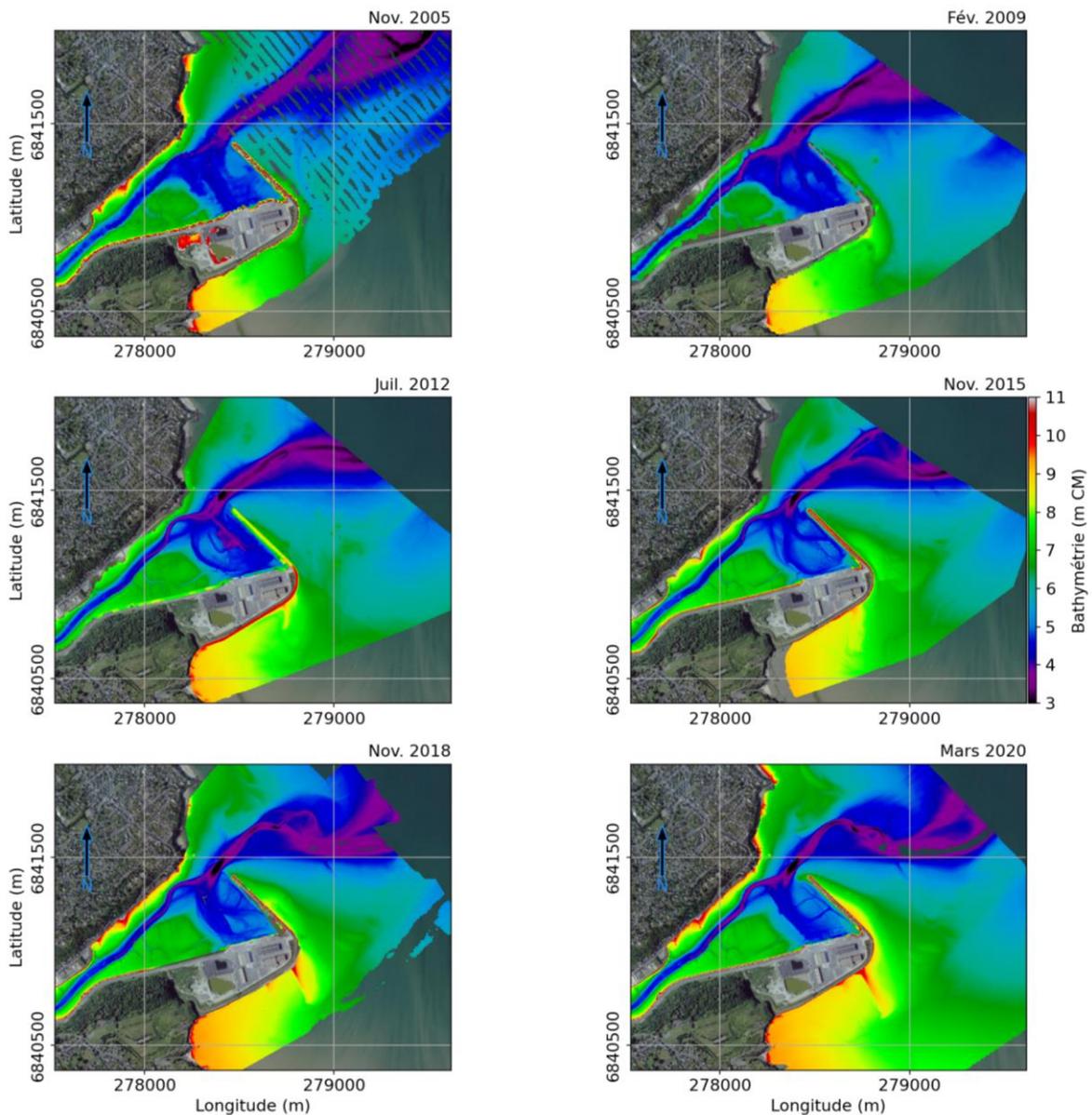


Figure 2-43 . Levé topo-bathymétrique (CCI22) de 1983.



Fond de carte : orthophoto géoportail 2018 / Projection : L93 (epsg 2154)

Figure 2-44. Levés topo-bathymétriques (CCI22) de 2005 à 2020 à l'extérieur du site et dans le secteur de l'avant-port.

2.3.3.1 Analyses par différentiels bathymétriques

Un premier différentiel bathymétrique entre octobre 1983 et novembre 2005 (Figure 2-45) permet d'apprécier les évolutions morphologiques induites par la création du terre-plein dans le prolongement de la pointe Cesson (en 1984/1985), et la construction du môle d'autre part (à partir de fin 1999), en l'absence de dépôts de dragage derrière ce dernier. En effet, avant 2007 le stockage des sédiments dragués se faisait uniquement à terre. On peut retenir principalement :

- Dans l'avant-port, ce différentiel met en évidence la zone d'entretien par dragages le long des quais, et une tendance à l'accrétion (0.5 à 1 m) sur les zones non entretenues.
- A l'extérieur :

- A l'extrémité du terre-plein/enracinement du môle, l'accrétion est substantielle de 1.5 à 2 m, et laisse entrevoir le développement d'une flèche ;
- Côté Sud du terre-plein : un exhaussement de l'estran en moyenne de 0.5 m (jusqu'à 1 m localement) dans le secteur plage du Valais.

Le différentiel bathymétrique entre novembre 2005 et mars 2020 (Figure 2-46) permet d'apprécier les évolutions depuis que l'essentiel des sédiments dragués dans l'avant-port sont déposés devant le môle. En dehors de la zone entretenue par dragages, on distingue clairement différentes zones d'accrétion/progradation :

- Sur la rive gauche du chenal principal de l'avant-port (1.5 m à 2 m, soit 10 à 15 cm/an, associée à une progradation de 1 à 2.5 m/an vers le Sud-Est ; cf. profil AVP6 dans la section suivante). Les observations sur le terrain (confirmées par la suite par les résultats de modélisation) montrent qu'il s'agit d'une sédimentation vaseuse en contrebas d'une plage sableuse.
- Sur la vasière au Sud-Ouest de la zone draguée, qui s'engraisse significativement : dépôts jusqu'à 1.5 m sur son flanc, qui prograde d'environ 5 m/an vers le Nord-Est (cf. profils AVPL1 et AVPL2 dans la section suivante) ;
- autour du musoir du môle, atteignant localement jusqu'à 3 m ;
- devant le môle, sur la zone des dépôts de dragage, avec des épaisseurs de 1 à 1.5 m en moyenne, maximales au centre de la digue (2.5 à 3 m).

Depuis l'extrémité du terre-plein, une flèche sableuse s'est constituée, avec une accrétion atteignant 2.5 à 3 m. Bien qu'une tendance marquée à l'accrétion soit visible à l'extrémité du terre-plein depuis la construction du môle (e.g. différentiel 1983-2005), le développement de la flèche a probablement été influencé par les dépôts de dragage devant la digue de l'avant-port depuis 2007, avec notamment une phase de croissance importante entre 2007 et 2009. Cette accrétion marquée sous forme de flèche, à proximité de la pointe du terre-plein, diminue progressivement vers la plage du Valais (exhaussement de l'ordre de 0.5 m en bas de plage entre 2005 et 2020). Le différentiel entre mai 2011 et mars 2020 confirme ces tendances d'évolution (Figure 2-47), et met donc bien en évidence qu'une flèche peut se former à l'extrémité du terre-plein pour ensuite migrer en direction de la plage du Valais.

Depuis juin 2020, les sédiments dragués sont uniquement stockés à terre. Le différentiel bathymétrique entre mars 2020 et mars 2021 (levé UBS par Drone) permet ainsi d'appréhender l'effet de l'arrêt des dépôts devant le môle (Figure 2-48). Une tendance à l'érosion est clairement visible devant le môle (0.5 à 1 m). Cette tendance à l'érosion est environ 5 fois plus rapide que la dynamique d'accrétion moyenne entre 2007 et 2020 (10 à 20 cm/an). Une reprise rapide de l'excédent sédimentaire (par rapport à une morphologie des fonds « à l'équilibre ») issu des dragages est donc observée, posant la question des évolutions futures devant la digue et du devenir des sédiments érodés (e.g. transport vers l'avant-port, alimentation de la flèche sableuse, engraissement de l'estran de la plage du Valais, sédiments vaseux advectés vers la réserve).

Pour aller plus loin, les analyses par différentiels sont complétées par des comparaisons entre les différents levés le long de profils, ainsi que par des bilans sédimentaires au sein de zones spécifiques.

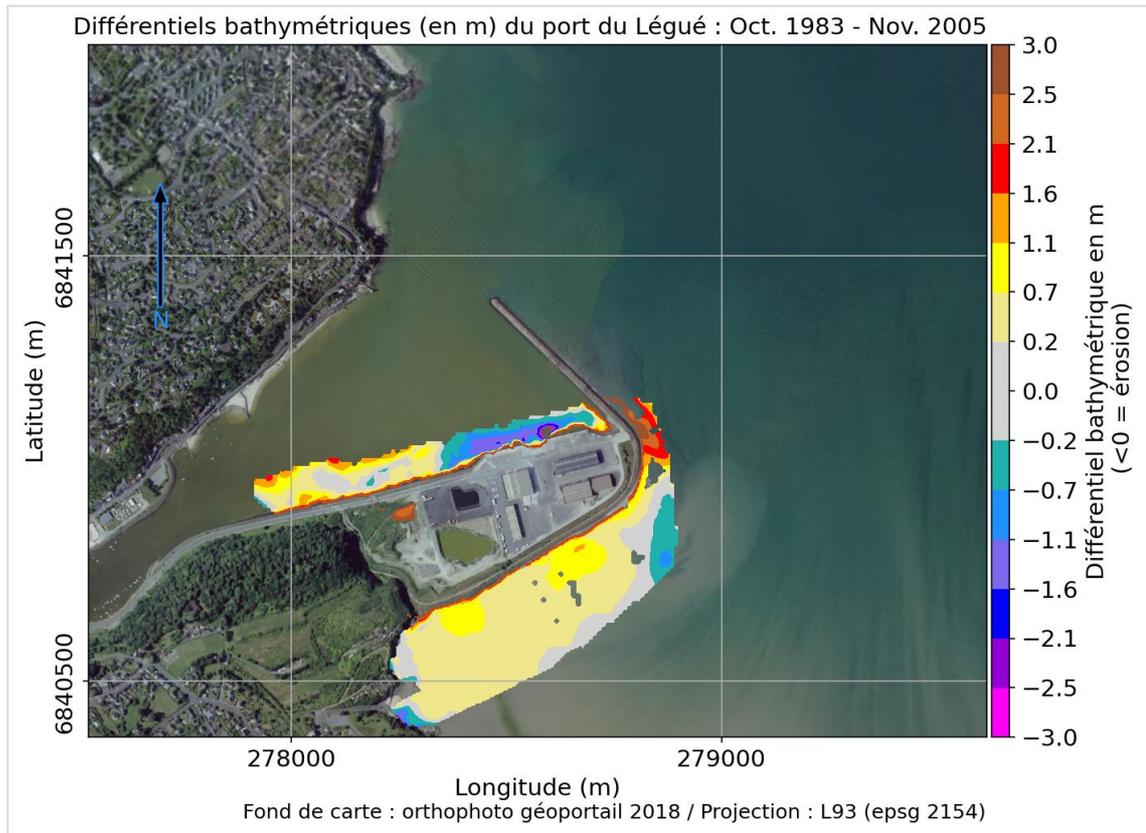


Figure 2-45. Evolutions des fonds entre 1983 et 2005.

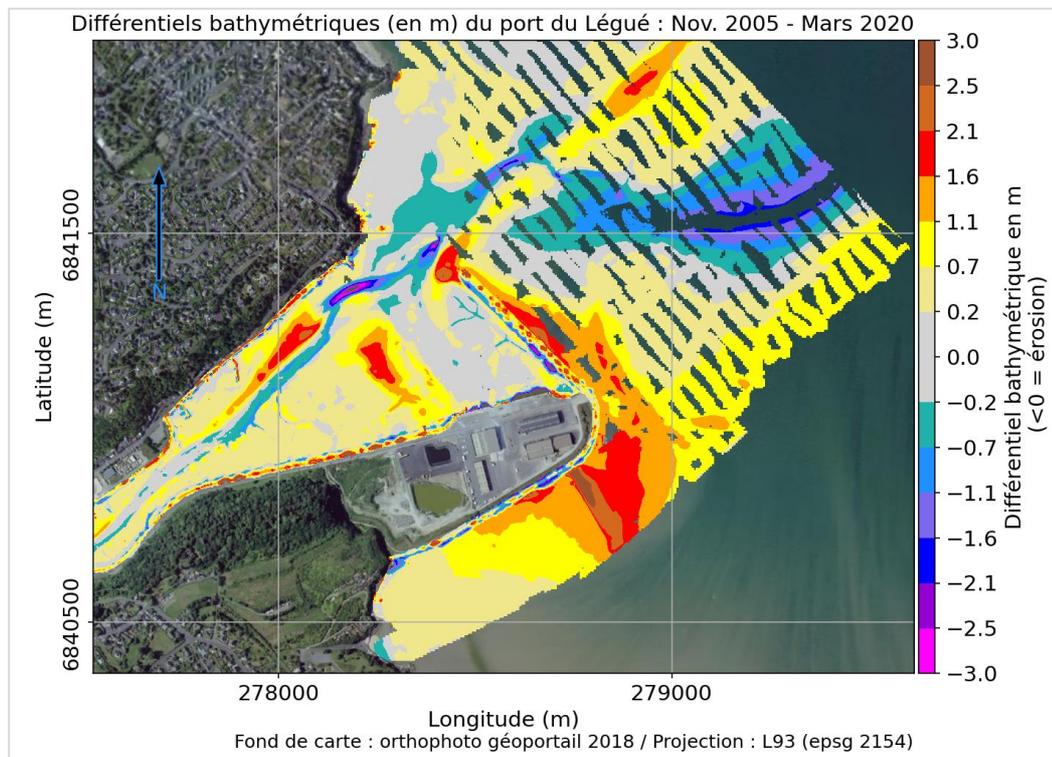


Figure 2-46. Evolutions des fonds entre 2005 et 2020.

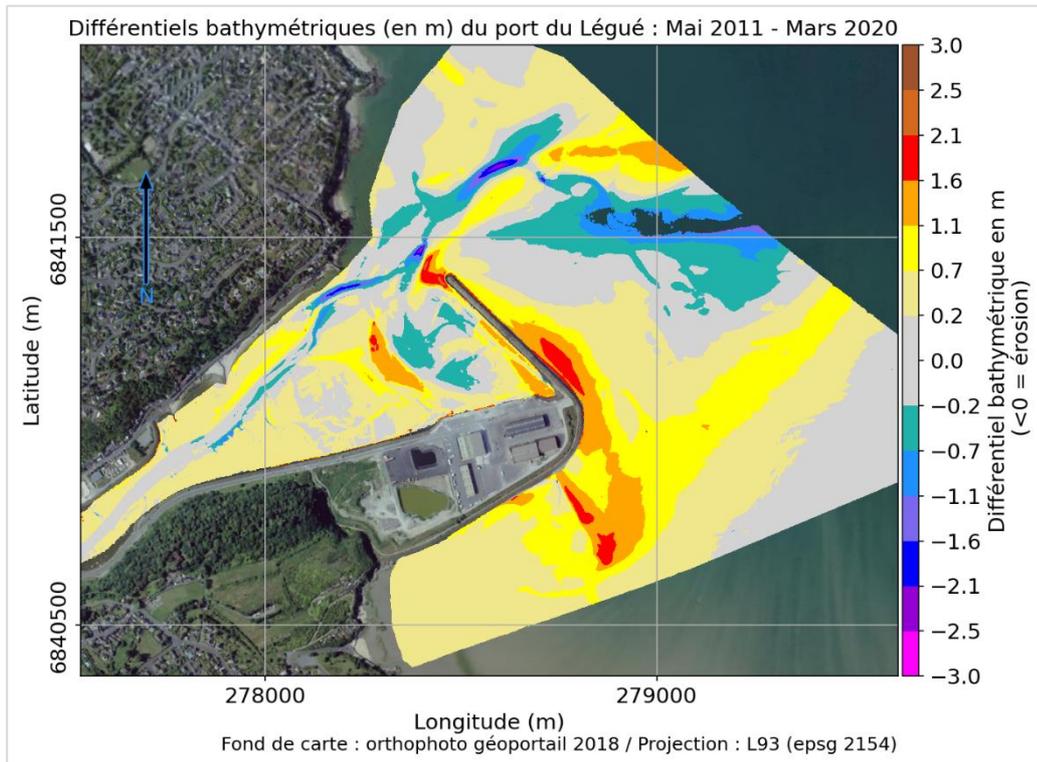


Figure 2-47. Evolutions des fonds entre 2011 et 2020.

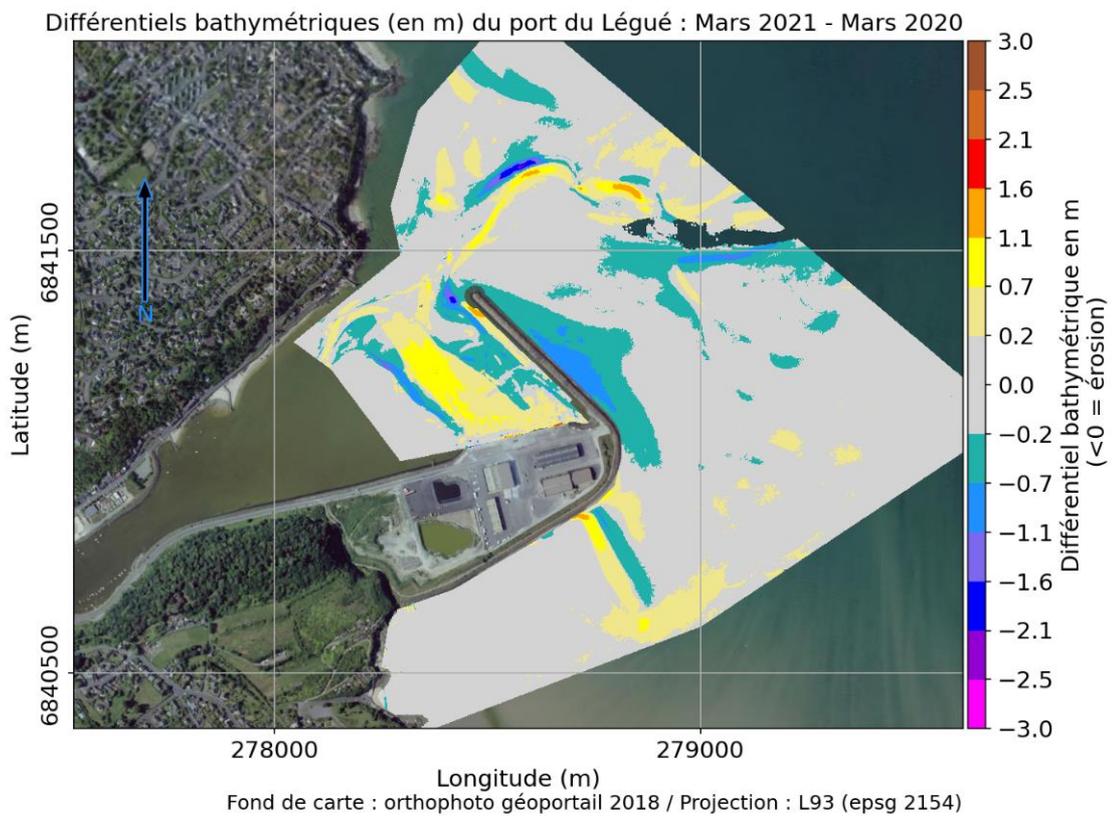


Figure 2-48. Evolutions des fonds entre mars 2020 et mars 2021.

2.3.3.2 Analyses le long de profils

Les analyses par différentiels bathymétriques sont complétées par des comparaisons des différents levés **entre 2001 et 2020** le long de différents profils repartis dans l'avant-port, devant le môle, ou au Sud de l'endigement (Figure 2-49). L'ensemble des profils de comparaison sont illustrés en Annexes (section 8.4).

A l'entrée de l'avant-port (cf. profil AVP1, Figure 2-50), qui constitue l'embouchure de l'estuaire depuis fin 1999/début 2000 (construction du môle), on peut noter un approfondissement de l'ordre de 1 m du chenal ainsi qu'une accrétion importante autour du musoir depuis fin 2018 (2.5 à 3 m).

Le long du profil AVP3 (Figure 2-50), le flanc Nord-Ouest du chenal s'est déplacé d'environ 20 m (1 m/an) vers le Nord-Ouest, avec une érosion locale de l'ordre de 2 m (10 cm/an). A noter que la zone entretenue par dragage y est clairement visible, avec une cote relativement stable au cours du temps entre +4.5 et +5 m CM.

Entre les profils AVP6 et AVP9 (i.e. en amont du secteur dragué), une zone de progradation/accrétion s'observe le long de la rive gauche tandis qu'une tendance à l'approfondissement intervient dans le chenal (0.5 m). Le flanc Nord-Ouest du chenal s'est déplacé de 20 à 50 m vers le Sud-Est (de 1 à 2.5 m/an). Cette dynamique est par exemple visible sur le profil AVP6 (Figure 2-50).

D'autre part, on peut noter que la vasière au Sud-Ouest de la zone draguée est en légère accrétion (0.5 m entre 2001 et 2020, soit 2.5 cm/an). Le long des profils AVPL1 et AVPL2 (Figure 2-51), on observe un déplacement marqué de 50 à 100 m (2.5 à 5 m/an) du flanc Sud-Ouest de la vasière en direction de la zone de dragage. Cette dynamique est associée à un exhaussement local des fonds de 1 m (5 cm/an) en bordure de vasière.

Dans l'alignement du môle, côté extérieur, les analyses selon le profil DL2 (Figure 2-51) mettent en évidence :

- Un déplacement de 80 m vers le Nord-Ouest du flanc Sud-Est du chenal (environ 4 m/an) associé un exhaussement local des fonds de 1.5 m, ainsi qu'un approfondissement du même ordre du chenal lui-même ;
- Une accrétion marquée de 1.5 à 3 m (10 à 20 cm/an) sur la zone de dépôt des sédiments dragués, maximale à environ 300 m du musoir (au croisement du profil DT3). Cette dynamique d'accrétion est visible transversalement à la digue (profils DT1 à DT4 ; Figure 2-52 et Annexe 8.4) ainsi que le long d'un second profil en long éloigné d'environ 100 m vers le large par rapport à DL2 (cf. DL1, Figure 2-51) ;
- Une zone d'accrétion se prolongeant dans la continuité de la digue (1 à 1.5 m ; profils DT5), correspondant à la création de la flèche sableuse.

La dynamique de la flèche sableuse au cours du temps est clairement visible sur le profil au droit de la plage du Valais (Figure 2-53). L'accrétion marquée de la flèche (2 m), à proximité de la pointe Nord-Est du terre-plein, diminue progressivement en direction de la plage du Valais (0.5 m). Entre fin 2017 et fin 2018, on remarque que la flèche s'est considérablement développée avec une accrétion de 1 m sur une bande de 50 à 100 m de large, et que la crête de cette zone d'accumulation s'est déplacée d'une cinquantaine de mètres en direction de la plage du Valais entre 2018 et mars 2020 (dit autrement la forme d'accumulation sableuse a migré en direction de la plage du Valais).

L'ensemble des résultats sont synthétisés sur la Figure 2-54.

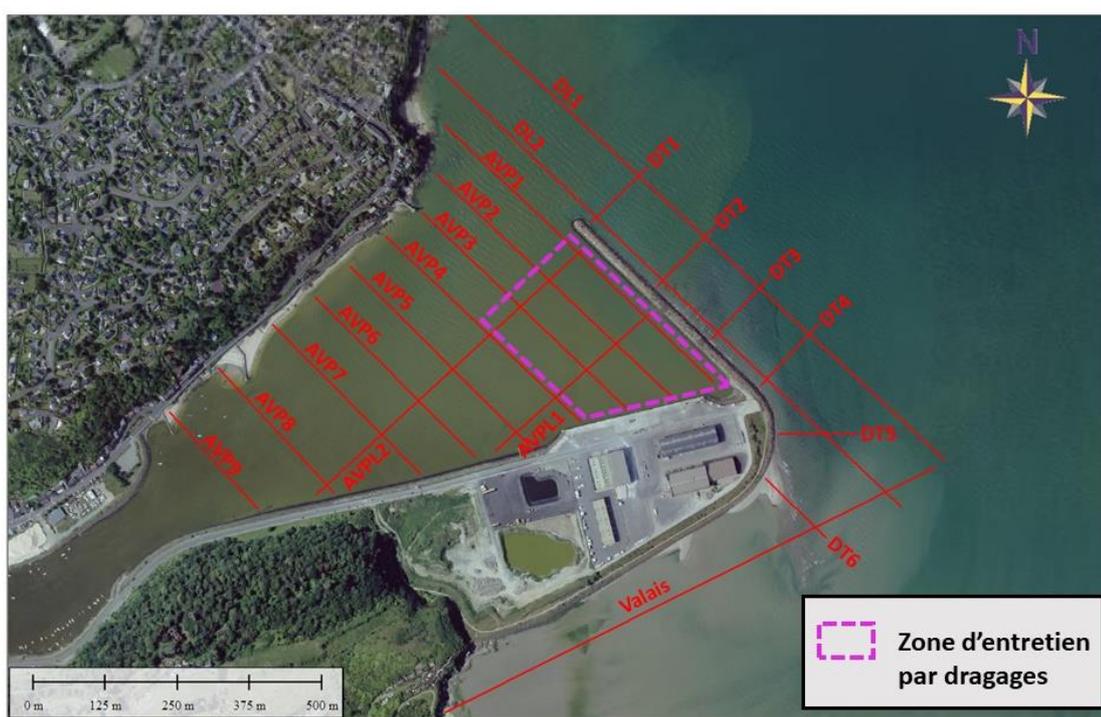


Figure 2-49. Profils définis pour les analyses morpho-sédimentaires - secteur de l'avant-port et zone extérieure.

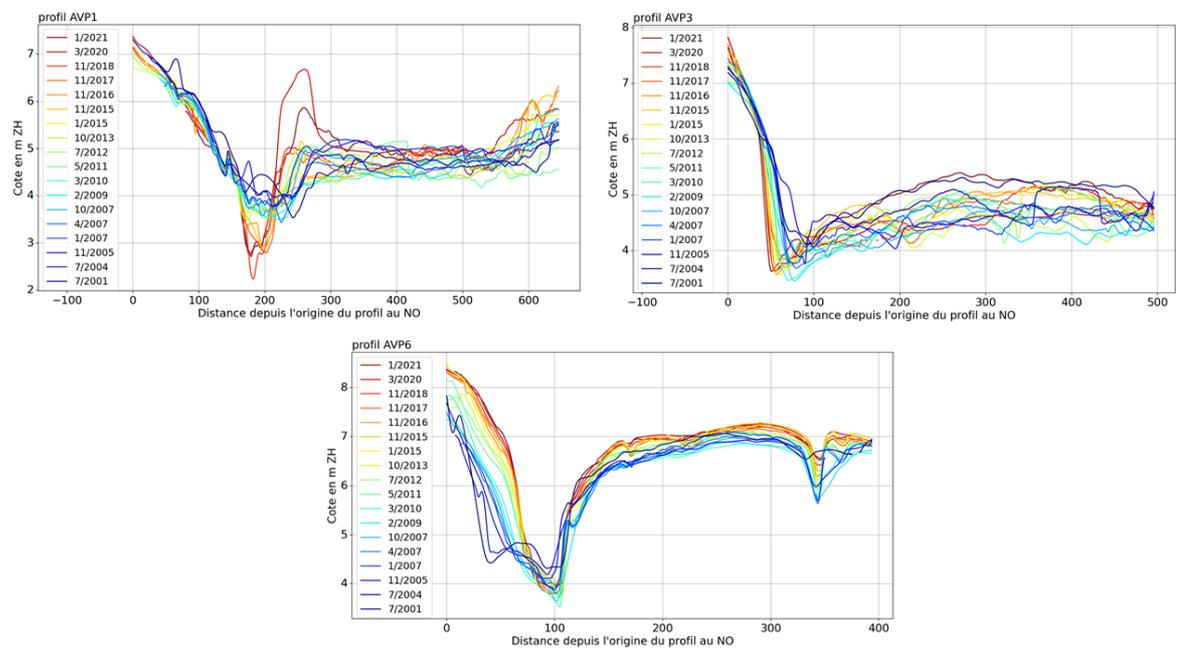


Figure 2-50. Comparaison des levés bathymétriques le long des profils AVP1, AVP3, et AVP6.

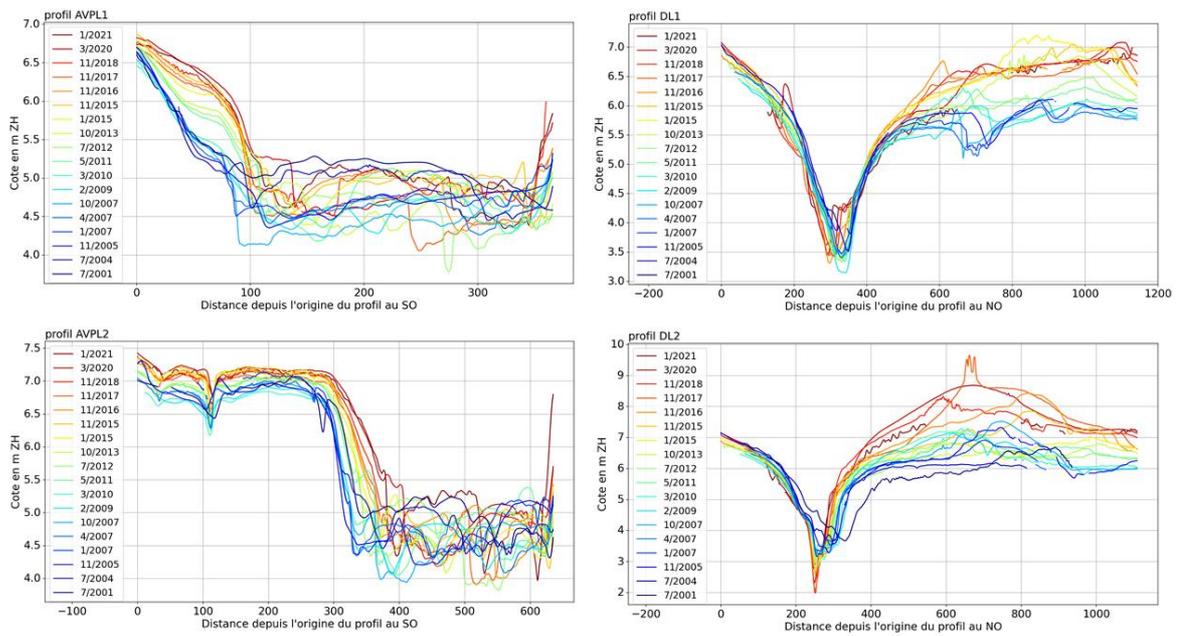


Figure 2-51. Comparaison des levés bathymétriques le long des profils AVPL1, AVPL2, DL1, et DL2.

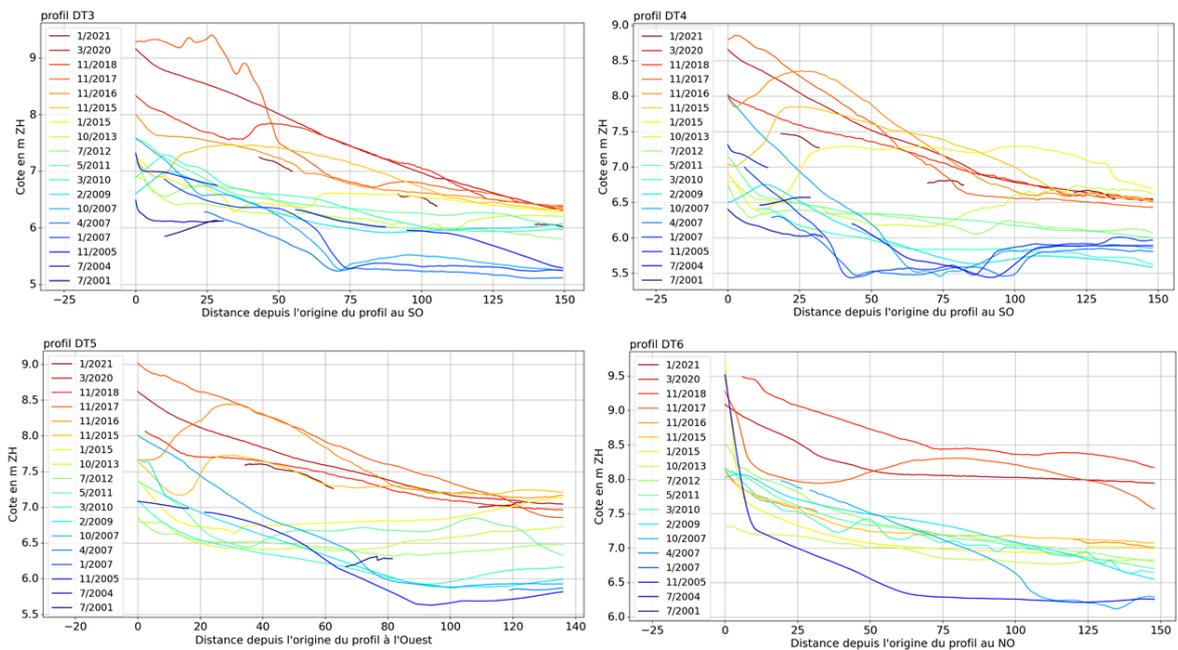


Figure 2-52. Comparaison des levés bathymétriques le long des profils DT3 à DT6.

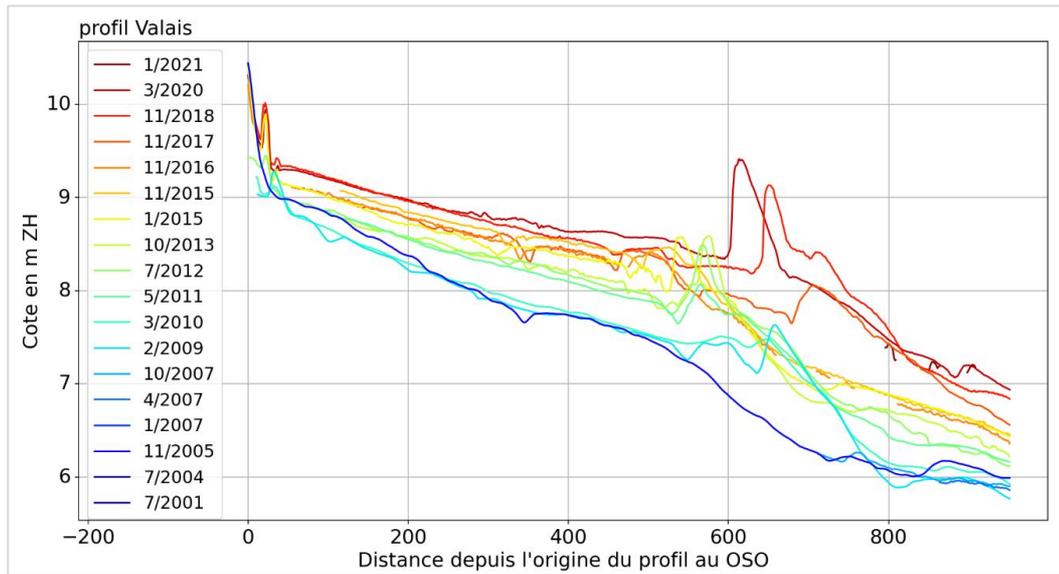


Figure 2-53. Comparaison des levés bathymétriques le long du profil « Valais ».

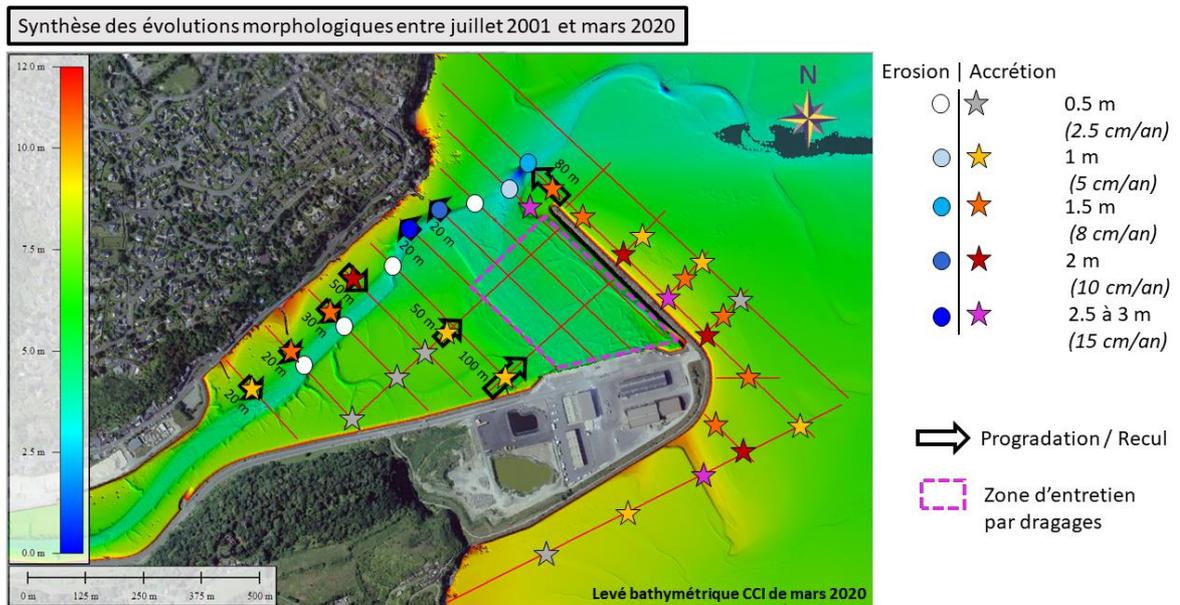


Figure 2-54. Synthèse des dynamiques d'accrétion/érosion et progradation/recul obtenues à partir des analyses comparatives des levés bathymétriques de la CCI entre juillet 2001 et mars 2020.

2.3.3.3 Analyses par zones

Le volume de sédiment (en m³) au-dessus de la cote +5 m CM a été calculé pour chaque levé bathymétrique disponible sur différentes zones (Figure 2-55), afin d'apprécier les variations temporelles du stock sédimentaire avec une approche plus intégrée.

Les résultats sont présentés pour les différentes zones sur la Figure 2-56. En répartissant les différentiels volumiques entre les différentes dates sur la surface de chaque zone, les tendances d'évolution corroborent les analyses précédentes réalisées à partir des profils :

- + 2.5 cm/an entre fin 2001 et début 2021 sur la zone non entretenue de l'avant-port « AVP2 » ;
- + 8 cm/an entre fin 2007 et début 2020 sur le secteur « digue_exterieur », correspondant à la zone de dépôt des sédiments dragués de l'avant-port ;
- + 12 cm/an entre début 2009 et début 2020 sur le secteur « fleche_sableuse_Valais », dans le prolongement de la digue de l'avant-port ;
- + 5 cm/an entre fin 2005 et début 2020 sur le secteur de la plage du Valais.

A titre indicatif, les évolutions temporelles de la moyenne et du percentile 90 des cotes bathymétriques sur chaque zone sont illustrées en Annexes (section 0).



Figure 2-55. Contours définis pour les bilans sédimentaires - secteur de l'avant-port et zone extérieure.

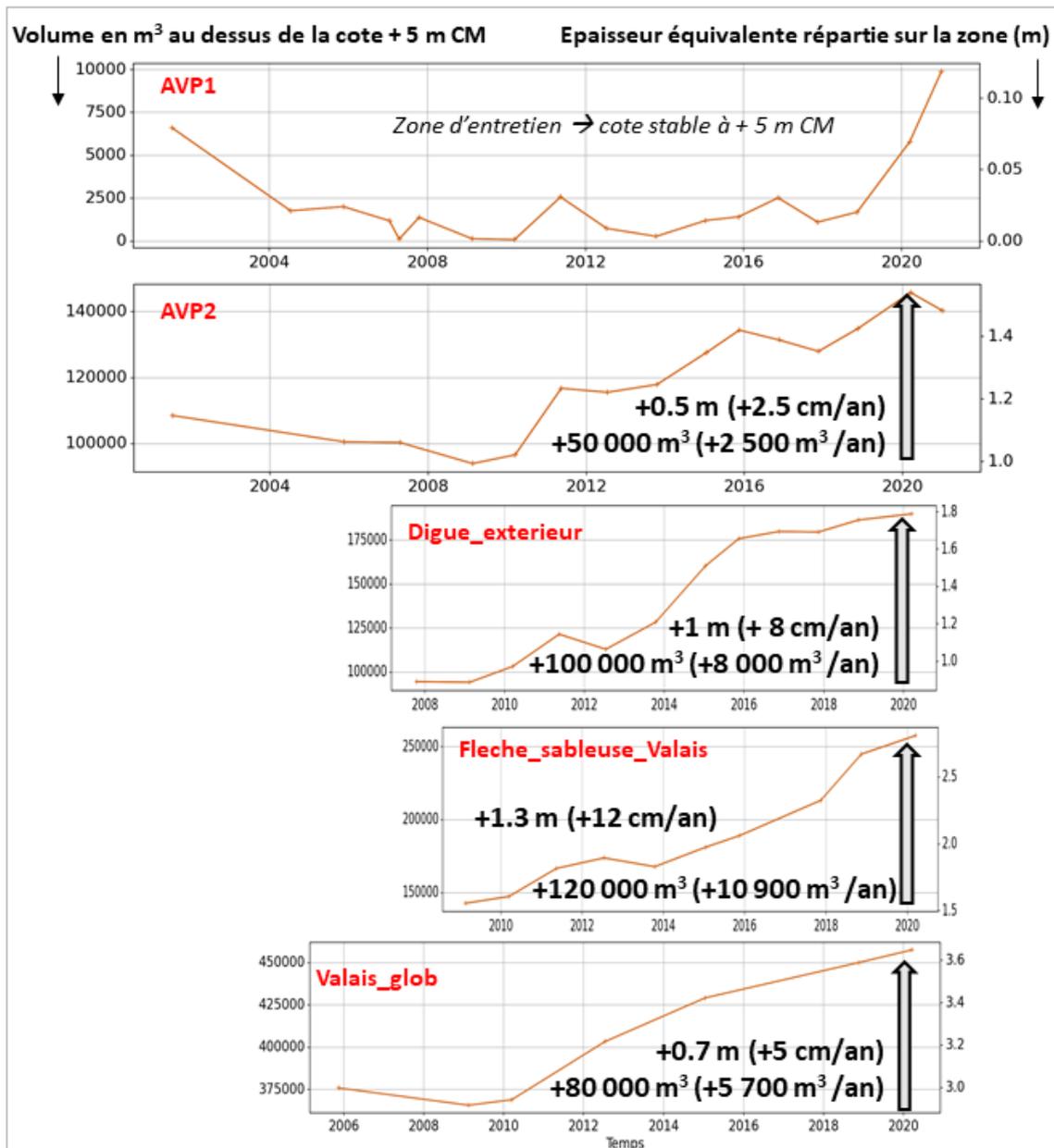


Figure 2-56. Evolution au cours du temps des volumes de sédiment au-dessus du niveau +5 m CM (avec une indication d'épaisseur équivalente sur la surface considérée) pour l'ensemble des zones du secteur aval (incluant l'avant-port, devant le môle et le secteur de la plage du Valais).

A l'échelle de la zone AVP_GLOB, la variation du volume de sédiment entre fin 2005 et début 2021 est de +100 000 m³, soit environ 7000 m³ de sédiments déposés chaque année. En étendant la zone AVP_GLOB sur la totalité de l'avant-port, les variations de volumes sédimentaires entre les différentes dates de levé ont été calculées puis comparées au volume oscillant de marée sur la même zone (hypothèse d'un niveau moyen de pleine mer à +10.2 m CM). D'après les résultats de la Figure 2-57, l'engraissement de l'avant-port se traduit par une diminution du volume oscillant de 6% entre 2006 et 2021, et de 10% en raisonnant à partir de début 2009. Cette diminution progressive et significative du volume oscillant pourrait influencer la dynamique sédimentaire dans l'avant-port, en favorisant par exemple la tendance à l'envasement (accentuation de l'asymétrie de la marée en faveur du flot).

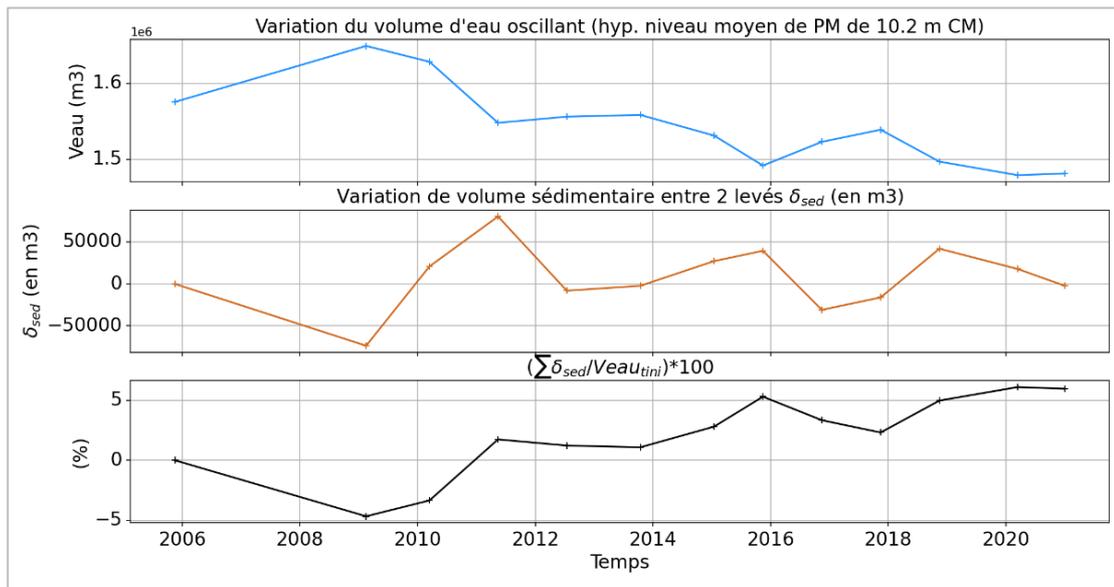


Figure 2-57 Comparaison des variations du volume sédimentaire et du volume oscillant de marée sur l'ensemble de l'avant-port (zone AVP_GLOB étendue jusqu'à l'écluse/barrage déversoir) entre fin 2005 et début 2021.

2.3.3.4 Evolution de la nature des fonds

La construction du terre-plein en 1984/1985 puis du môle en 2000 explique l'engraissement, et en particulier l'envasement, en arrière de ce dernier du fait de l'atténuation des conditions hydrodynamiques et d'agitation, et la nécessité de draguer régulièrement les fonds pour maintenir l'accès aux quais. Tel qu'évoqué dans la description des évolutions historiques (section 0), le sédiment est ainsi significativement plus vaseux sur cette zone aujourd'hui, avec des teneurs en vase en moyenne de 40% contre 5% avant les phases d'aménagement. On rappelle également qu'une incertitude demeure sur la proportion de vases marines et fluviales.

Avant que les sédiments dragués de l'avant-port ne soient majoritairement déposés devant le môle (depuis 2007), la société ASTERIE a réalisé de nombreux prélèvements sédimentaires en juin et juillet 2005 de part et d'autre de la digue de protection (Figure 2-58). Sur l'estran (i.e. côté extérieur de la digue), les teneurs en vase (« pélites ») sont inférieures à 5%, avec une proportion importante (autour de 80%) de sable très fin. A l'intérieur de l'avant-port, les fractions vaseuses les plus importantes se situent juste derrière la digue, avec des valeurs entre 30 et 50% pour les échantillons 17 à 19. La part de vase reste significative sur les zones les plus encaissées (e.g. autour de 20% pour les échantillons 22 et 23). Aux autres stations, la fraction vaseuse est globalement comprise entre 5 et 10%. La part de sable très fin reste d'une manière générale dominante. On peut supposer qu'en l'absence de dragages, la teneur en vase pourrait être encore plus élevée sur certains secteurs derrière le môle (accumulation progressive de vase sur le lit majoritairement sableux).

Depuis 2007, la CCI assure le suivi de la composition granulométrique du sédiment en 3 points situés respectivement à l'intérieur de la zone de dragage de l'avant-port (« Zone intérieure (port) »), dans la zone de dépôt devant le môle (« Zone dépôt extérieure »), et un peu plus bas sur l'estran (« Zone témoin (baie) »). Les analyses réalisées en décembre 2020 sont présentées sur la Figure 2-59 et mettent en évidence un sédiment :

- essentiellement vaseux (56%) au point intérieur avec un diamètre médian du sable de 112 μm ;

- essentiellement constitué de sable fin sur les stations extérieur et témoin, avec une teneur en vase entre 5 et 10% de vase, et un diamètre médian du sable de 158 et 181 µm, respectivement.

Les analyses de la fraction vaseuse aux trois points entre 2007 et 2021 montrent une teneur assez variable au point intérieur (20 à 30% en moyenne ; Figure 2-60). La fraction vaseuse est plus régulière d'une année à l'autre aux stations extérieure (11% en moyenne) et témoin (5% en moyenne).

On peut souligner que des analyses granulométriques ont été réalisées en 2012/2013 sur la langue sableuse localisée dans le prolongement du môle vers le Sud-Est, ainsi que sur la plage du Valais. En 2012, les deux analyses mettent en évidence une fraction vaseuse autour de 25% (Figure 2-60).



Figure 2-58. Analyses granulométriques réalisées par la société ASTERIE et juin/juillet 2005 de part et d'autre de la digue de l'avant-port.

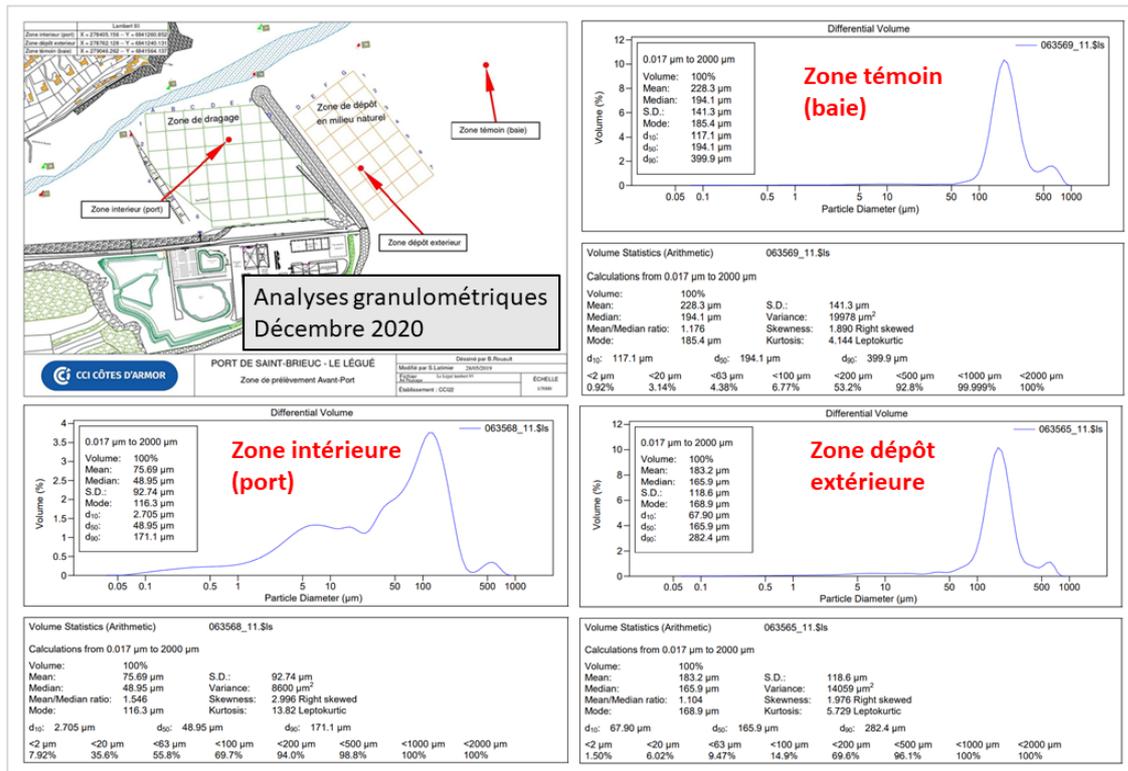


Figure 2-59. Analyses granulométriques réalisées par la CCI en décembre 2020 pour 3 stations situées de part et d'autre de la digue de protection de l'avant-port.

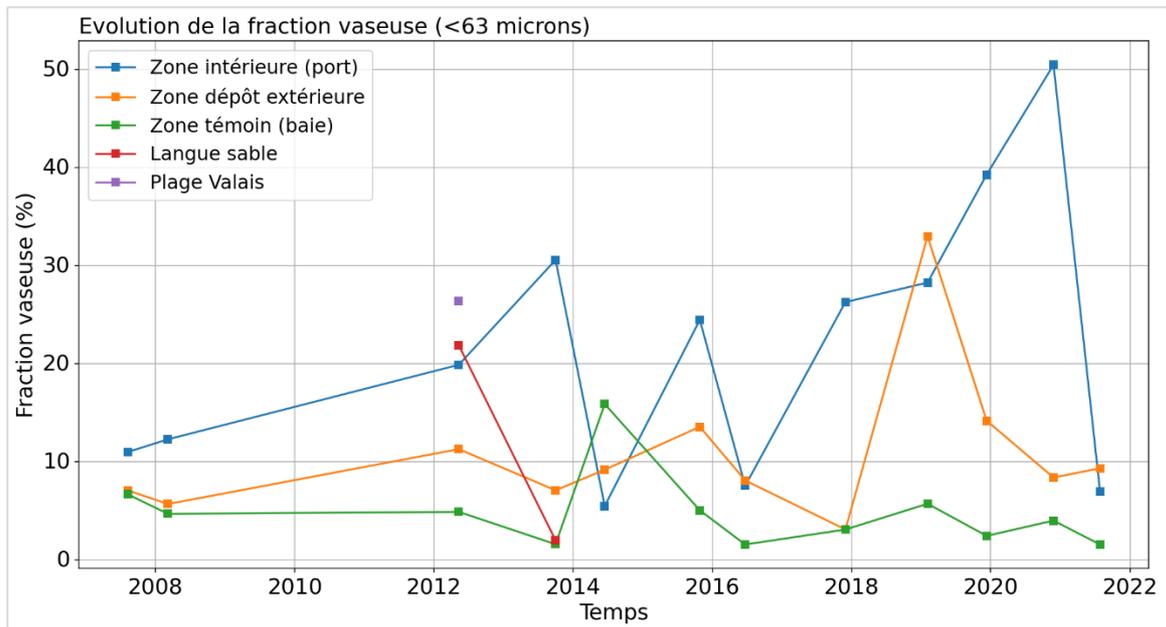


Figure 2-60. Evolution de la fraction vaseuse du sédiment superficiel sur la période 2007-2021 aux 3 stations de suivi de la CCI (cf. Figure 2-59.), ainsi que sur les secteurs de la flèche sableuse et de la plage du Valais.

D'après les analyses de nature des fonds à différents stades d'aménagement de l'avant-port, certains constats ou hypothèses sur les variations de la fraction vaseuse peuvent être avancés :

- Le sédiment est significativement plus vaseux dans la partie abritée de l'avant-port, conséquence directe de la construction du môle (30 à 50% juste derrière la digue contre 5% initialement) ;
- L'origine de l'envasement demeure incertaine. Deux interprétations contradictoires sur l'origine des vases sur le secteur de l'avant-port sont proposées par le LCHF et CNEXO. Le LCHF mentionne une proportion de vase apportée par le Gouët et le Gouëdic négligeable en aval de l'écluse (i.e. majorité de vases marines), tandis que CNEXO suggère une part non négligeable de fines d'origine fluviales jusqu'à l'embouchure de l'estuaire.
- La fraction vaseuse dans la zone de dépôt extérieure (devant le môle) est en moyenne de 10%, ce qui constitue une augmentation de quelques pourcents par rapport au sédiment à proximité (teneur en vase moyenne de 5% sur la station située plus bas sur l'estran et servant de « témoin »). On peut supposer qu'une partie de la fraction vaseuse des dépôts de dragage est progressivement lessivée par les courants et les vagues ;
- Bien que peu de données soient disponibles sur ce secteur, la fraction vaseuse au Sud de l'endigement sur le secteur de la flèche sableuse et de la plage du Valais est probablement augmentée du fait de l'influence combinée des dépôts de dragage et de l'effet d'ombrage (par rapport aux forçages hydrodynamiques) induit par le terre-plein de la pointe Cesson (autour de 25% de vase en 2012 contre probablement 5% initialement).

2.4 SYNTHÈSE

Les principales évolutions morpho-sédimentaires déduites de l'analyse des données topo-bathymétriques et de nature des fonds disponibles sont les suivantes :

- **A l'échelle de l'anse d'Yffiniac :**
 - ▶ D'après les évolutions topo-bathymétriques observées entre 1927 (SHOM) et 2011 (LIDAR RGE Alti), le dépôt serait en moyenne de +0.05 m à l'échelle de la zone allant de la pointe du Roselier jusqu'au site du Légué (i.e. entrée de l'anse d'Yffiniac). Cependant, cette tendance au dépôt n'apparaît pas significative compte tenu des marges d'erreur des levés bathymétriques ou LIDAR. Les fonds devant la zone d'étude ont en revanche localement significativement évolué et on observe une alternance de zones en érosion et en accrétion à des échelles qui sont celles d'un système de bancs sableux et de chenaux.
 - ▶ Au Sud du site du Légué, le schorre végétalisé au fond de l'anse d'Yffiniac s'est fortement développé au cours du dernier siècle, probablement en lien avec un changement de nature du sédiment superficiel et/ou à un comblement de l'anse. L'anse semble en effet se combler à mesure qu'elle s'envase, cet envasement étant probablement lié à une augmentation substantielle de la turbidité des eaux côtières il y a quelques siècles. On peut penser que le comblement, par envasement et développement conjoint d'une végétation halophile (qui elle-même favorise la sédimentation fine en atténuant les conditions hydrodynamiques sur l'estran), va se poursuivre et qu'à terme va couvrir toute la largeur de l'anse d'Yffiniac, pour n'être entrecoupée que localement par les chenaux d'estran.
- **Sur le secteur en amont de l'écluse (bassins à flot, port de plaisance) :**
 - ▶ 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.

- ▶ 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 m³/an, ce qui est proche du calcul réalisé par le LCHF en 1977 (5000 m³/an).

■ Sur le secteur de l'avant-port :

- ▶ 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 m³/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 m³ 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'il ne l'était 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-Gilette), 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).

■ Devant le môle et sur le secteur de la flèche sableuse :

- ▶ 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 m³/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 900m³/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%.

■ Sur le secteur du Valais (plage et estran au Sud du terre-plein) :

- ▶ 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).

3. METHODOLOGIE SPECIFIQUE MISE EN ŒUVRE POUR L'ESTIMATION DES APPORTS SEDIMENTAIRES DU GOUËT

Tel qu'évoqué dans la section 2 dédiée à la description des évolutions morpho-sédimentaires, une tendance à la sédimentation est clairement cartographiée sur le secteur de l'avant-port avec une part importante de vase. Une incertitude demeure cependant sur la proportion de vases marines et fluviales contribuant à cet envasement. Afin d'apporter de nouveaux éléments de réponse grâce à la modélisation, il est nécessaire de connaître au préalable les niveaux de turbidité associés au Gouët.

Les informations relatives aux apports sédimentaires du Gouët sont très peu nombreuses. Quelques mesures ponctuelles suggèrent des concentrations de matière en suspension (MES) inférieures à 20 mg/l. Cet ordre de grandeur de la charge en suspension semble cohérent par rapport aux observations plus nombreuses de turbidité réalisées le long de l'estuaire du Trieux, situé à proximité du Légué et dont le débit fluvial est proche de celui du Gouët. En effet, la concentration en MES est généralement comprise entre 5 et 15 mg/l sur le secteur amont de l'estuaire du Trieux. Néanmoins, une méthodologie a été mise en place afin de quantifier plus spécifiquement les apports solides et les concentrations en MES associés au Gouët. Cette méthodologie s'appuie sur :

- des analyses sédimentaires réalisées sur des échantillons prélevés dans le port de plaisance et dans les bassins à flot.
- L'exploitation des évolutions morphologiques entre les levés successifs (différentiels volumiques de sédiments) ;

3.1 ANALYSES DE SEDIMENT

Les données granulométriques et sédimentologiques réalisées en 2019 (Figure 3-1) fournissent les valeurs de fraction vaseuse (volumique ; f_{vase}) et de masse volumique humide (eau et sédiment ; C_{bulk}) sur différents secteurs du port de plaisance et des bassins à flot (secteurs Em1 à Em5). Les résultats obtenus sur chaque secteur correspondent à une moyenne sur 3 échantillons.

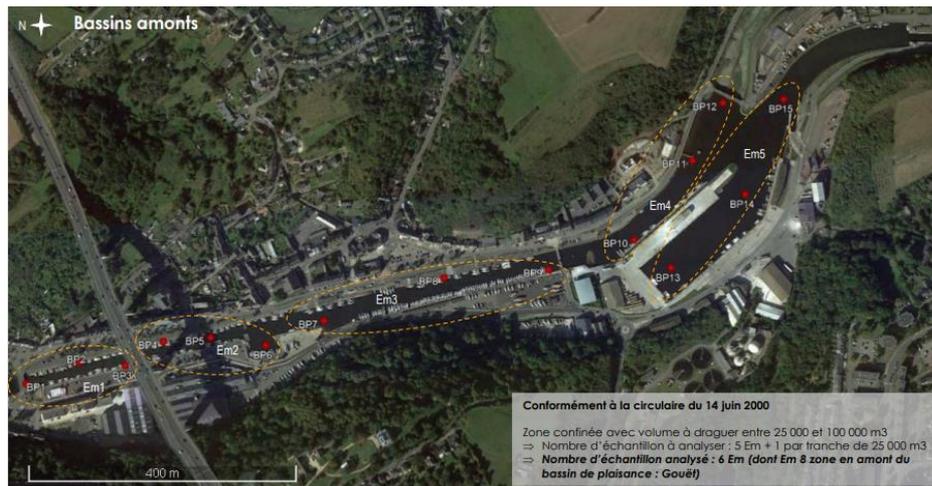


Figure 3-1 Rappel de la localisation des prélèvements sédimentaires réalisés par le laboratoire Eurofins en juillet 2019 dans le port de plaisance et dans les bassins à flot.

Pour chaque secteur « Em », l'objectif est de connaître la masse volumique de la vase (M_{vase}), ainsi que son état de consolidation ($C_{relvase}$). Les formules présentées par la suite sont issues de l'aide-mémoire de dynamique sédimentaire de Le Hir (2008).

Tout d'abord on suppose que :

- la masse volumique de l'ensemble des grains de l'échantillon, quelle que soit leur taille, est de 2700 kg/m³ (ρ_{sed}) ;
- la densité de l'eau (de mer) vaut 1025 kg/m³ (ρ_{eau}) et l'échantillon est saturé (en eau).

La masse volumique humide correspond à la combinaison de la masse des grains et de l'eau dans un m³ d'échantillon, telle que :

$$C_{bulk} = V_{sed} \times \rho_{sed} + V_{eau} \times \rho_{eau}$$

V_{sed} et V_{eau} étant respectivement les volumes de sédiment et d'eau.

A une masse volumique humide et une densité de grain données, correspond une masse volumique sèche M_{sed} . En raisonnant sur 1 m³ ($V_{sed} + V_{eau} = 1 \text{ m}^3$), le volume de sédiment V_{sed} peut être calculé tel que

$$V_{sed} = \frac{C_{bulk} - \rho_{eau}}{\rho_{sed} - \rho_{eau}}$$

La masse de sédiment sec vaut ainsi

$$M_{sed} = V_{sed} \times \rho_{sed}$$

Les teneurs en fines de la granulométrie laser étant volumétriques, le volume occupé par la vase (<63 μm) est

$$V_{vase} = f_{vase} \times V_{sed}$$

Avec la masse volumique sèche de vase M_{vase}

$$M_{vase} = V_{vase} \times \rho_{sed}$$

Afin de quantifier l'état de consolidation de la vase, il convient de calculer sa concentration entre les grains constituant la matrice sableuse. Le volume non occupé par les grains de sable, $V_{relvase}$, est exprimé de la manière suivante :

$$V_{relvase} = V_{eau} + V_{vase}$$

La concentration relative de vase est ainsi calculée telle que

$$C_{relvase} = \frac{V_{vase} \times \rho_{sed}}{V_{relvase}}$$

Les résultats sont présentés dans le Tableau 3-1 pour les secteurs Em1 à Em5. On peut souligner des différences importantes sur l'état de consolidation de la vase selon les secteurs. Dans les bassins à flot (Em4 et Em5), les concentrations relatives de vase témoignent d'un sédiment pré-consolidé (environ 500 kg/m³). Dans le port de plaisance (Em1 à Em3), les faibles valeurs de $C_{relvase}$ indiquent que le fond est essentiellement constitué de crème de vase (<100 kg/m³), plus facilement érodable.

Echantillon	f_{vase} (-)	C_{bulk} (kg/m ³)	V_{sed} (m ³)	M_{sed} (kg/m ³)	V_{vase} (m ³)	M_{vase} (kg/m ³)	$C_{relvase}$ (kg/m ³)
Em1	0.48	1130.0	0.063	170.1	0.03	81.39	84.16
Em2	0.56	1080.0	0.033	89.1	0.019	50.22	50.95
Em3	0.67	1080.0	0.033	89.1	0.022	59.62	60.28
Em4	0.82	1430.0	0.242	653.4	0.199	536.31	560.62
Em5	0.65	1490.0	0.278	750.6	0.18	485.79	538.62

Tableau 3-1 Résultats des analyses réalisées sur les différents échantillons prélevés dans le secteur amont en 2019.

3.2 EVALUATION DE LA CHARGE EN SUSPENSION A PARTIR DES EVOLUTIONS MORPHOLOGIQUES DE FOND

Les différents faciès décrits dans la section précédente ont motivé le découpage du secteur amont en deux zones distinctes dans la suite des analyses (« port_de_plaisance » et « Bassins » ; Figure 2-39). Pour une zone donnée, la méthodologie permettant de calculer le flux solide et la concentration de vase en suspension associés au Gouët et Gouëdic est la suivante :

- étape 1 : calcul d'un différentiel volumique de sédiment entre deux levés successifs, ΔV (m^3).
- étape 2 : conversion en différentiel massique de vase, ΔM , grâce aux masses volumiques sèches (M_{vase}) déterminées dans la section précédente.
- étape 3 : calcul d'un flux solide en kg/s sur l'intervalle de temps dt séparant deux levés successifs

$$Q_{vase} = \Delta M / dt$$

- étape 4 : définition d'une vitesse de chute de la vase, W_s , et d'une tranche d'eau moyenne à l'échelle de la zone considérée, H_{eau} , telle que

$$H_{eau} = 11.4 - Z_{moy}$$

Z_{moy} étant la cote moyenne du fond sur la zone, et 11.4 correspondant à la cote du niveau d'eau maintenue sur la partie du port en amont de l'écluse.

- étape 5 : Calcul du temps de décantation de la vase sur la tranche d'eau moyenne

$$t_{decant} = H_{eau} / W_s$$

- étape 6 : calcul de la masse de vase théoriquement déposée pendant la durée t_{decant} , et mise en suspension de cette charge de fines dans le volume d'eau à l'échelle de la zone (surface S_{zone}). La concentration de vase en suspension, CMES en mg/l, est définie telle que

$$C_{MES} = 1000 \times \left(\frac{Q_{vase} \times t_{decant}}{V_{eau}} \right)$$

avec

$$V_{eau} = H_{eau} \times S_{zone}$$

Cette procédure a été appliquée sur la période 2009-2021 pour les zones « secteur amont », « port_de_plaisance » et « bassins » (Figure 2-39), en considérant des masses volumiques sèches moyennes de vase ($M_{vase\ moy}$) de 243 kg/m³, 64 kg/m³ et 511 kg/m³. Une analyse de sensibilité des estimations de C_{MES} à la vitesse de chute a également été réalisée (valeurs testées : 0.1 mm/s, 0.3 mm/s, 0.5 mm/s et 1 mm/s).

Les variations de volume sédimentaire entre les différents levés bathymétriques et les calculs de Q_{vase} et C_{MES} associés sont illustrés pour chaque zone sur les Figure 3-2 à Figure 3-4, dans le cas où une vitesse de chute de 0.1 mm/s est considérée.

Pour chaque zone et chaque vitesse de chute testée, les valeurs moyennes de Q_{vase} et C_{MES} sont calculées sur l'ensemble de la période (i.e. à partir des résultats obtenus pour chaque différentiel bathymétrique). Ces valeurs sont synthétisées dans le Tableau 3-2. Les estimations indiquées

entre parenthèses correspondent aux calculs directement réalisés sur le différentiel bathymétrique de février 2009 et janvier 2021.

En faisant l'hypothèse que le sédiment est peu floclé (i.e. vitesse de chute faible entre 0.1 et 0.3 mm/s), la concentration en MES serait en moyenne comprise entre 1 et 3 mg/l sur la zone du port de plaisance, entre 5 et 20 mg/l sur la zone des bassins, et entre 3 et 10 mg/l en raisonnant à l'échelle de l'ensemble du secteur amont. Ces ordres de grandeur sont cohérents avec les observations de turbidité réalisés en amont de l'estuaire du Trieux.

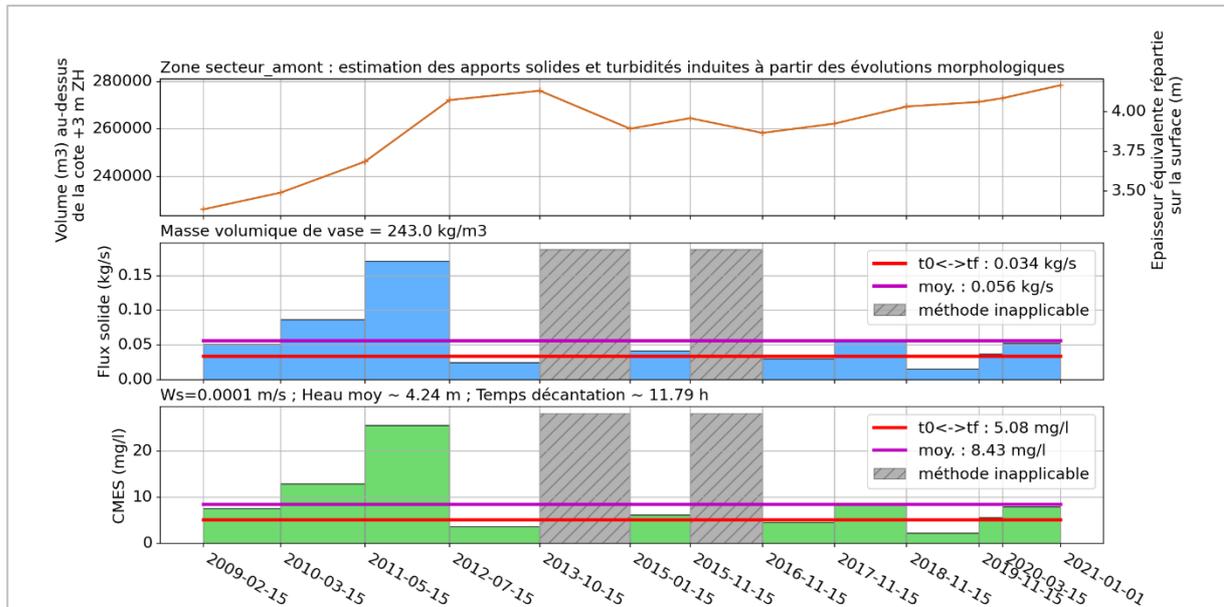


Figure 3-2 Estimation des flux solides (kg/s) et des concentrations de MES (mg/l) à partir des différentiels volumiques de sédiment sur la zone « secteur_amont » entre 2009 et 2021. Cas où $W_s=0.1$ mm/s.

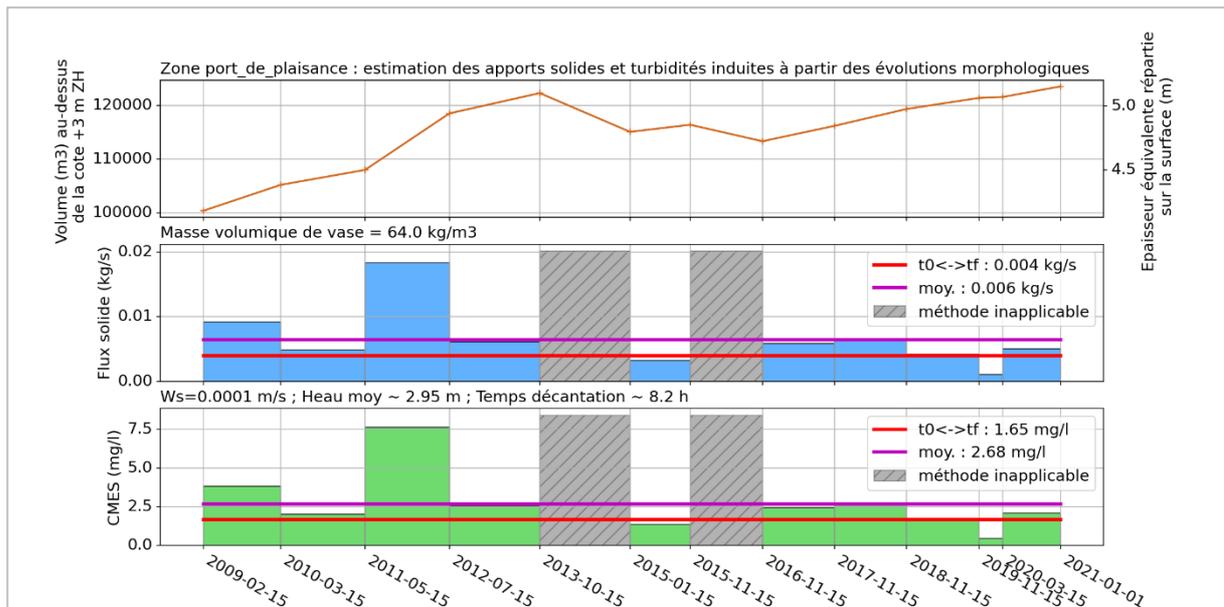


Figure 3-3 Estimation des flux solides (kg/s) et des concentrations de MES (mg/l) à partir des différentiels volumiques de sédiment sur la zone « port_de_plaisance » entre 2009 et 2021. Cas où $W_s=0.1$ mm/s.

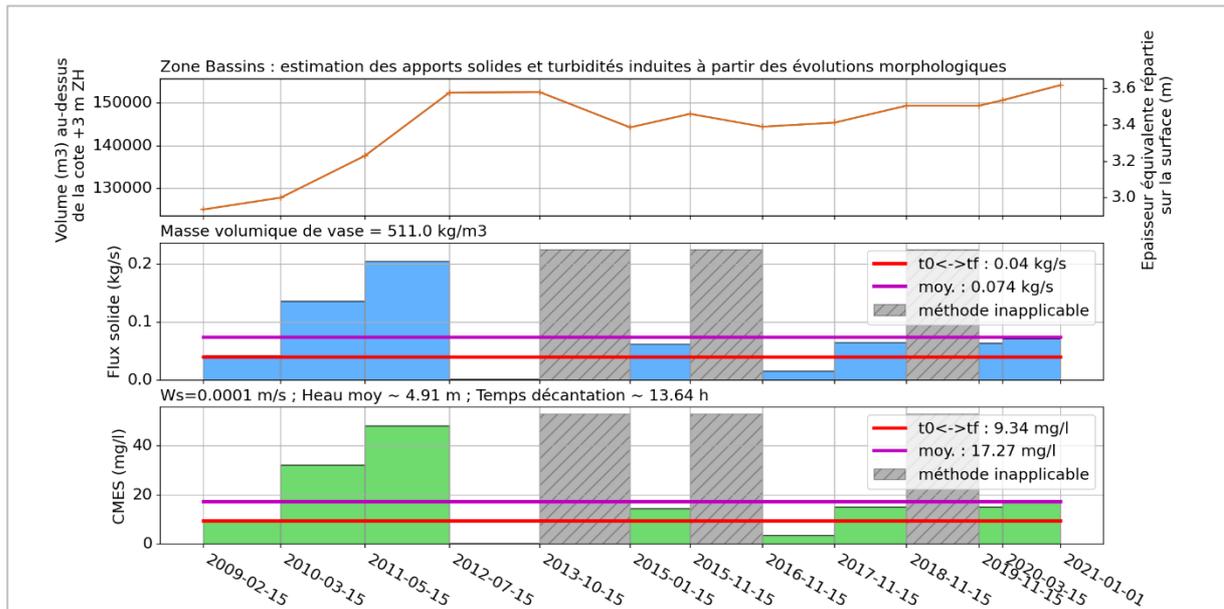


Figure 3-4 Estimation des flux solides (kg/s) et des concentrations de MES (mg/l) à partir des différentiels volumiques de sédiment sur la zone « Bassins » entre 2009 et 2021. Cas où $W_s=0.1$ mm/s.

Zone	$M_{vase\ moy}$ (kg/m ³)	Q_{vase} (kg/s)	C_{MES} (mg/l)			
			$W_s=0.1$ mm/s	$W_s=0.3$ mm/s	$W_s=0.5$ mm/s	$W_s=1$ mm/s
Secteur amont	243	0.056 (0.034)	8.43 (5.08)	2.81 (1.69)	1.69 (1.02)	0.84 (0.51)
Port de plaisance	64	0.006 (0.004)	2.68 (1.65)	0.89 (0.55)	0.54 (0.33)	0.27 (0.17)
Bassins	511	0.074 (0.04)	17.27 (9.34)	5.76 (3.11)	3.45 (1.87)	1.73 (0.93)

Tableau 3-2 Synthèse des résultats de flux solide (Q_{vase}) et de concentrations en MES (C_{MES}) obtenus en moyenne sur la période 2009-2021 sur les différentes zones et pour différentes vitesses de chute. Les estimations indiquées entre parenthèses correspondent aux calculs directement réalisés sur le différentiel bathymétrique entre février 2009 et janvier 2021.

4. MODELISATION : MISE EN PLACE

4.1 OBJECTIF

En phase 1 le travail de modélisation vise à décrire et comprendre le fonctionnement hydrodynamique et hydro-sédimentaire du site d'étude dans la configuration actuelle du port. Il est réalisé en deux étapes. Dans un premier temps on analyse sur des périodes courtes et dans des conditions météo-océaniques schématiques le mouvement des masses d'eau et sédimentaires dans le secteur portuaire et ses abords. Ces simulations sont qualifiées de scénarios courts dans la suite du texte. Dans un deuxième temps, les simulations portent sur une année complète, prenant en compte des conditions réalistes de marée, d'états de mer au large et de vent.

Ce chapitre présente les volets suivants :

- La construction et la mise en œuvre du modèle ;
- La définition des scénarios courts et longs ;

4.2 CONSTRUCTION DES MODELES

4.2.1 CODE DE CALCUL

La modélisation hydro-sédimentaire du secteur d'étude mobilise trois codes numériques système TELEMAC (©EDF-LNHE) :

- TELEMAC-2D qui calcule les niveaux d'eau et les courants ; L'utilisation d'un modèle 2DH est a fortiori indiquée sur la zone d'étude qui est intertidale compte tenu du marnage conséquent et donc d'un mélange efficace sur des tranches d'eau relativement faible.
- TOMAWAC pour la modélisation des états de mer et de leur propagation à partir du large vers le site d'étude, et prenant en compte les effets sur les vagues des champs de courant (circulation moyenne) et des niveaux calculés par TELEMAC-2D ;
- SYSIPHE qui simule la dynamique sédimentaire en intégrant les effets des courants et des états de mer. Il permet de traiter le transport de sables, en l'occurrence fins, et de particules fines (vases).

Les trois codes fonctionnent sur la même grille de calcul, ce qui évite les erreurs d'interpolation entre différents modèles et optimise les temps de calcul. L'interaction est optimale entre les différents modules et les paramètres hydrodynamiques plus précis pour le calcul hydro-sédimentaire. Le type de maillage (mailles triangulaires) est parfaitement adapté à ce type d'étude et permet d'affiner la résolution dans les zones d'intérêt.

4.2.2 SOURCES DE DONNEES

4.2.2.1 Données bathymétriques

Les modélisations numériques mises en place s'appuient sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) dont la résolution spatiale doit être en accord avec celle de la grille de calcul.

Plusieurs sources de données bathymétriques sont utilisées pour la construction du MNT :

- Le MNT HOMONIM du SHOM fournit une description complète de la bathymétrie de la Manche et du Golfe de Gascogne sur une grille de 100 m de résolution ;
- Les levés bathymétriques à haute-résolution réalisés sur le site par la CCI.

4.2.2.2 Données de niveau d'eau et de courant

Les variations spatio-temporelles du niveau d'eau et potentiellement des courants doivent être imposées en chaque point de la frontière maritime du domaine de calcul. Ils sont obtenus à partir d'atlas de composantes harmoniques de marée constitués des amplitudes et des phases pour chaque constituant. Deux bases de données ont été testées : PREVIMER (IFREMER) et FES2014 (LEGOS). Elles se distinguent par leur résolution spatiale et leur nombre de constituants. Après plusieurs tests, il ressort que la base de données FES2014 donne les meilleurs résultats.

FES2014 est la dernière version du modèle de marée FES (Finite Element Solution) développé en 2014-2016 (Carrere et al., 2016 et Lyard et al., 2016). C'est une version améliorée de l'atlas FES2012. Elle a été développée, implémentée et validée par le LEGOS, NOVELTIS et CLS, au cours d'un projet financé par le CNES.

Le niveau d'eau et les courants induits par la marée sont disponibles. 34 constituants harmoniques de la marée sont fournis sur une grille à $1/16^\circ$ de résolution, amplitude et phase pour chaque onde : 2N2, EPS2, J1, K1, K2, L2, La2, M2, M3, M4, M6, M8, Mf, MKS2, Mm, MN4, MS4, MSf, MSqm, Mtm, Mu2, N2, N4, Nu2, O1, P1, Q1, R2, S1, S2, S4, Sa, Ssa, T2.

4.2.2.3 La campagne de mesure du courant et des états de mer

Pour les besoins de cette étude, l'Université de Bretagne Sud a réalisé des mesures de courant et d'agitation dans la zone d'étude, du 21 octobre au 5 novembre 2021. Le dispositif se compose d'un ADCP (Teledyne RDI Workhorse Sentinel ADCP, 1200 kHz) permettant de mesurer le courant, le niveau de la surface libre et l'agitation, et de 3 capteurs de pression (NKE Nortek) permettant de déduire les paramètres moyens de vagues (hauteur significative et périodes moyenne/pic) ainsi que les niveaux d'eau. La position des instruments est indiquée sur la figure ci-après. L'ADCP, déployé sur le fond dans une configuration de mesure vers le haut, se situe à environ 1.5 km au large du môle (à une cote d'environ +2.9 m CM), et fournit un profil de courant moyen toutes les 20 minutes avec des cellules verticales de 0.25 m de résolution. Seules les données de courant ont été exploitées (moyennées sur la verticale), les niveaux et paramètres moyens des vagues étant déduits des mesures de pression réalisées à partir d'un capteur fixé près du fond sur le même support que l'ADCP. Les deux autres capteurs de pression ont été déployés dans l'avant-port (dans la zone d'entretien, à une cote de +5 m CM) et sur l'estran au droit de la plage du Valais (à une cote de +8.3 m CM). Dans les deux cas, le capteur de pression était fixé à une tige enfoncée dans le fond sédimentaire.

Les mesures de pression ont été réalisées en continu à une fréquence d'échantillonnage de 2 Hz. Afin de calculer les paramètres moyens de vagues, les séries temporelles de pression ont été divisées en *bursts* d'une heure, et ont été corrigées de la pression atmosphérique et de la marée. Les données de pression ont été converties en hauteurs d'eau en considérant une hypothèse hydrostatique. Pour chaque *burst* de mesure, les spectres de densité de puissance (*Power Spectral Density* ou PSD) associés aux différentes fréquences ont été calculés en appliquant une transformée de Fourier et en considérant un fenêtrage de Hann (10 sous-blocs avec un chevauchement de 50%). Enfin, les spectres d'élévation ont été reconstruits en appliquant la méthode TFM (*Transfer Function Method*; Bishop et Donelan, 1987) basée sur la théorie linéaire des vagues (Airy, 1841). En effet, du fait de l'accélération verticale du fluide liée aux vitesses orbitales des vagues, la pression n'est pas hydrostatique mais subit une atténuation

exponentielle. Cette atténuation est corrigée grâce à une fonction de transfert faisant intervenir le nombre d'onde (déterminée en résolvant la relation de dispersion linéaire issue de la théorie d'Airy selon une approximation polynomiale ; Voulgaris, 1992) et la hauteur d'eau. Afin d'éliminer l'amplification du bruit dans les hautes fréquences d'une part, et la signature des ondes infra-gravitaires non reproduites par le modèle d'autre part, les paramètres moyens ont été calculés en intégrant les spectres d'élévation entre 2 fréquences de coupure fixées à 0.05 et 0.4 Hz.



Figure 4-1. Localisation des instruments de mesures lors de la campagne

4.2.2.4 La base de données météorologiques CFSR

Les statistiques d'intensité et de direction du vent sont calculées à partir des données atmosphériques produites par le NCEP (National Centers for Environmental Prediction) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA).

Depuis les années 1990, le centre NCEP a réalisé plusieurs réanalyses atmosphériques dont le but est de fournir sur plusieurs années et sur une grille régulière une description complète et détaillée des conditions atmosphériques mondiales, à l'aide d'un même modèle utilisant un système d'assimilation de données performant, alimenté par des données de forçage cohérentes et homogènes.

Depuis 2011, une nouvelle réanalyse couplée océan-atmosphère est disponible. NCEP-CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) est une base d'hindcast de données atmosphériques sur une période de 32 ans (1979 - 2010), une grille horizontale de 0.3° (~38 km), 5 niveaux de pression et un échantillonnage temporel d'une heure.

La base de données CFSR a été créée et réalisée comme un système global à haute résolution bénéficiant d'un couplage avec des modèles océanique, terrestre et glaciaire de façon à décrire les propriétés atmosphériques de la manière la plus réaliste.

La base de données fournit des paramètres météorologiques et océanographiques toutes les heures, dont le vent à 10 m, la température de surface de la mer, la température de l'air, l'humidité, les précipitations, l'épaisseur de glace...

4.2.2.5 La base de données d'états de mer HOMERE

HOMERE (Boudiere et al., 2013) est une base de données de rejeu d'états de mer, réalisée par l'IFREMER à l'aide du modèle WaveWatch3 (NOAA-IFREMER, version 4.09) dans le cadre du projet Energies Marines Renouvelables (EMR). Le modèle se base sur une grille non structurée couvrant la zone Manche - Golfe de Gascogne dont la résolution spatiale variable atteint environ 250 m en zone côtière. Le modèle est forcé par les champs de vent horaires NCEP-CFSR (NOAA) et prend en compte les variations temporelles des niveaux d'eau et des courants de marée (issus de la base d'harmoniques PREVIMER) ayant une influence significative sur la propagation des états de mer en zone littorale. La base de données couvre la période 1994 à avril 2020 (26 années). En chaque point de la grille, plusieurs paramètres synthétiques sont disponibles avec une résolution horaire, dont la hauteur significative (H_s), les périodes pic (T_p) et moyenne (T_{m02}), les directions pic (Dir_p) et moyenne (Dir_m)... Les spectres d'états de mer 1D (fréquence) et 2D (fréquence/direction) sont également disponibles sur une grille à haute-résolution.

Pour les périodes postérieures à 2019, notamment la période de validation correspondant à la période de mesure en octobre 2021, la base de données HOMERE est complétée par les résultats du modèle MARC WaveWatch III du LOPS sur la grille NORGAS-UG. Bien que certains paramétrages puissent être différents, le modèle MARC est proche du modèle HOMERE : grille identique, forçage par les vents CFSR, prise en compte des variations de niveaux et de courants

4.2.2.6 La base de données hydrométrique HydroPortail

L'HydroPortail est la nouvelle application d'accès aux données hydrométriques, ainsi qu'aux données météorologiques du réseau de mesures des Services de Prévision des Crues, qui a remplacé en janvier 2022 les interfaces d'accès à la Banque HYDRO.

Les données de débit du Gouët sont disponibles à la station hydrométrique Ploufragan, localisé en aval du barrage de Saint-Barthélémy, depuis 1999. Ces données de débit sont appliquées à la frontière fluviale du domaine.

4.2.3 MAILLAGES

Le modèle s'étend en amont jusqu'au pont de Pierre et la frontière maritime s'étend au large à plusieurs dizaines de kilomètres du site d'études.

Pour les simulations courtes (1 à 2 marées), la résolution du modèle peut atteindre quelques kilomètres au large et s'affine au fur et à mesure qu'on s'approche de la zone d'étude pour atteindre une résolution de 5 m dans les zones de l'Avant-port et de la zone de dépôts de sédiments. Le maillage est nommé maillage 1 et est composé de 31 030 nœuds.

Pour les simulations longues (1 an), les temps de calcul peuvent être importants et il est nécessaire des d'optimiser le rapport « précisions des résultats » par rapport au « temps de calcul ». Le maillage est optimisé, notamment en augmentant la taille des mailles afin de permettre la simulation de périodes d'une durée couvrant la saison de dragage. Par exemple dans l'avant-port, la taille des mailles est de 12 m (au lieu de 5m). 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. Ce nouveau maillage est nommé maillage 2 et est composé de 15 365 nœuds.

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).

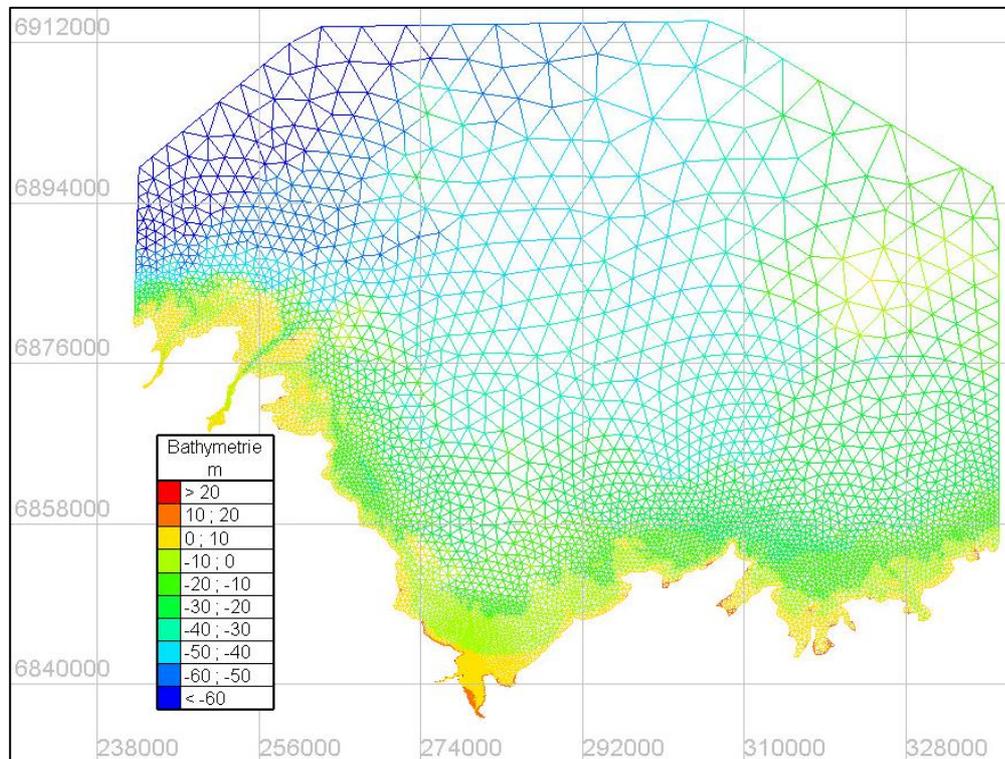


Figure 4-2. Maillage et bathymétrie du modèle : emprise globale

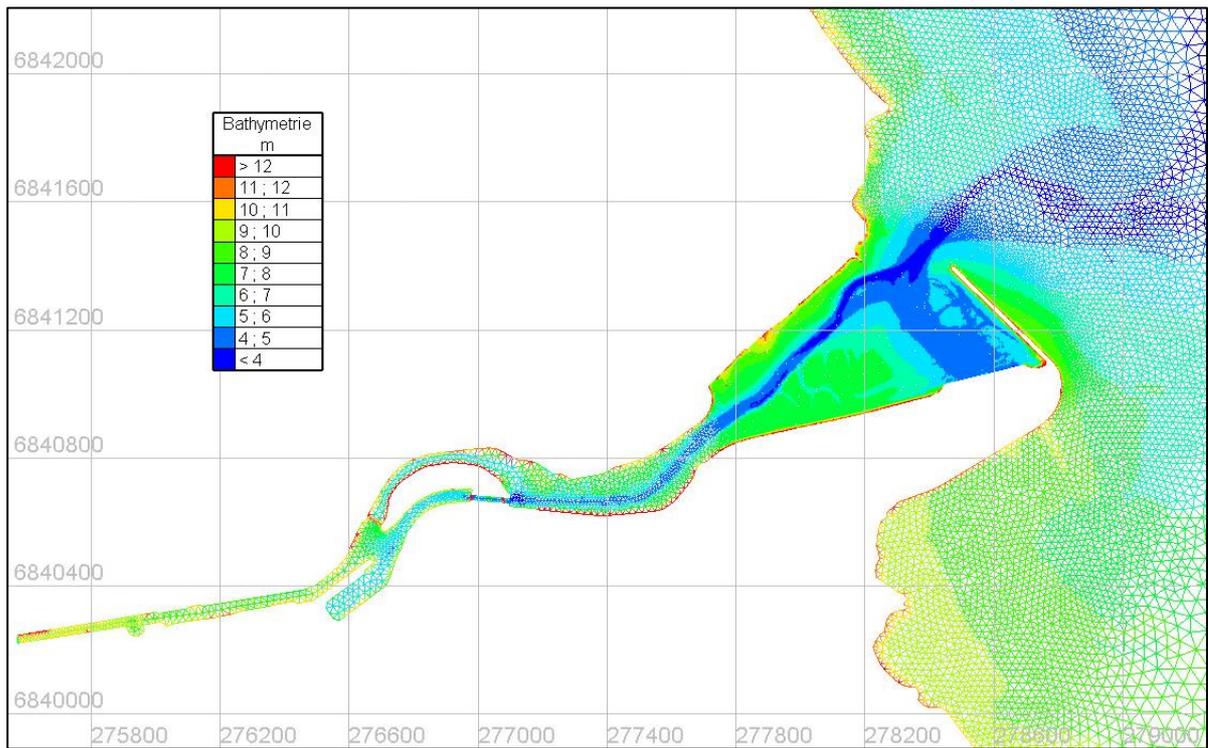


Figure 4-3. Maillage et bathymétrie du modèle pour les simulations courtes (maillage 1) : zoom sur la zone d'étude

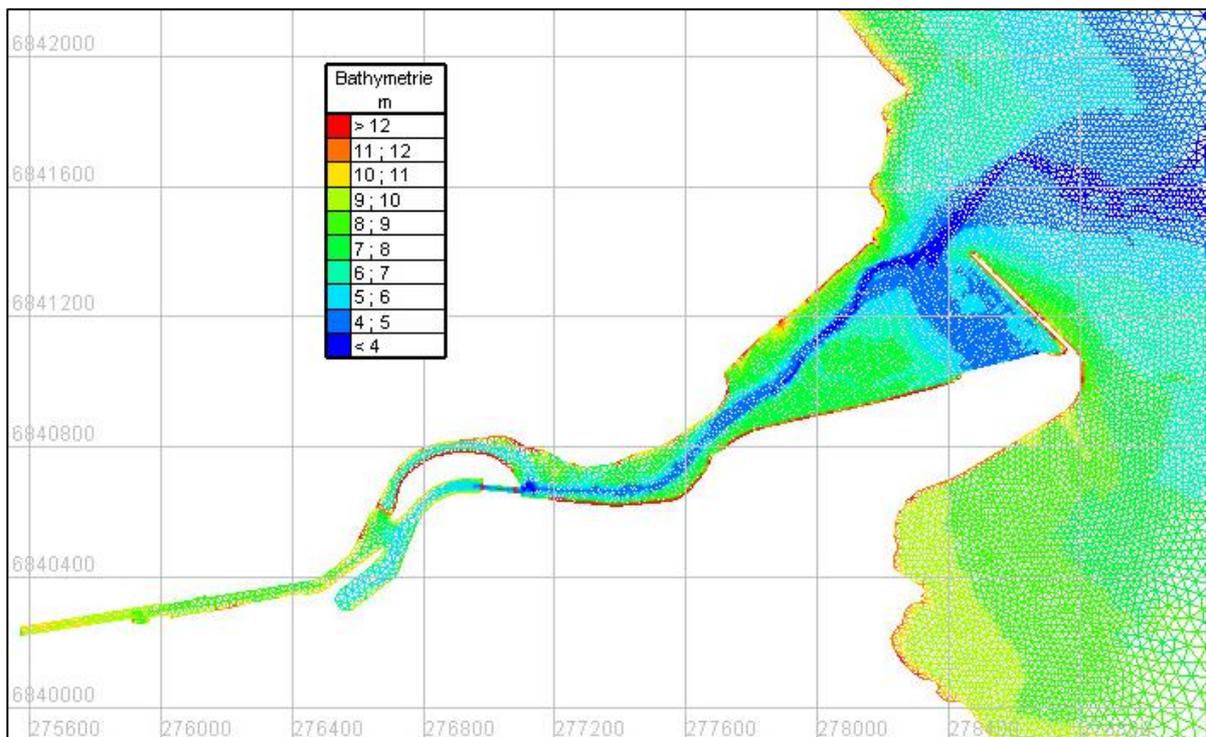


Figure 4-4. Maillage et bathymétrie du modèle pour les simulations longues (maillage 2) : zoom sur la zone d'étude

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 à partir sont extraits des bases de données HOMERE ou MARC NORGAS-UG (interpolations spatio-temporelles) ; à partir de ces paramètres synthétiques, des spectres paramétriques (JONSWAP) sont reconstitués et imposés en chaque point de la frontière maritime du modèle et à chaque pas de temps (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.

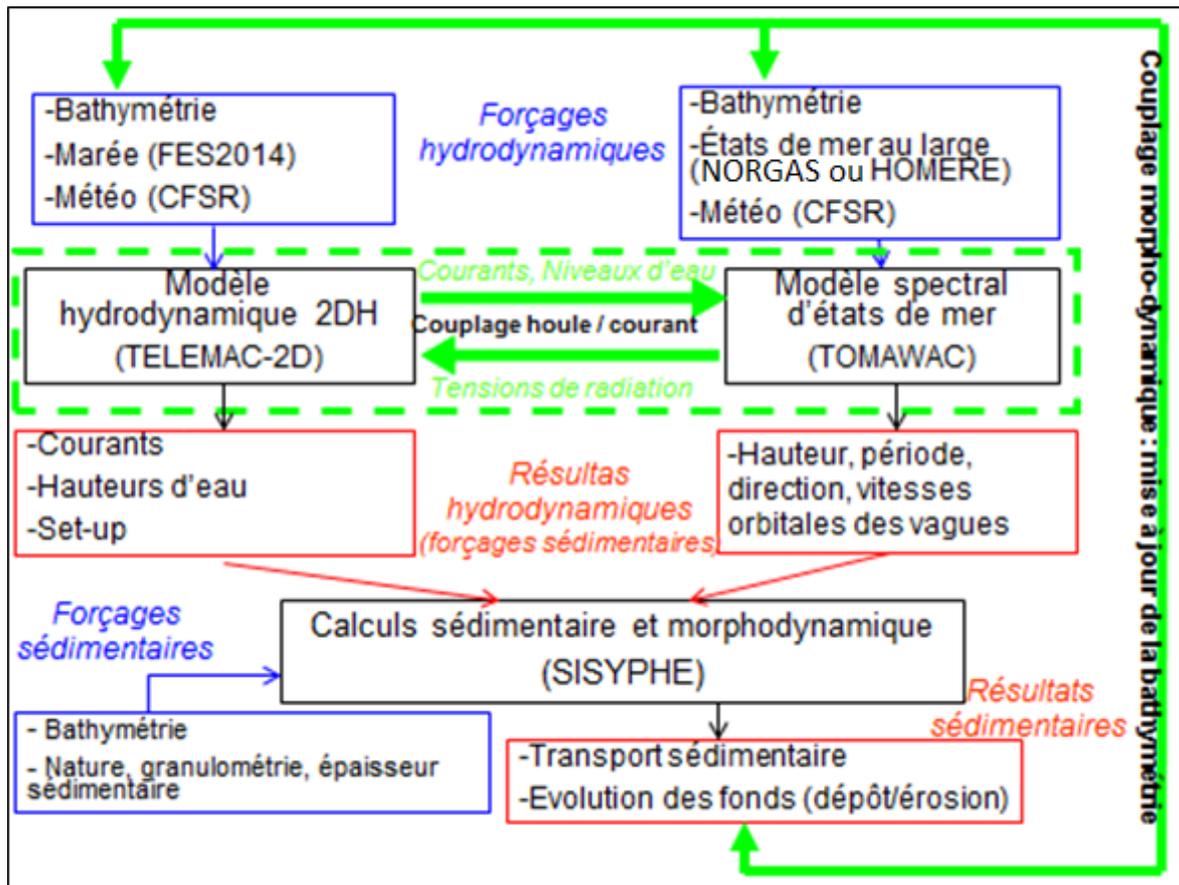


Figure 4-5 Schéma de principe du système de modélisation, illustrant les couplages (en vert) entre les différents modèles (en noir), les données nécessaires à leur fonctionnement (en bleu) et les résultats produits (en rouge).

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). Les données de l'ADCP ont été intégrées sur la verticale afin de pouvoir comparer de manière consistante les mesures avec un modèle hydrodynamique 2DH. 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.

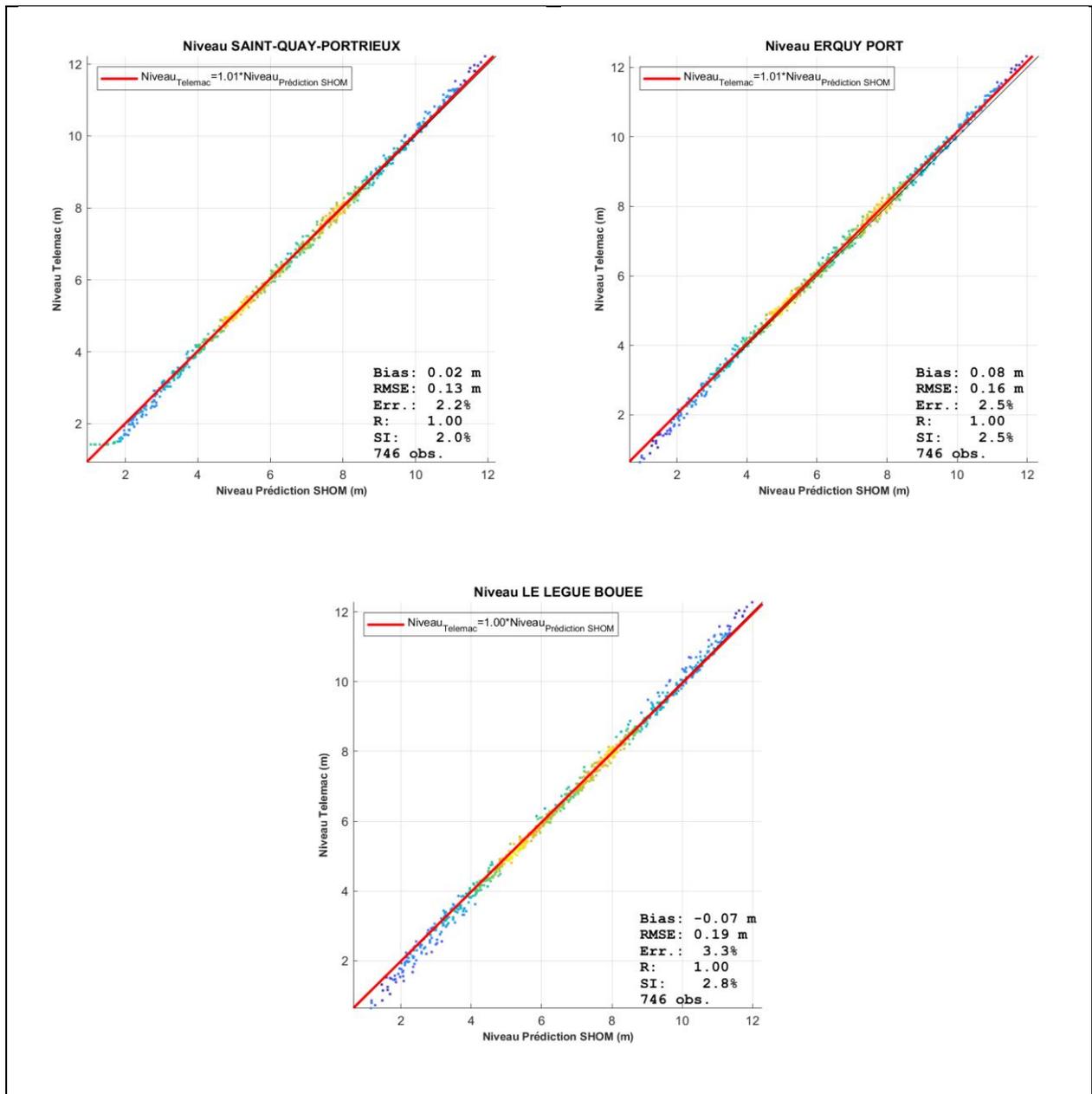


Figure 4-6. Comparaison des niveaux d'eau prédits par le SHOM et par le modèle en 3 ports. La couleur renseigne sur la densité des points.

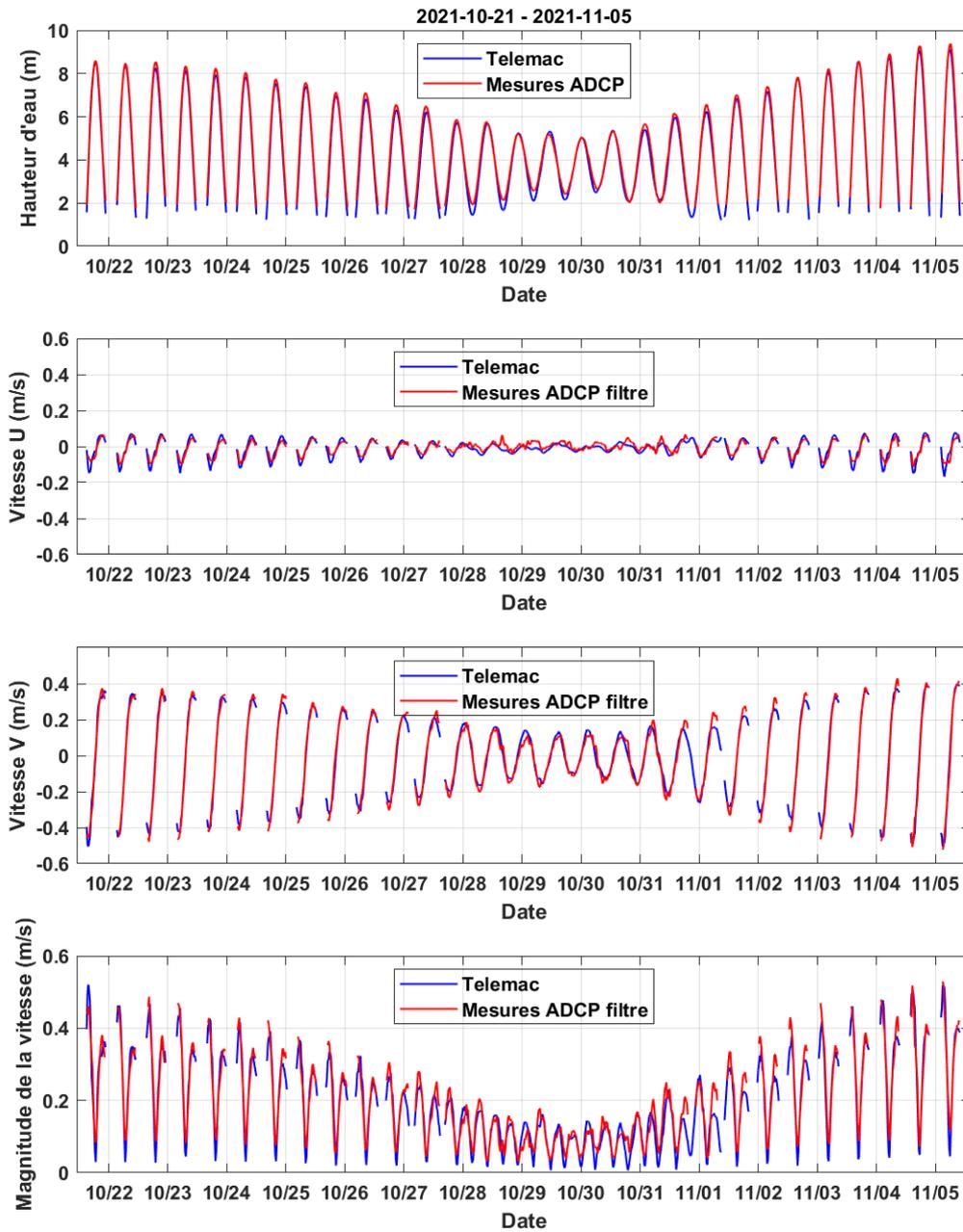


Figure 4-7. Comparaison modèle-mesures pendant la campagne de mesures au point ADCP.

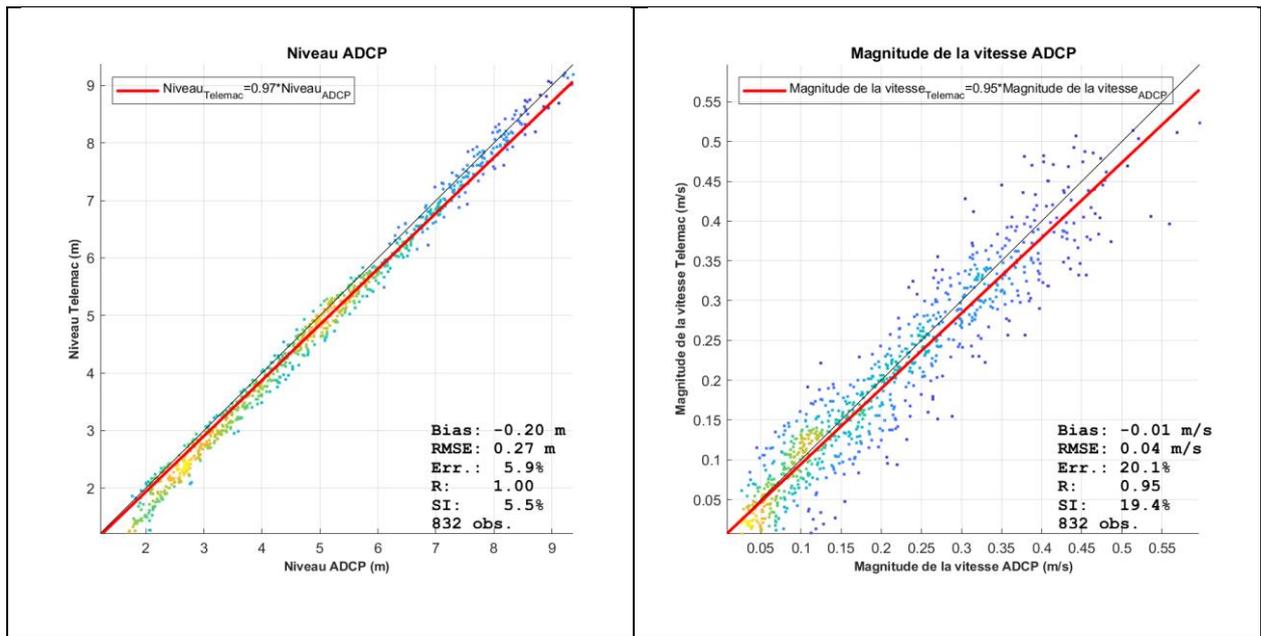


Figure 4-8. Comparaison modèle-mesures pendant la campagne de mesures au point ADCP : indicateurs statistiques. La couleur renseigne sur la densité des points.

4.3.2.2 Etats de Mer

Les hauteurs significatives et la période des états de mer (H_s) mesurées et prédites par le modèle sont juxtaposées sur les figures ci-dessous. T_{moy} (T_{m0-1}) a été choisie pour présenter la période car elle est moins sensible (que T_{m02} par exemple) à la fréquence de coupure des instruments de mesures (fréquence de coupure haute à 0.4 Hz lors du traitement des données du capteur de pression)

On démontre ainsi la capacité du modèle à reproduire avec justesse les états de mer en fonction de la marée et de la position dans la baie et le port. On peut toutefois observer une sous-estimation de la période dans l'avant-port. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le modèle TOMAWAC ne tient pas compte de la diffraction : les vagues venant du large (avec une période plus grande que la mer de vent) pourraient se propager plus difficilement dans le modèle vers cette localisation.

Tableau 4-1 Comparaison statistique du modèle d'états de mer et des mesures.

Hs				
Variable	RMSE	Biais	Coefficient de régression	Nombre d'observation
Localisation				
ADCP	<0.1 m	-0.0 m	0.92	24
Avant-Port	<0.1 m	-0.0 m	0.94	34
Valais	<0.1 m	-0.0 m	0.55	12
Période T_{moy}				
Variable	RMSE	Biais	Coefficient de régression	Nombre d'observation
Localisation				
ADCP	0.9 s	-0.4 s	0.73	24
Avant-Port	2.9 s	- 2.7 s	-0.15	34
Valais	1.4 s	1.1 s	0.45	12

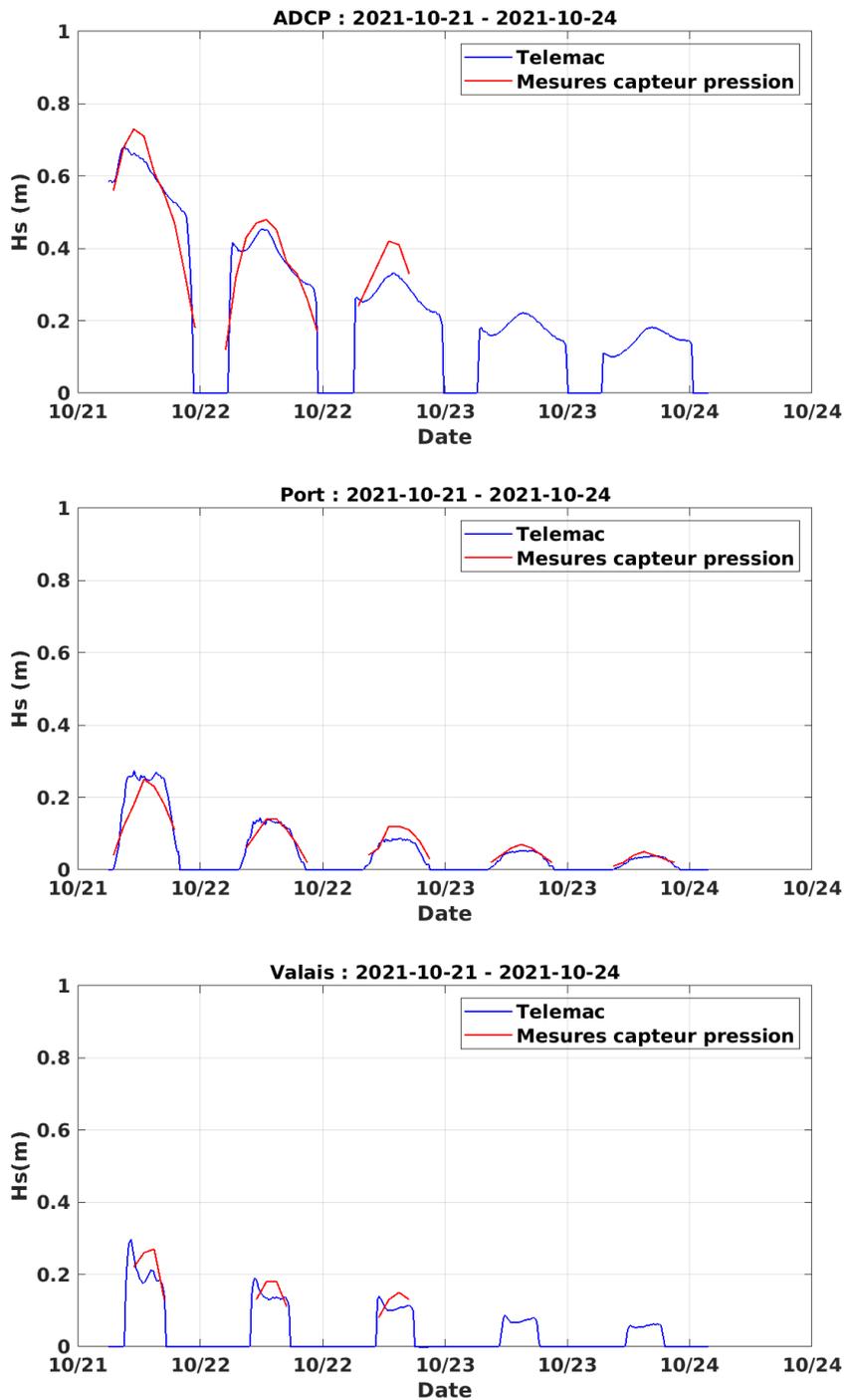


Figure 4-9 Comparaison modèle-mesures des Hs aux 3 points instrumentés d'un capteur de pression

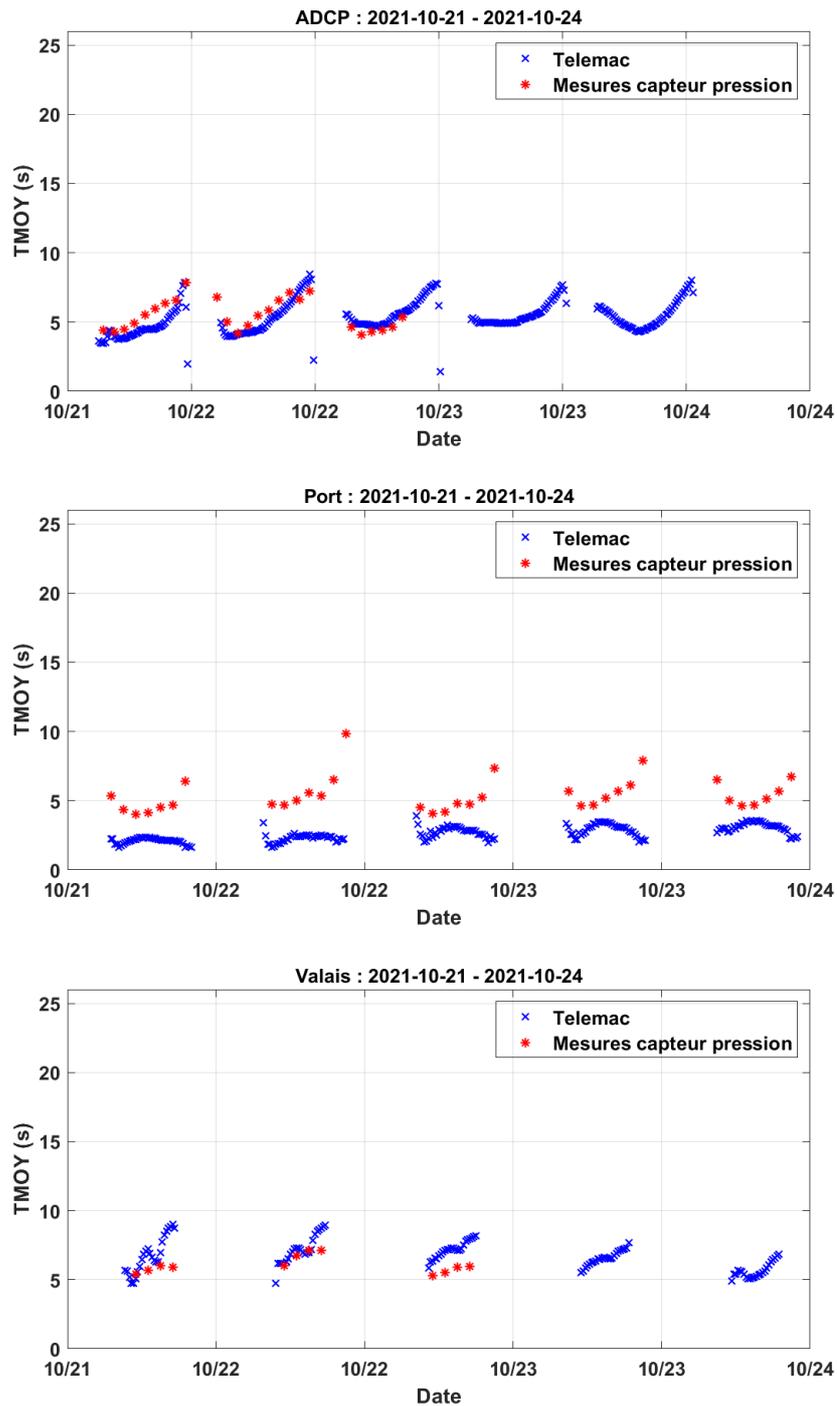


Figure 4-10 Comparaison modèle-mesures de la période moyenne (T_{m0-1}) aux 3 points instrumentés d'un capteur de pression

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 μm . 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 μm , 150 μm et 175 μm) 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/m², valeur standard pour des sédiments fins non consolidés ;
- Contrainte critique de dépôt : 0.1 N/m².

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 4-11).

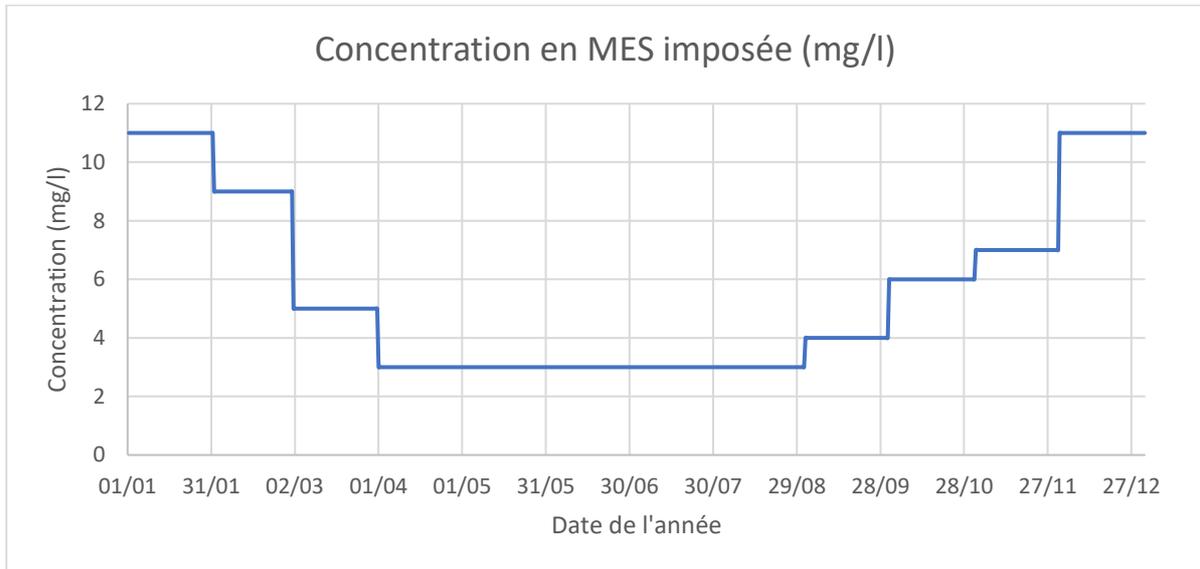


Figure 4-11 Concentration moyenne mensuelle au large du Légué d'après les données satellitales MARC Ifremer).

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.

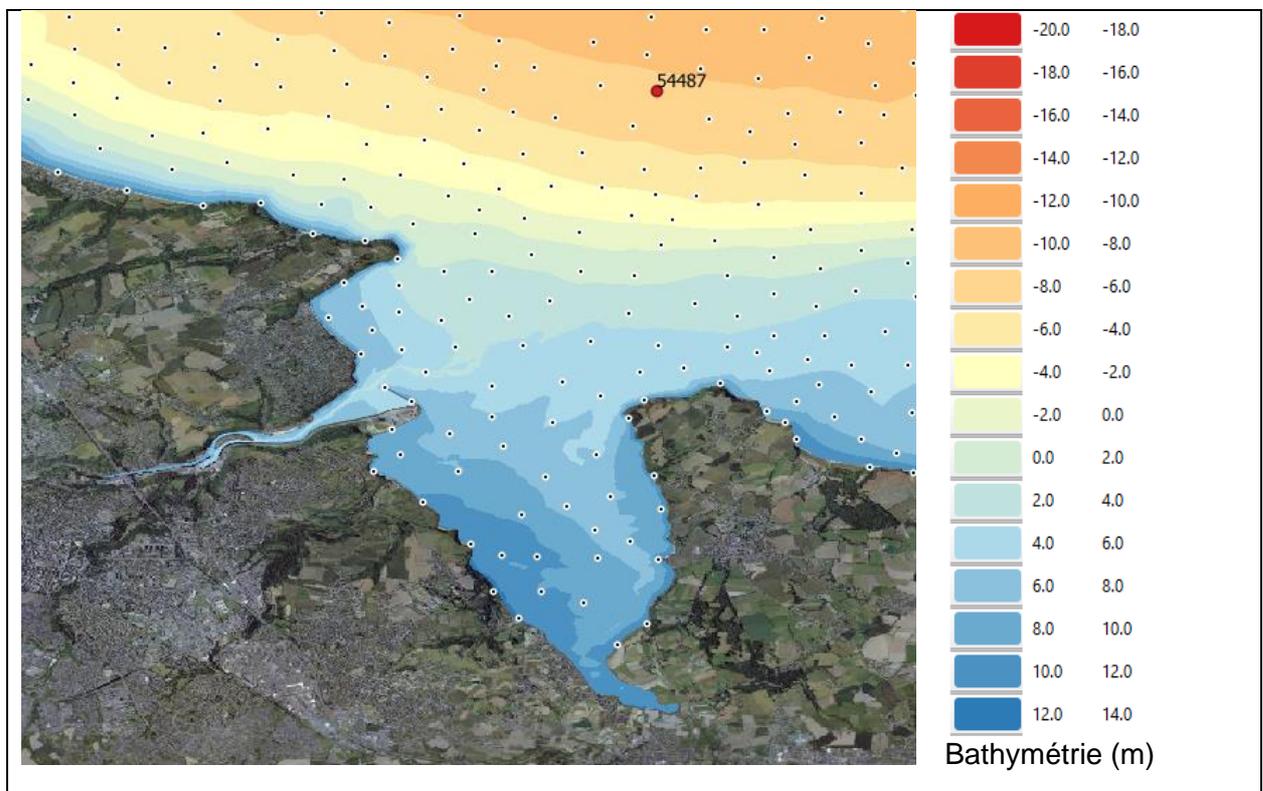


Figure 4-12 Localisation du point 54487 où sont étudiés les états de mer dans la base de données HOMERE. Les autres points noirs représentent la localisation de l'ensemble des points disponibles dans la base de données.

Les caractéristiques des états de mer au large du Légué sont représentées de manière graphique (cf. Figure 4-13) et sous forme de tableau (Tableau 4-2).

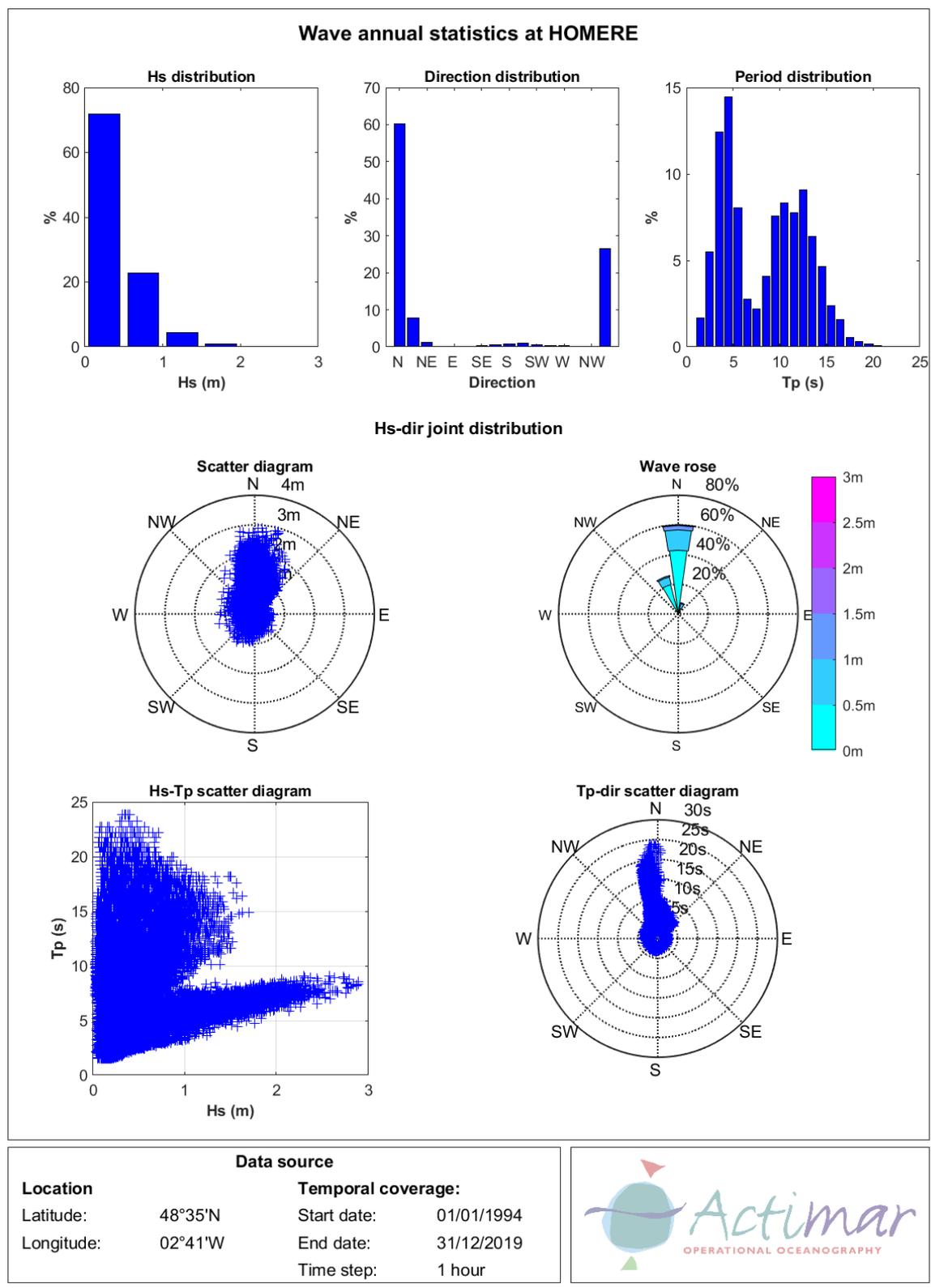


Figure 4-13 Synthèse des caractéristiques des états de mer au large du Port du Légué

Tableau 4-2 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
0.00 - 0.50	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
0.50 - 1.00	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
1.00 - 1.50	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
1.50 - 2.00	1.67	2.38	1.00	0.70	0.34	0.13			0.05	0.47	1.85	1.58	0.84
2.00 - 2.50	0.25	0.57	0.20	0.07	0.03	0.03				0.14	0.15	0.29	0.14
2.50 - 3.00	0.01	0.04	0.07			0.01						0.04	0.01
Minimum	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
Mean	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
Maximum	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
Std Dev	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
Quantiles													
99 <=	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
98 <=	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
95 <=	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
90 <=	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
80 <=	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
70 <=	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
50 <=	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
30 <=	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
10 <=	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).

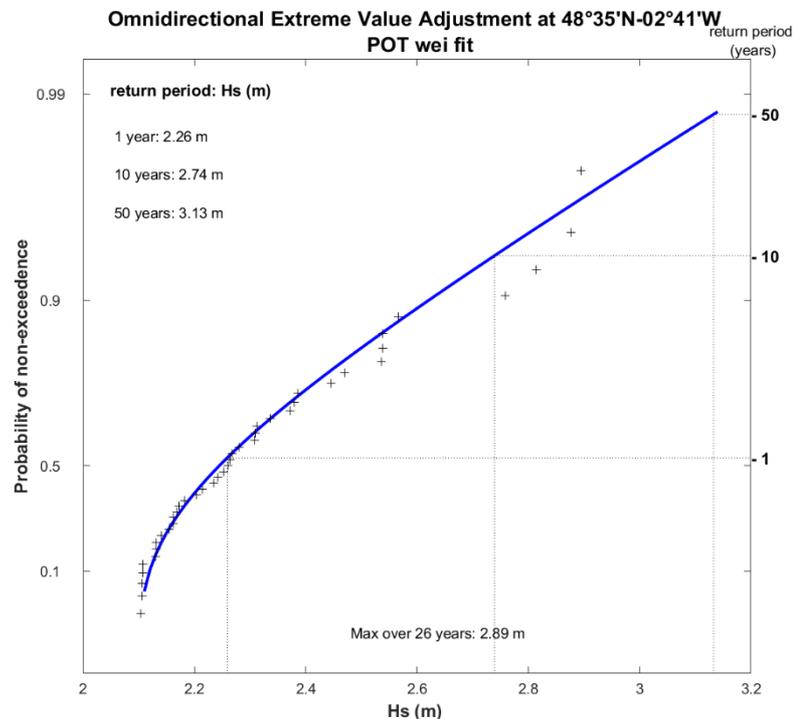


Figure 4-14 Hauteurs significatives extrêmes au point d'intérêt au large du port du Légué.

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 4-3 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) ;

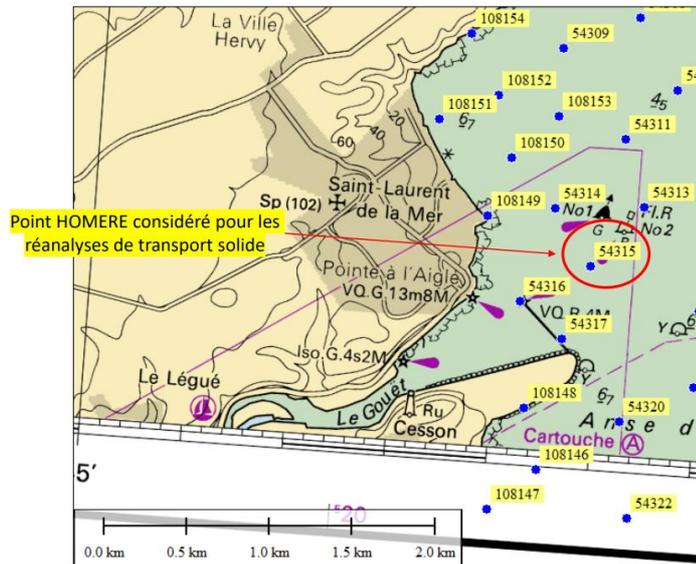


Figure 4-15 Localisation du point HOMERE étudié pour le calcul de transport solide entrant dans le port.

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

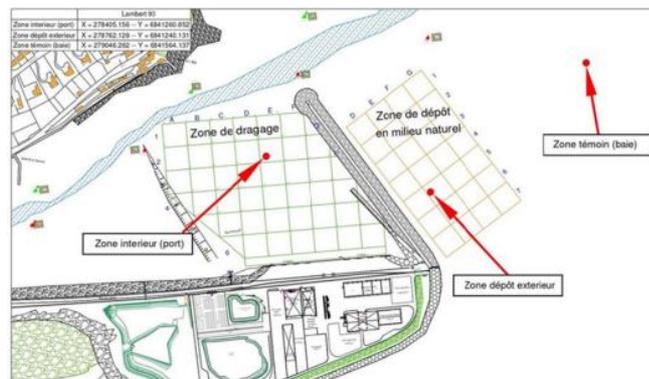


Figure 4-16 Localisation des analyses granulométriques disponibles réalisées par la CCI dans la zone d'étude.

Le Tableau 4-4 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 4-4 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	2827,6	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).

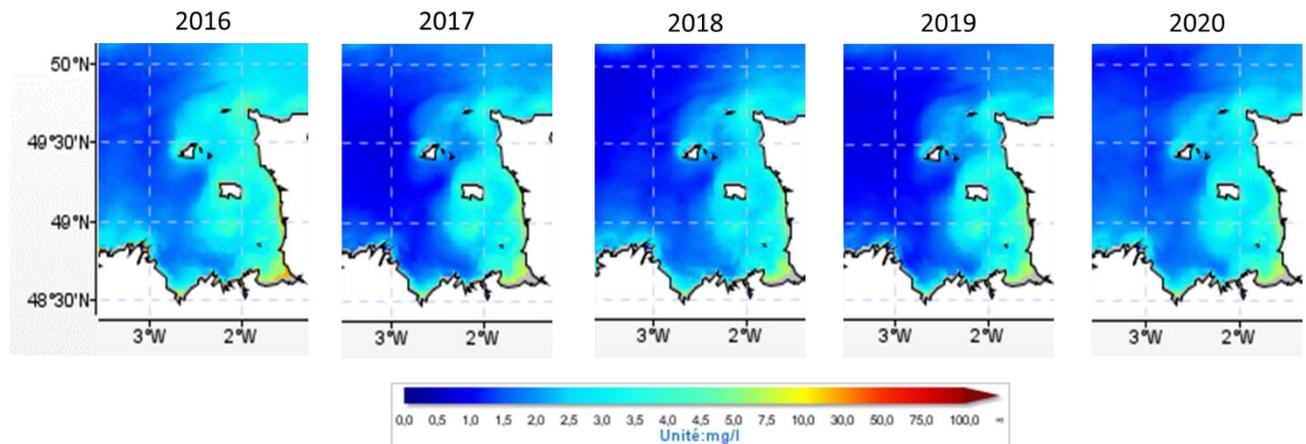


Figure 4-17. Concentration moyenne annuelle de MES dans le Golfe Normand Breton sur la période 2016-2020 (source MARC/Ifremer).

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).

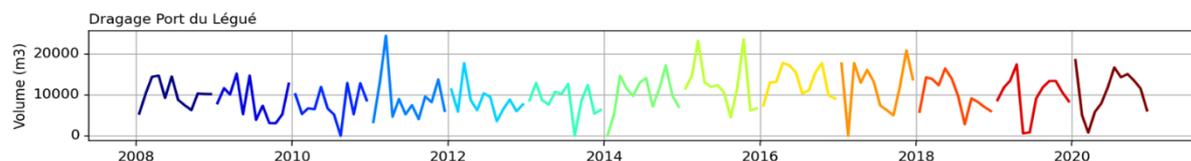


Figure 4-18. Volumes de sédiments dragués par mois dans l'avant-port du Légué. Les couleurs correspondent aux différentes années.

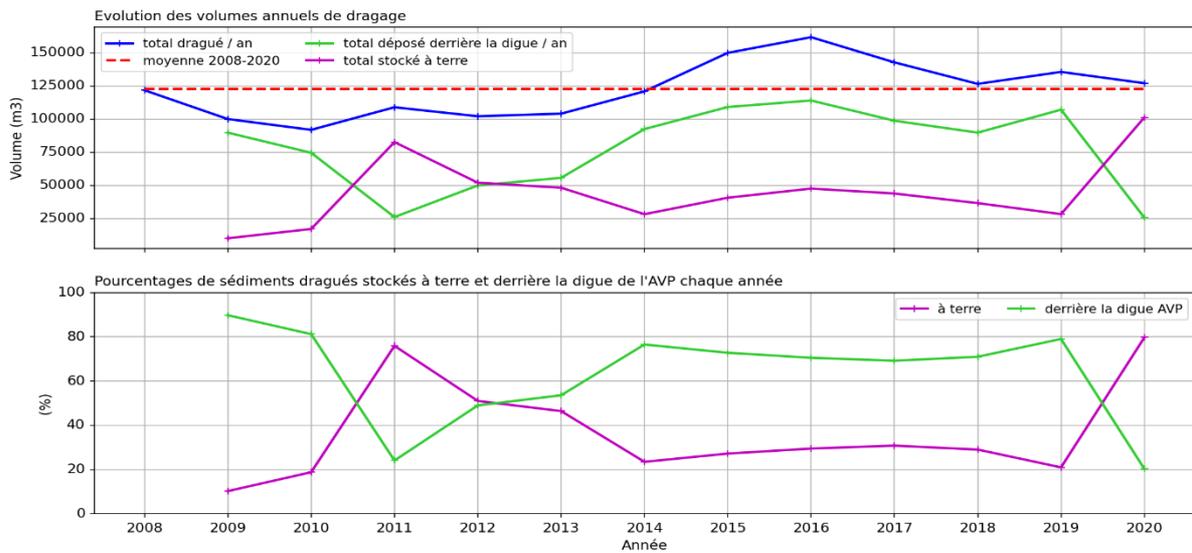


Figure 4-19. Volumes de sédiments dragués dans le port du Légué, déposés derrière la digue et stockés à terre par an.

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 4-20 année par année et moyennées sur les années disponibles.

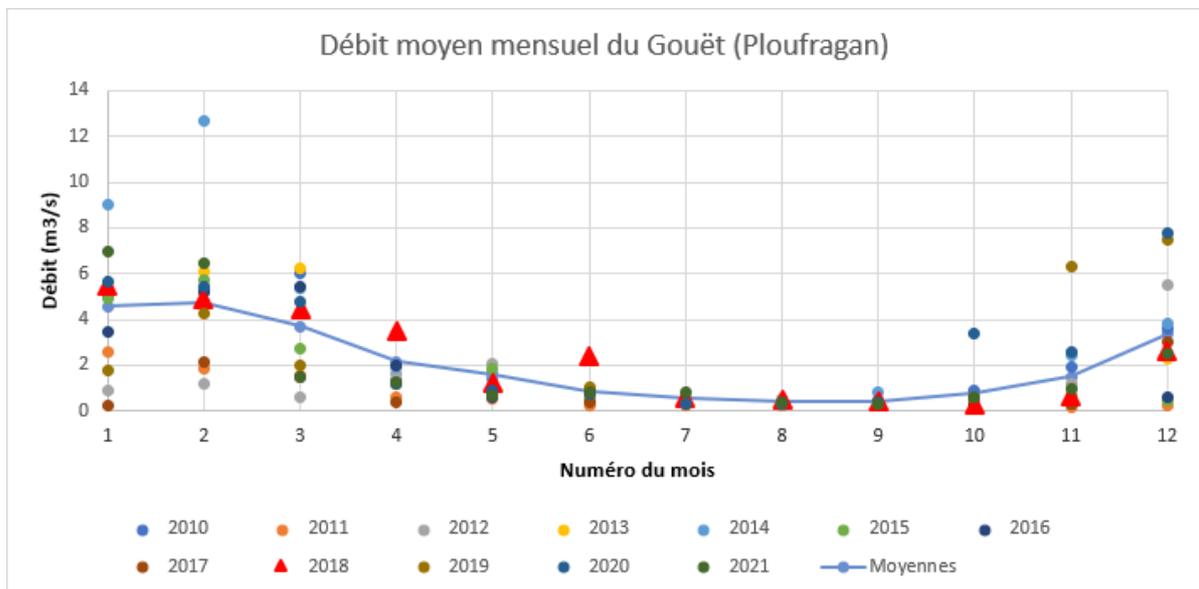


Figure 4-20. Débit du Gouët en aval du barrage de Saint Barthélémy

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 ne note pas de courants particulièrement intenses sur des temps courts). L'asymétrie des intensités de courant, en particulier les pics, est bien marquée : 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'événements 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 fort. 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.

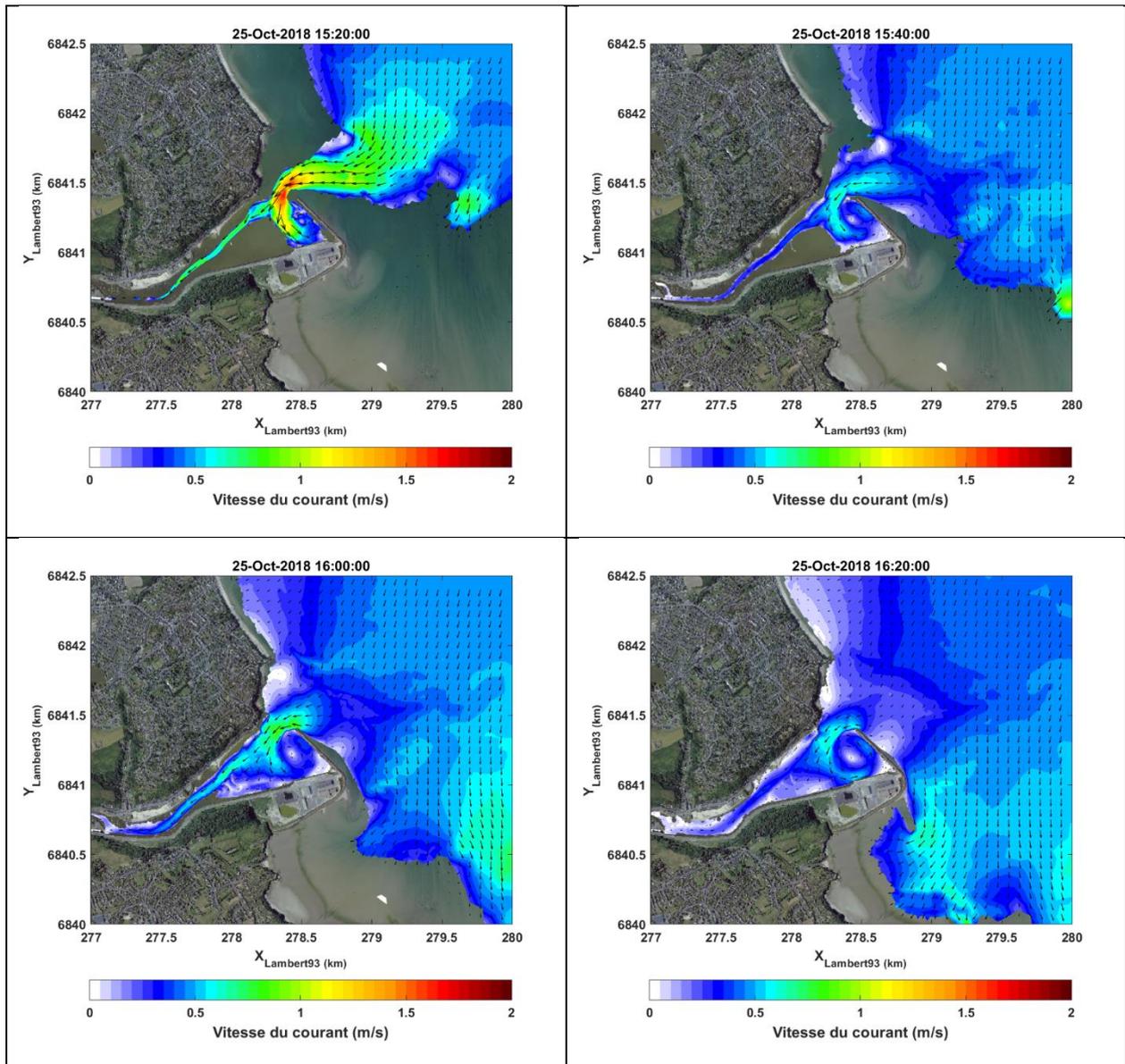


Figure 5-1 Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1.

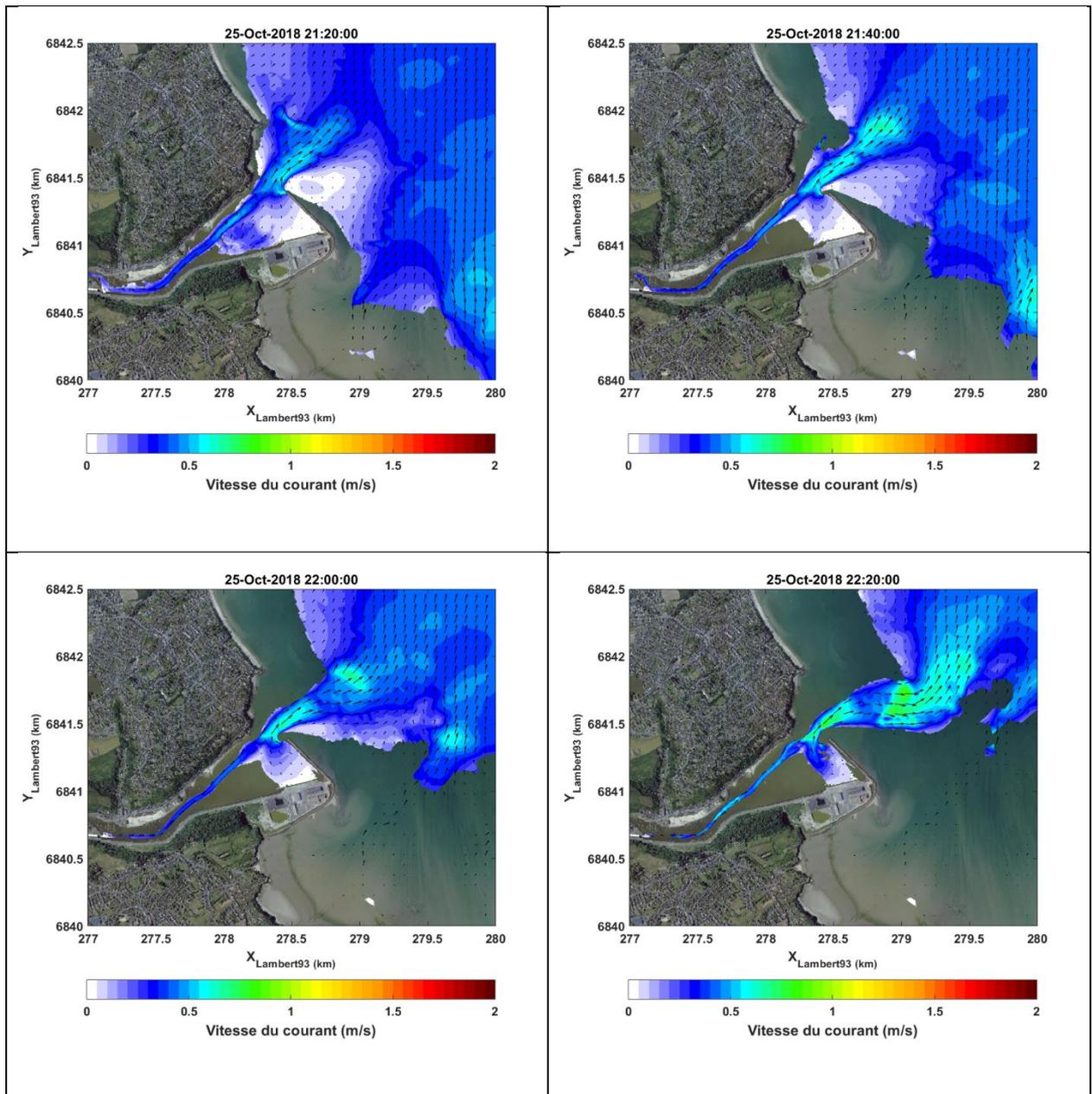


Figure 5-2 Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) - Scénario 1.

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

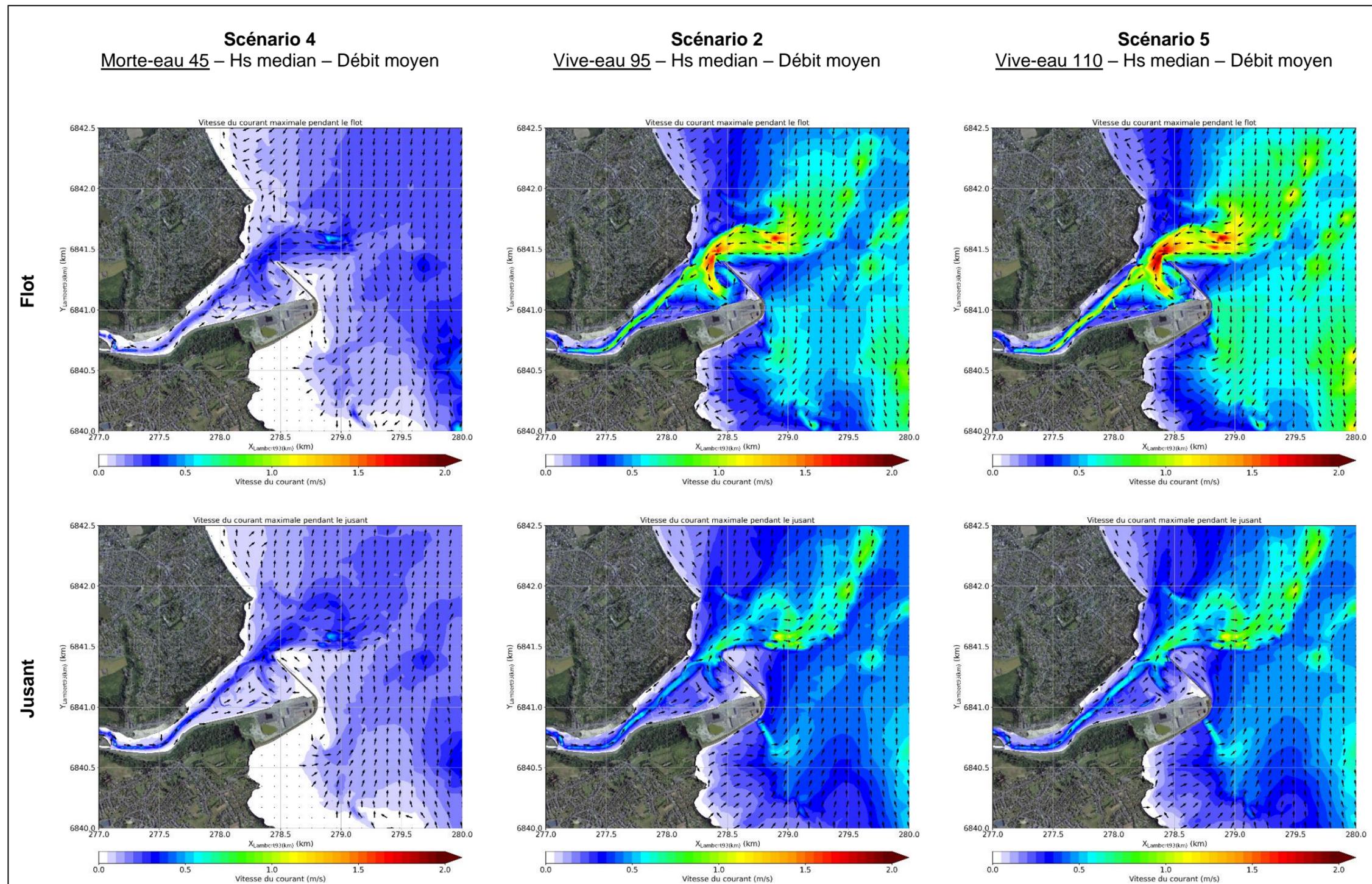


Figure 5-3. Cartographie des courants maximaux pendant la marée montante (haut) et la marée descendante (bas) pour les scénarios 2, 4, 5 : sensibilité des courants à l'intensité de la marée.

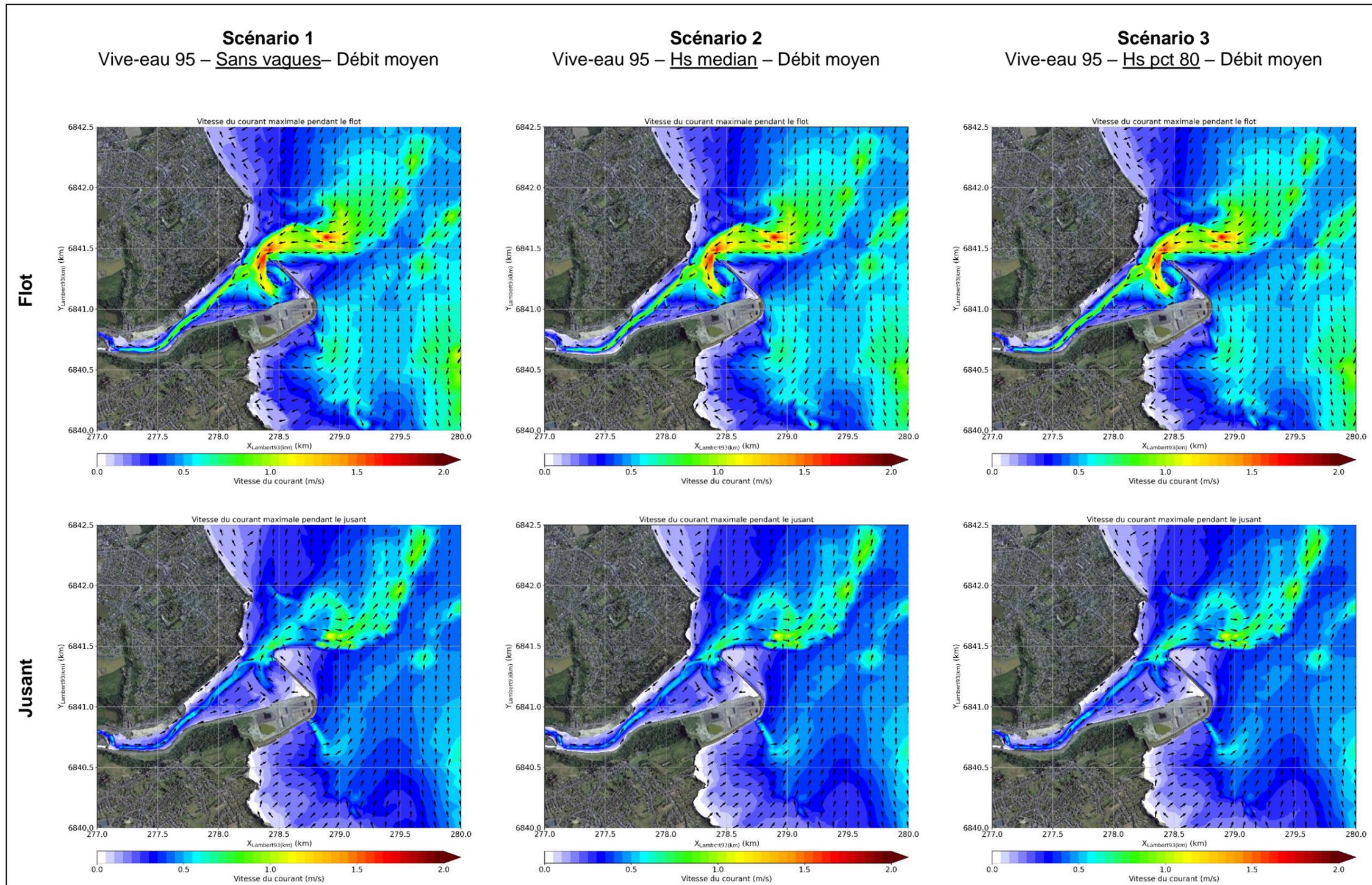


Figure 5-4. Cartographie des courants maximaux pendant la marée montante (haut) et la marée descendante (bas) pour les scénarios 1, 2 et 3 : sensibilité à l'intensité des vagues.

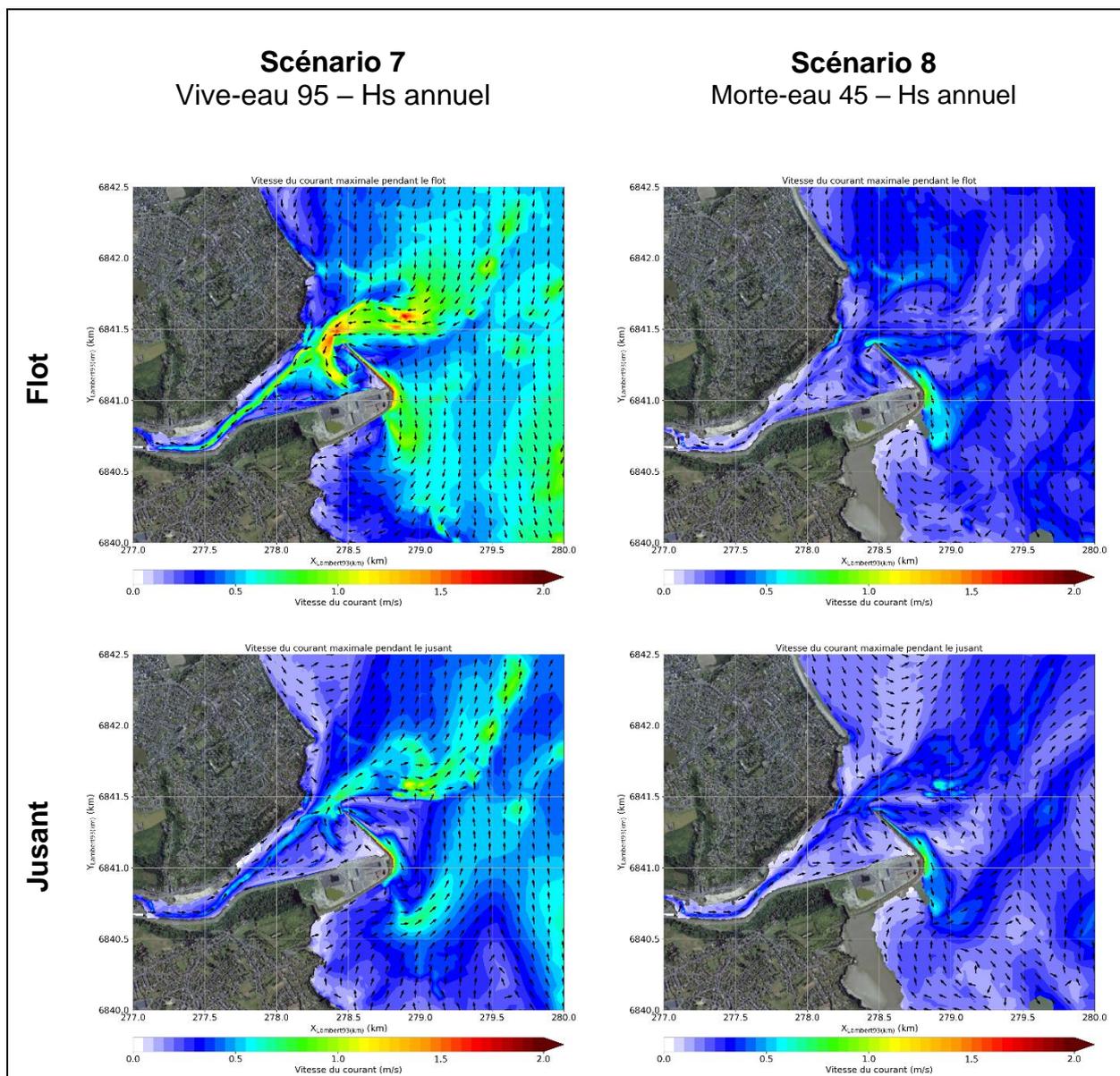


Figure 5-5 Cartographie des courants maximaux pendant la marée montante (haut) et la marée descendante (bas) pour les scénarios 7 et 8 avec un Hs annuel

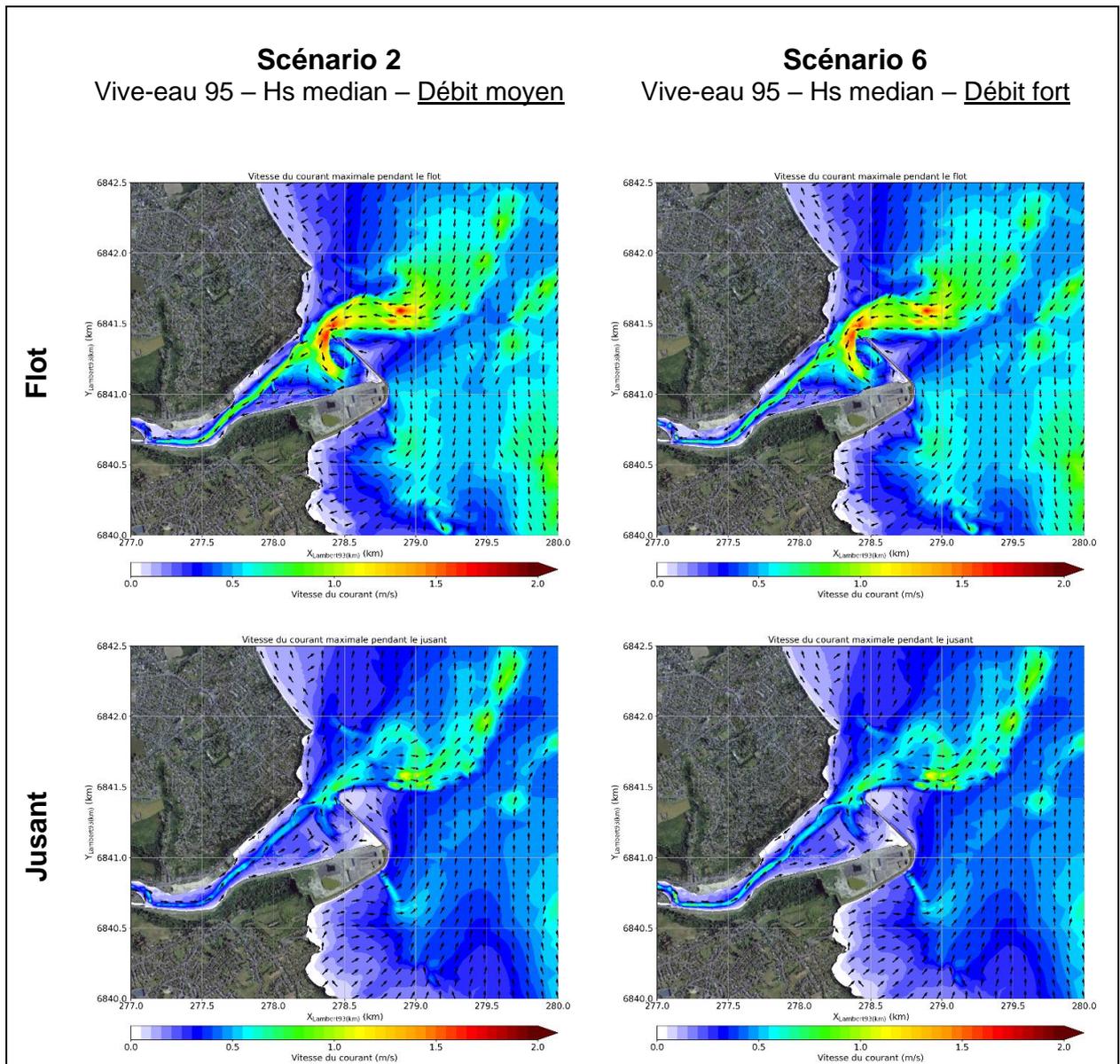


Figure 5-6 Cartographie des courants maximaux pendant la marée montante (haut) et la marée descendante (bas) pour les scénarios 2 et 6 : sensibilité à l'intensité du débit

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 apparaît 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. Il faut toutefois noter que le modèle TOMAWAC ne prend pas en compte la diffraction des vagues et donc que les hauteurs de vague à l'arrière de la digue de protection de l'avant-port sont probablement sous-estimées. Cette sous-estimation, qui entraîne une sous-estimation de la contrainte exercée sur le fond, a plutôt tendance sur-estimer les volumes de vases qui se déposent et à moins mobiliser les sables qui arrivent dans la zone de dragage.

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).

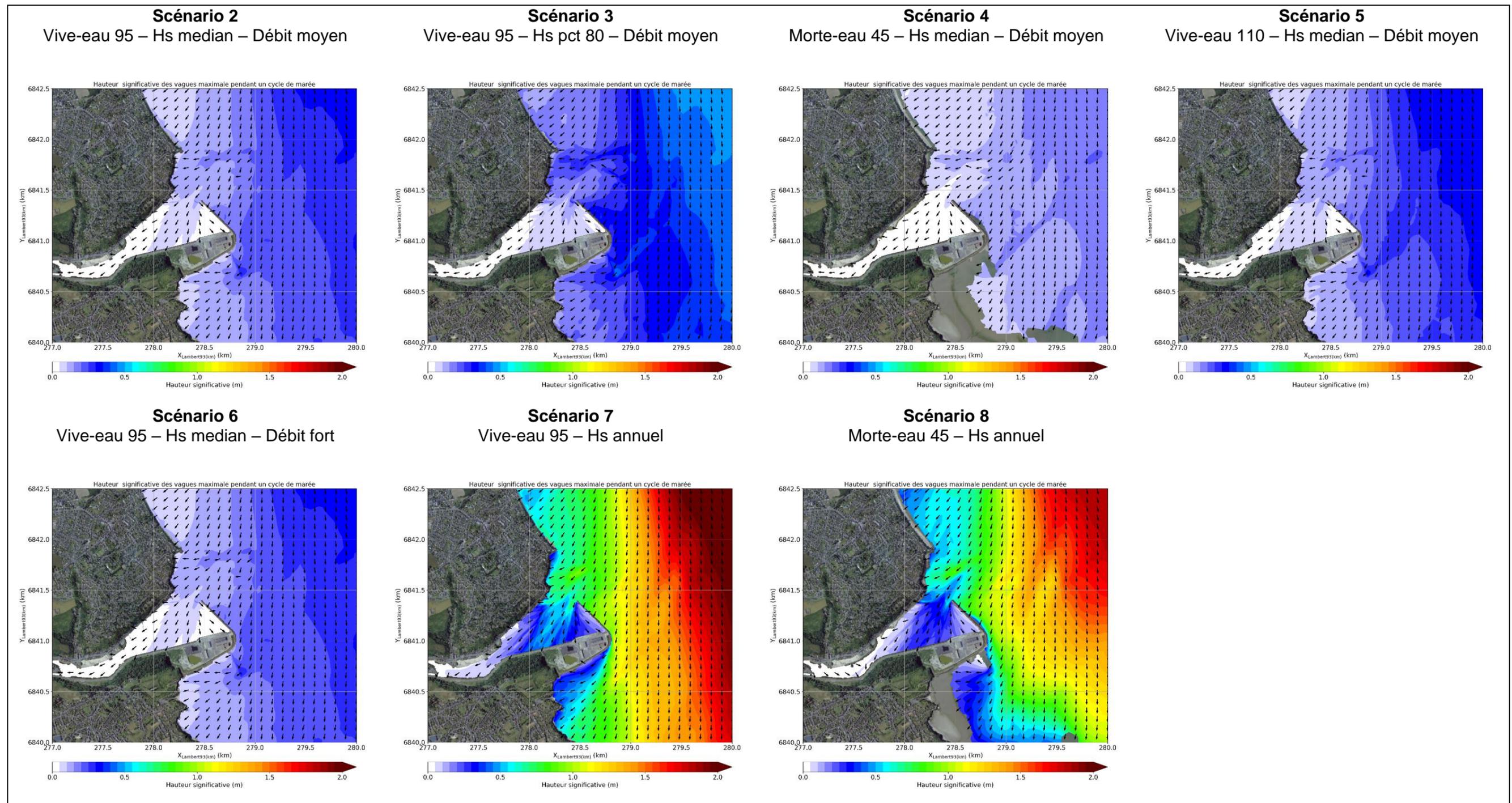


Figure 5-7 Cartographie des hauteurs significatives maximales pendant un cycle de marée pour les différents scénarios. Les flèches indiquent la direction des vagues au moment où le Hs maximal est atteint.

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.

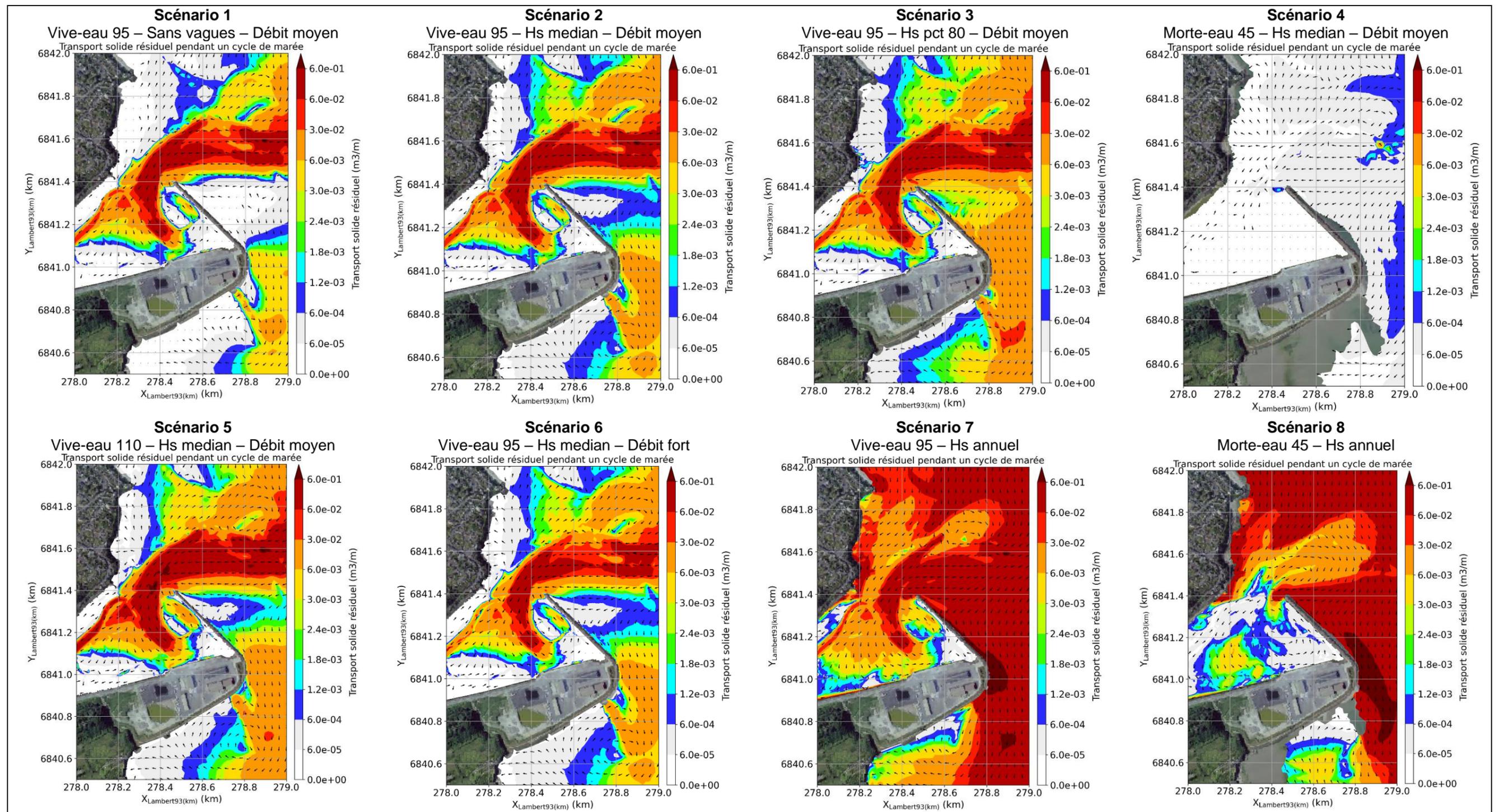


Figure 5-8 Transport solide résiduel au cours d'une marée pour l'ensemble des scénarios courts

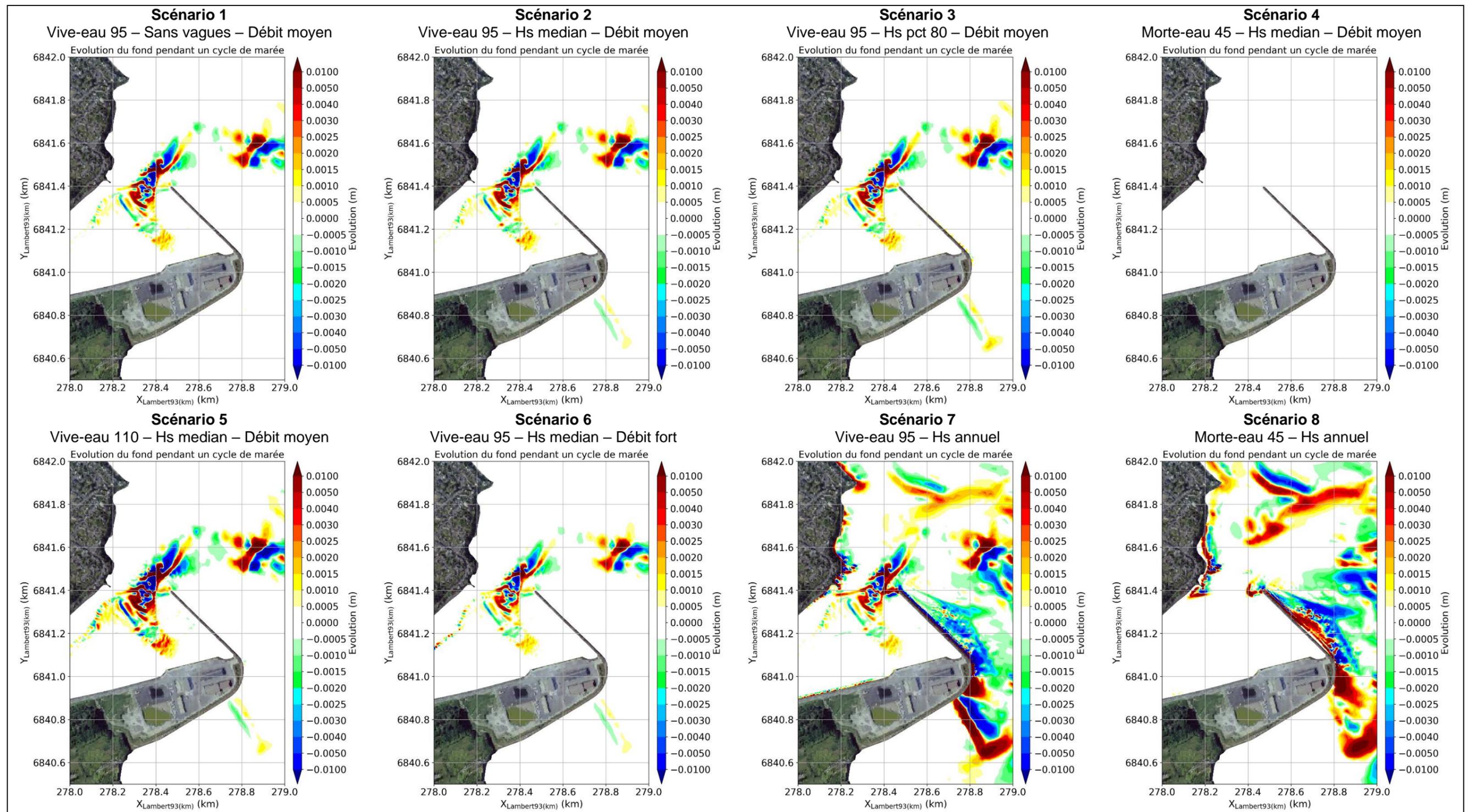


Figure 5-9 Evolution des fonds au cours d'une marée pour l'ensemble des scénarios courts

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 correspond 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

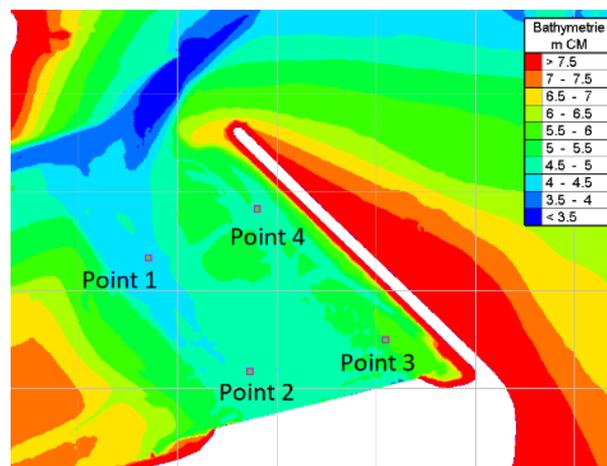


Figure 5-10 Localisation des séries temporelles

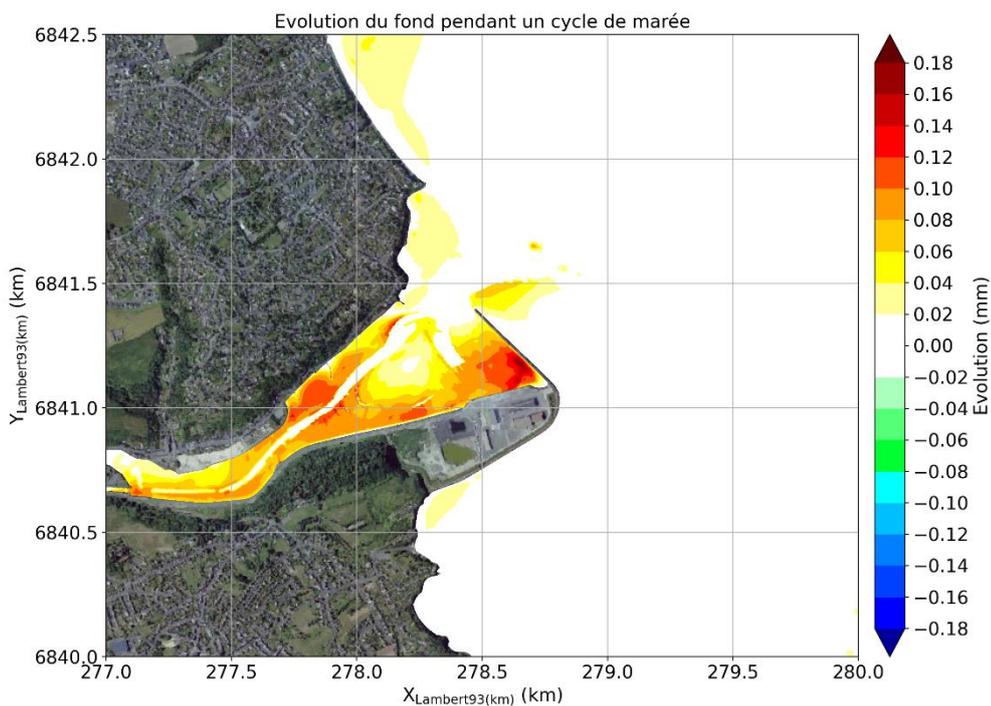


Figure 5-11 Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 2

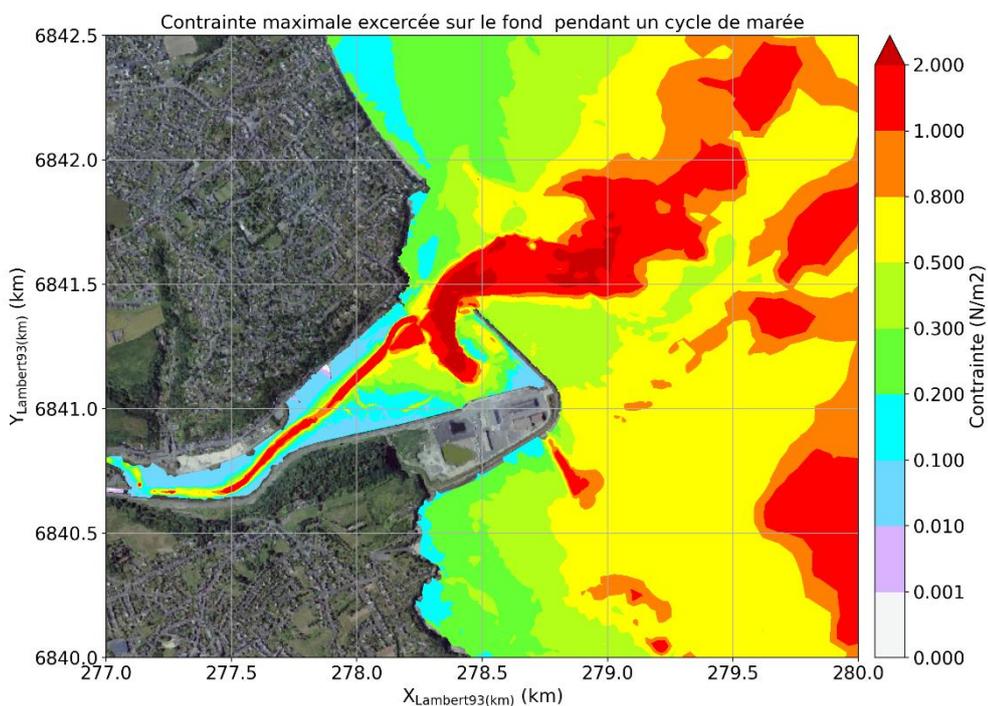


Figure 5-12 Cartographie des maximum de la contrainte exercée sur le fond pour le scénario 2

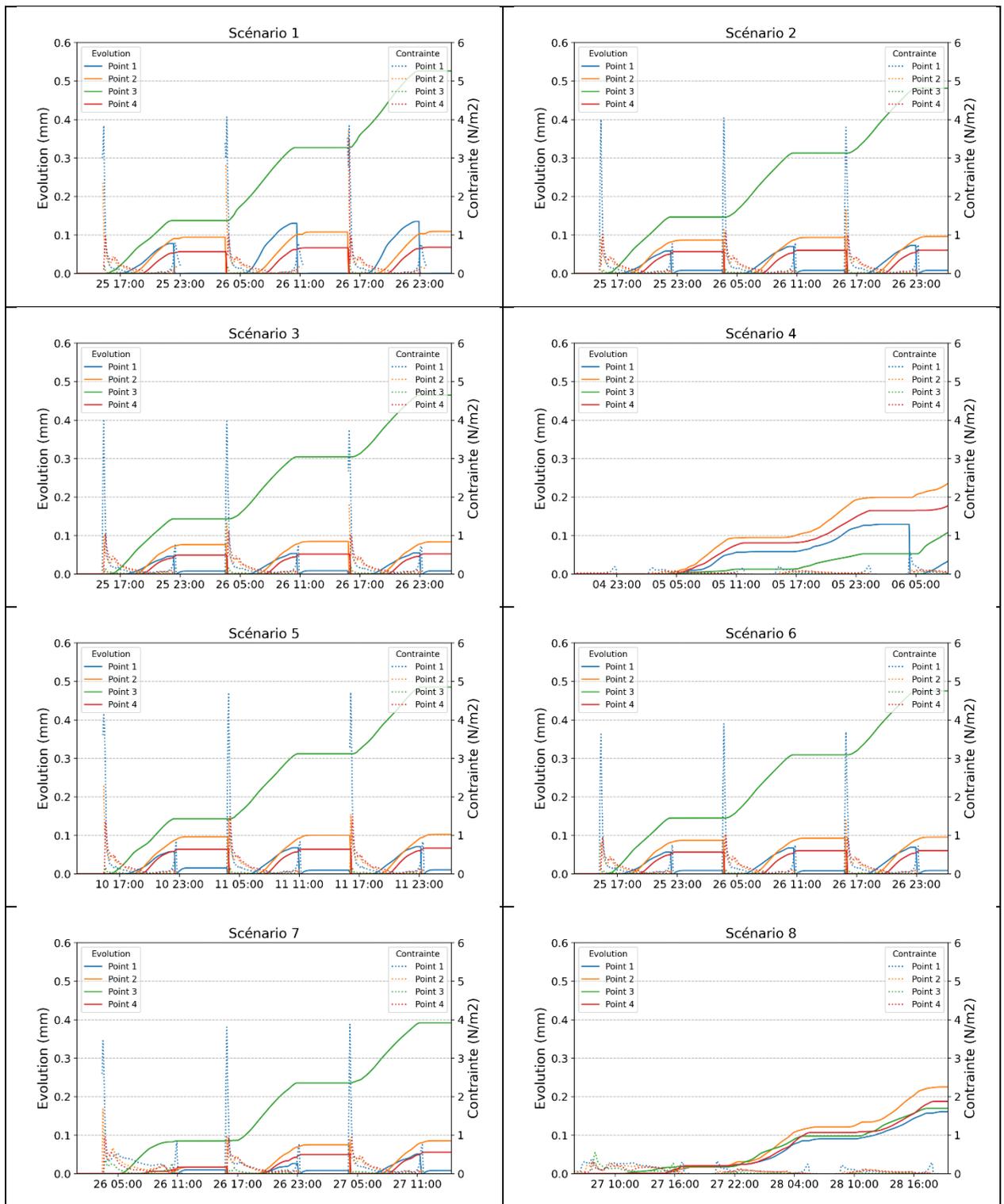


Figure 5-13 Séries temporelles des épaisseurs de dépôt vaseux et des contraintes exercées sur le fond pour les 8 scénarios.

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 m³/an, ce qui est proche du calcul réalisé par le LCHF en 1977 (5000 m³/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 m³/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 m³ 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'il ne l'était 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-Gilette), 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/m² pendant le flot, avec des valeurs atteignant plus de 2 N/m² 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/m² 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 mole est mis en évidence par le modèle, avec une accréation 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'accréation 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) 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 m³/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 m³/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 m³/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 µm) 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 m³/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 900m³/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'endiguement, 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 dominent 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^2 derrière la flèche à moins de 0.1 N/m^2 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 hydro-sédimentaire, notamment afin d'obtenir le meilleur compromis entre la représentation des processus physiques et des temps de calcul acceptables. Ces hypothèses sont les suivantes :

- 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 coquillers). 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.

- 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).
- La contribution des vagues aux circulations est prescrite selon une approche 2D basée sur le formalisme en tensions de radiation, qui ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des processus induits par les vagues. De plus, le modèle 2DH ne permet pas de reproduire la structure verticale des circulations induites par les vagues, notamment dans les zones de dissipation par déferlement, pouvant être caractérisée par un profil cisailé avec un courant dirigé vers la côte en surface et un courant de retour près du fond orienté vers le large (couramment appelé *undertow*). Le transport sédimentaire résultant de ce type de circulation n'est donc pas reproduit, et pourrait constituer une amélioration du modèle, notamment afin de reproduire l'équilibre subtil intervenant avec le transport lié à l'asymétrie des vagues. Cependant, on peut souligner que le forçage dominant régissant la dynamique sédimentaire correspond dans notre cas à la marée, et que l'enjeu principal concernant la contribution des vagues est en grande partie lié à la reproduction des bons niveaux d'énergie.

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

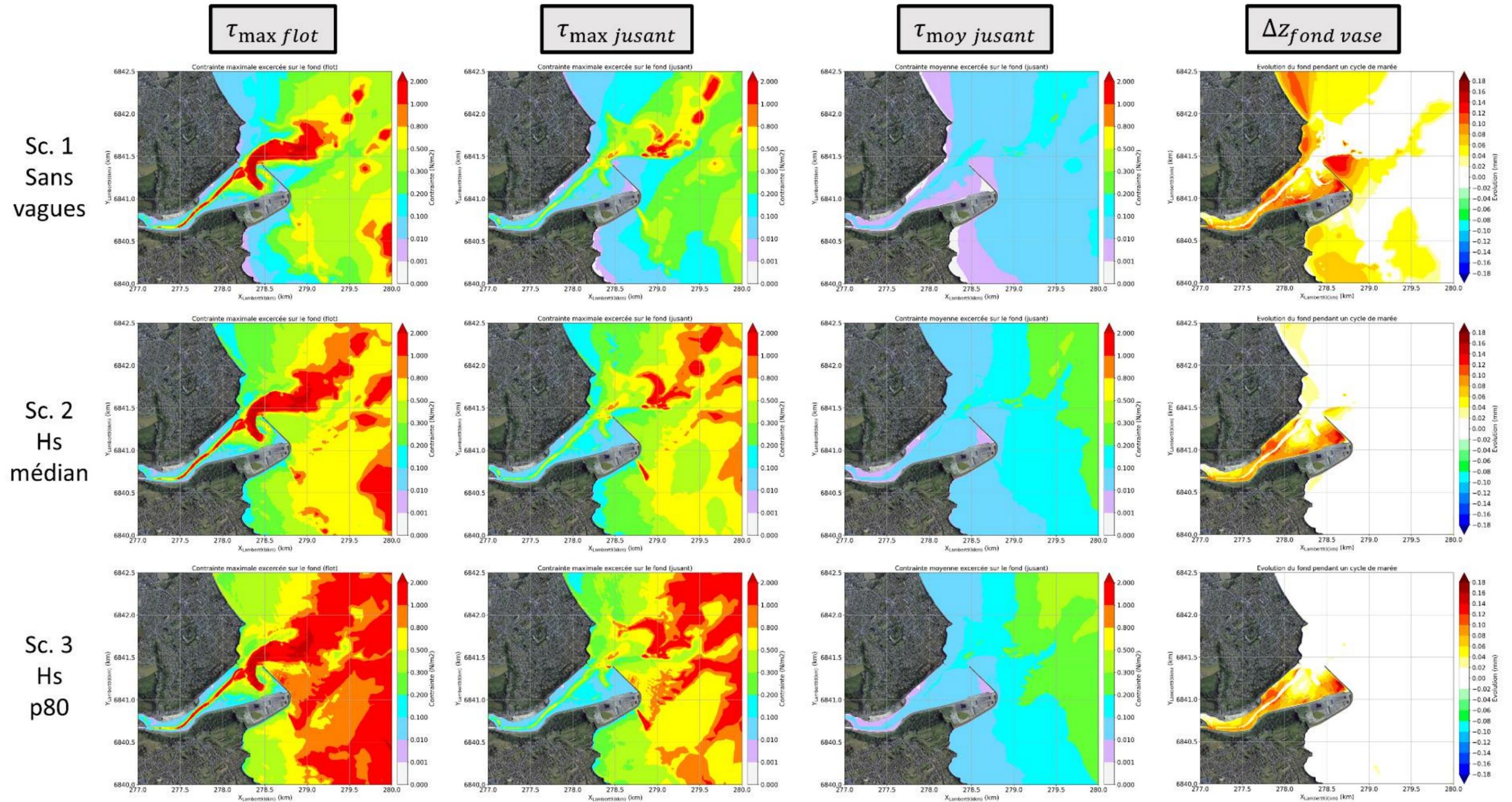


Figure 6-1 Résultats de contraintes de cisaillement près du fond (maximale ou moyenne) pendant le flot et le jusant, et épaisseurs des dépôts vaseux simulées avec le modèle hydro-sédimentaire, en marée de vive-eau (coefficient 95) et pour différentes conditions de vagues (scénarios 1, 2 et 3).

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

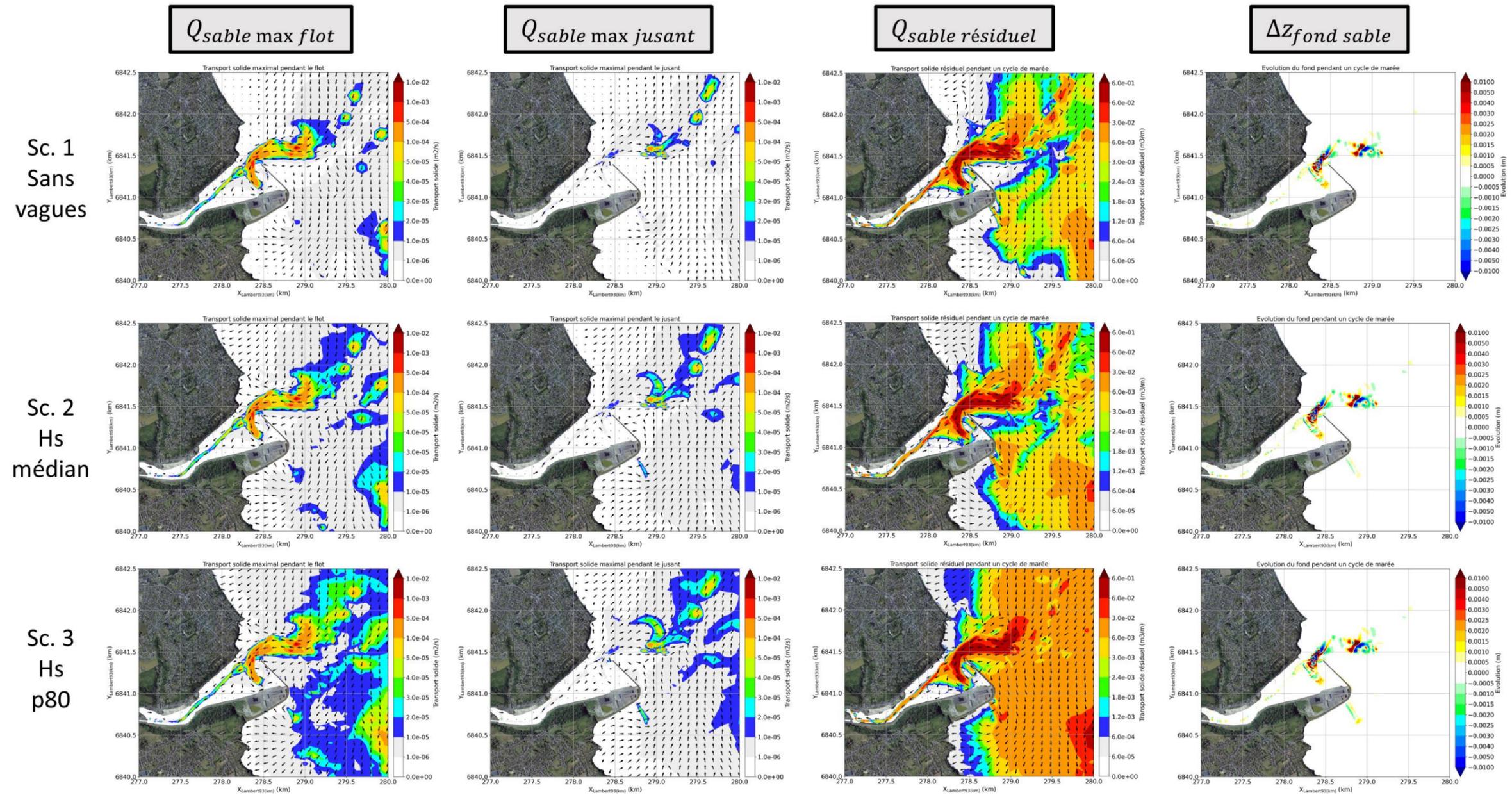


Figure 6-2 Résultats de flux de sable (maximum flot/jusant ou résiduel sur un cycle de marée), et épaisseurs des dépôts sableux simulées avec le modèle hydro-sédimentaire, en marée de vive-eau (coefficient 95) et pour différentes conditions de vagues (scénarios 1, 2 et 3).

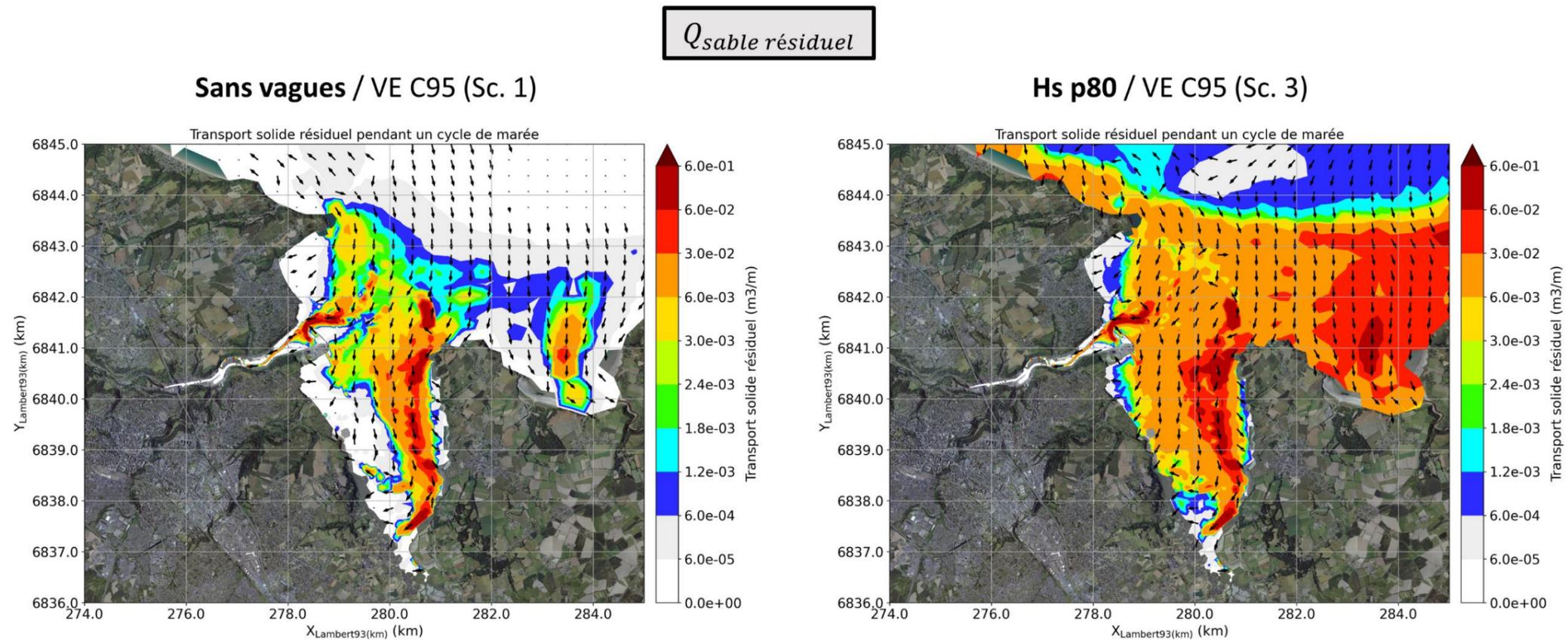


Figure 6-3 Cartes de flux résiduels de sable simulés avec le modèle hydro-sédimentaire en marée de vive-eau (coefficient 95), avec (percentile 80 Hs ; scénario 3) ou sans (scénario 1) prise en compte de l'effet des vagues.

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

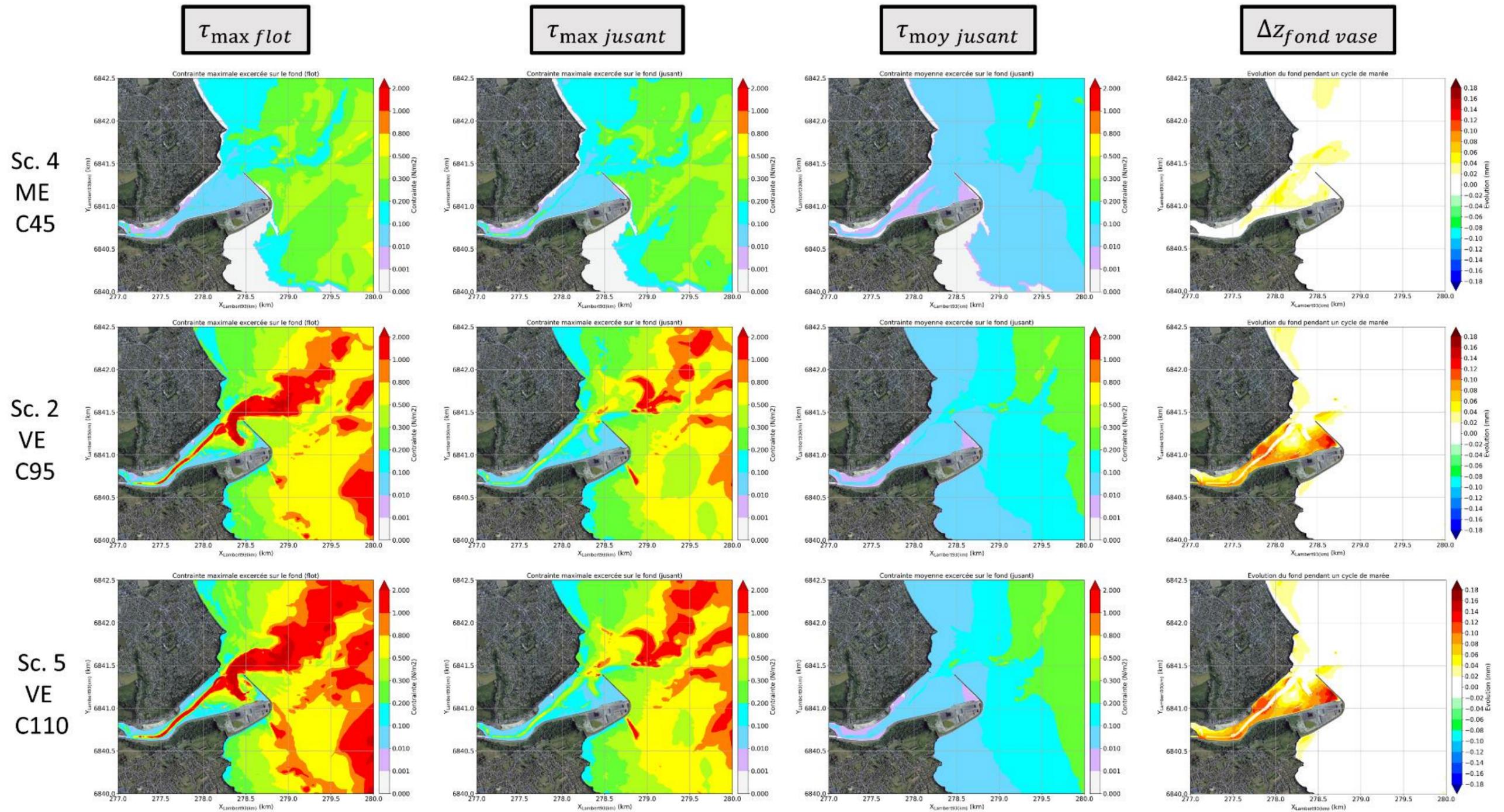


Figure 6-4 Résultats de contraintes de cisaillement près du fond (maximale ou moyenne) pendant le flot et le jusant, et épaisseurs des dépôts vaseux simulées avec le modèle, pour un Hs médian et pour différentes conditions de marée (coefficients de 45, 95 et 110 ; scénarios 4, 2 et 5, respectivement).

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

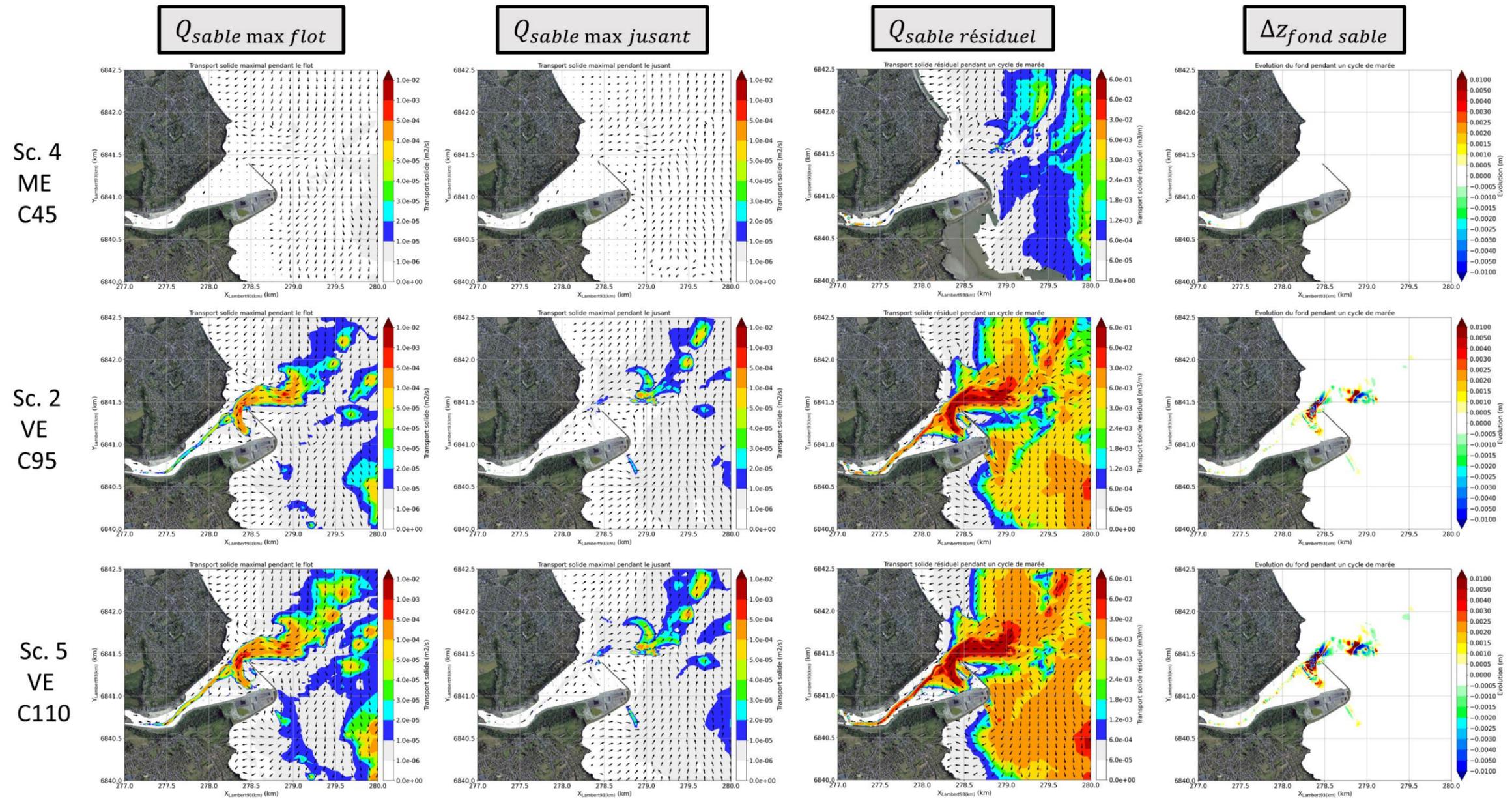


Figure 6-5 Résultats de flux de sable (maximum flot/jusant ou résiduel sur un cycle de marée), et épaisseurs des dépôts sableux simulées avec le modèle, pour un Hs médian et pour différentes conditions de marée (coefficients de 45, 95 et 110 ; scénarios 4, 2 et 5, respectivement).

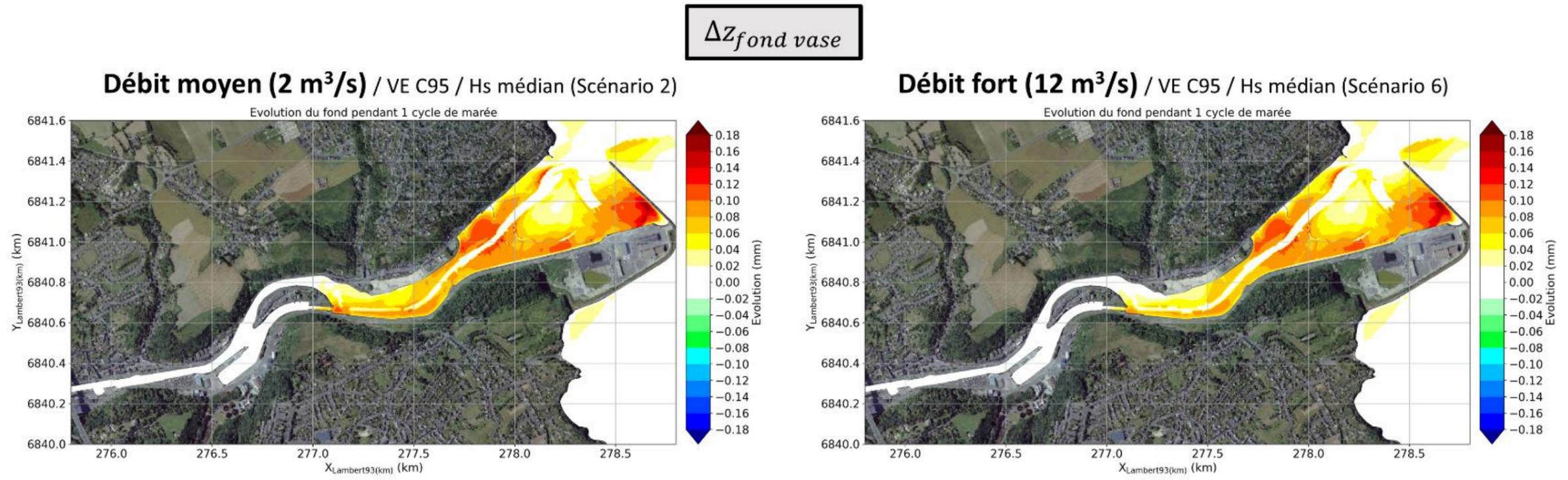


Figure 6-6 Sensibilité des épaisseurs de vase (marine) déposées en fonction du débit fluvial prescrit en amont.

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

Condition amont : Débit fort (12 m³/s) C_{MES}=10 mg/l / VE C95 / Hs médian

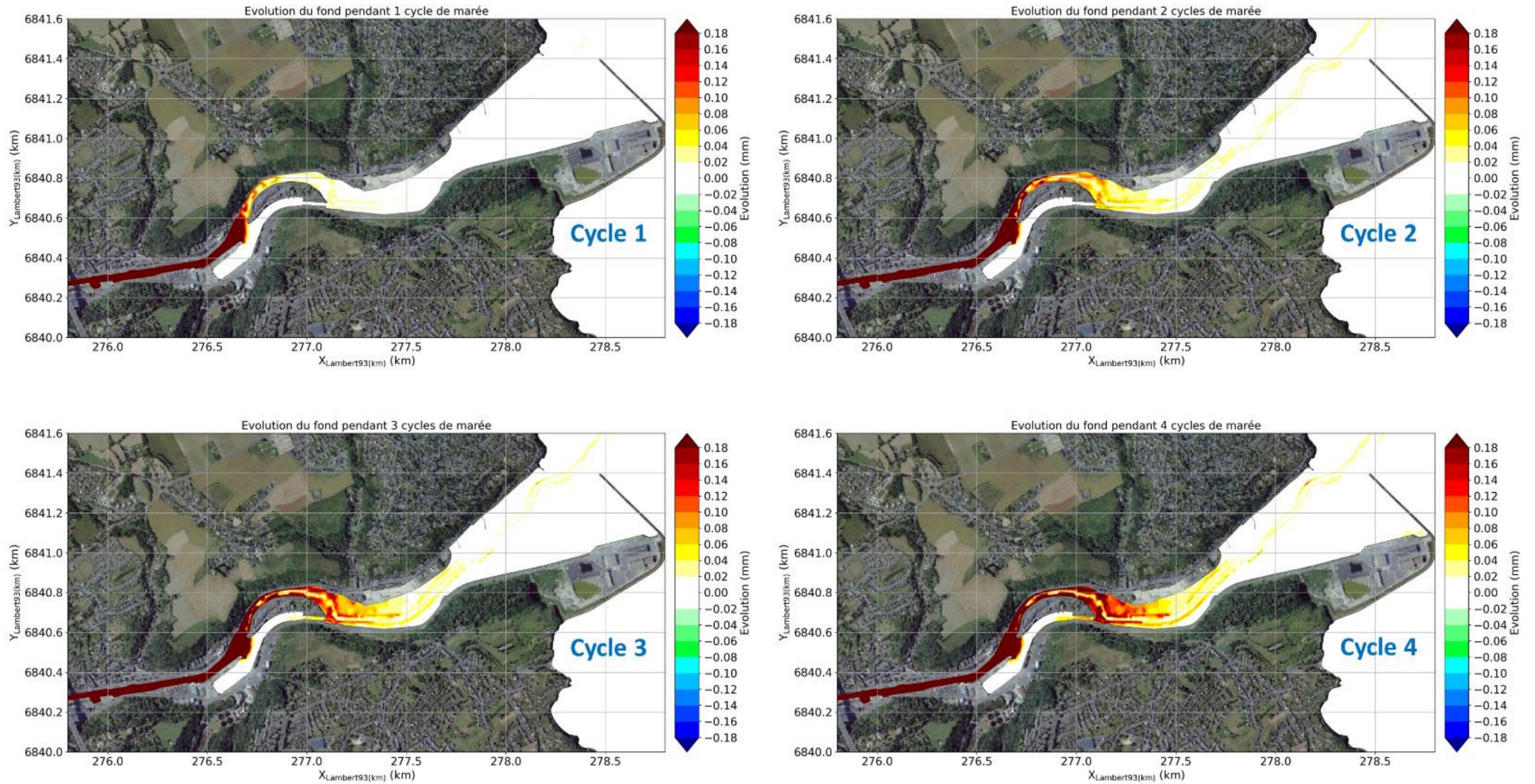


Figure 6-7 Epaisseurs de vases déposées au cours de 4 cycles de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de 12 m³/s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.

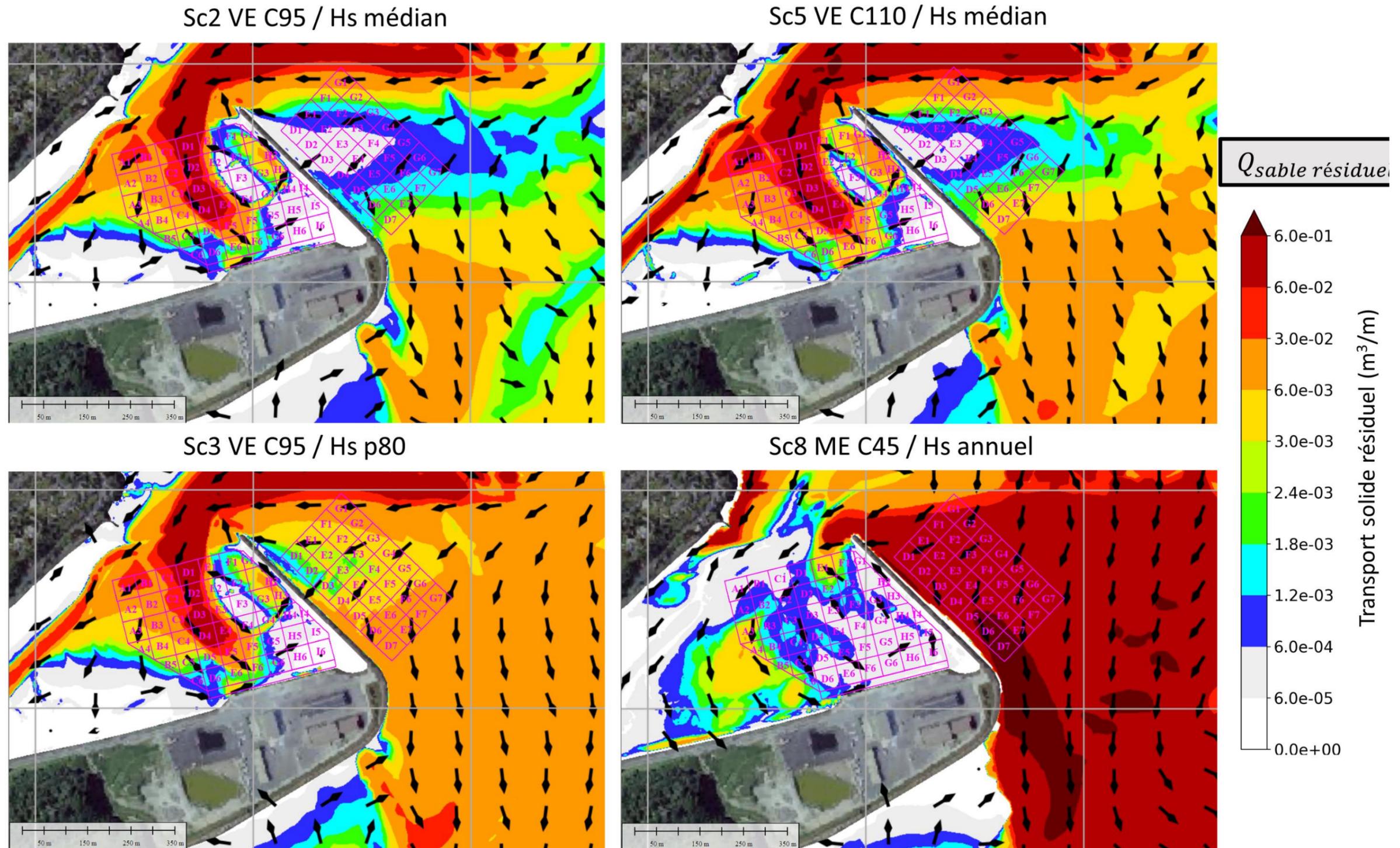


Figure 6-8 Transports résiduels de sable simulés pour différentes conditions de marée et de vagues, avec superposition des zones de dragage dans l'avant-port et de dépôt devant le môle.

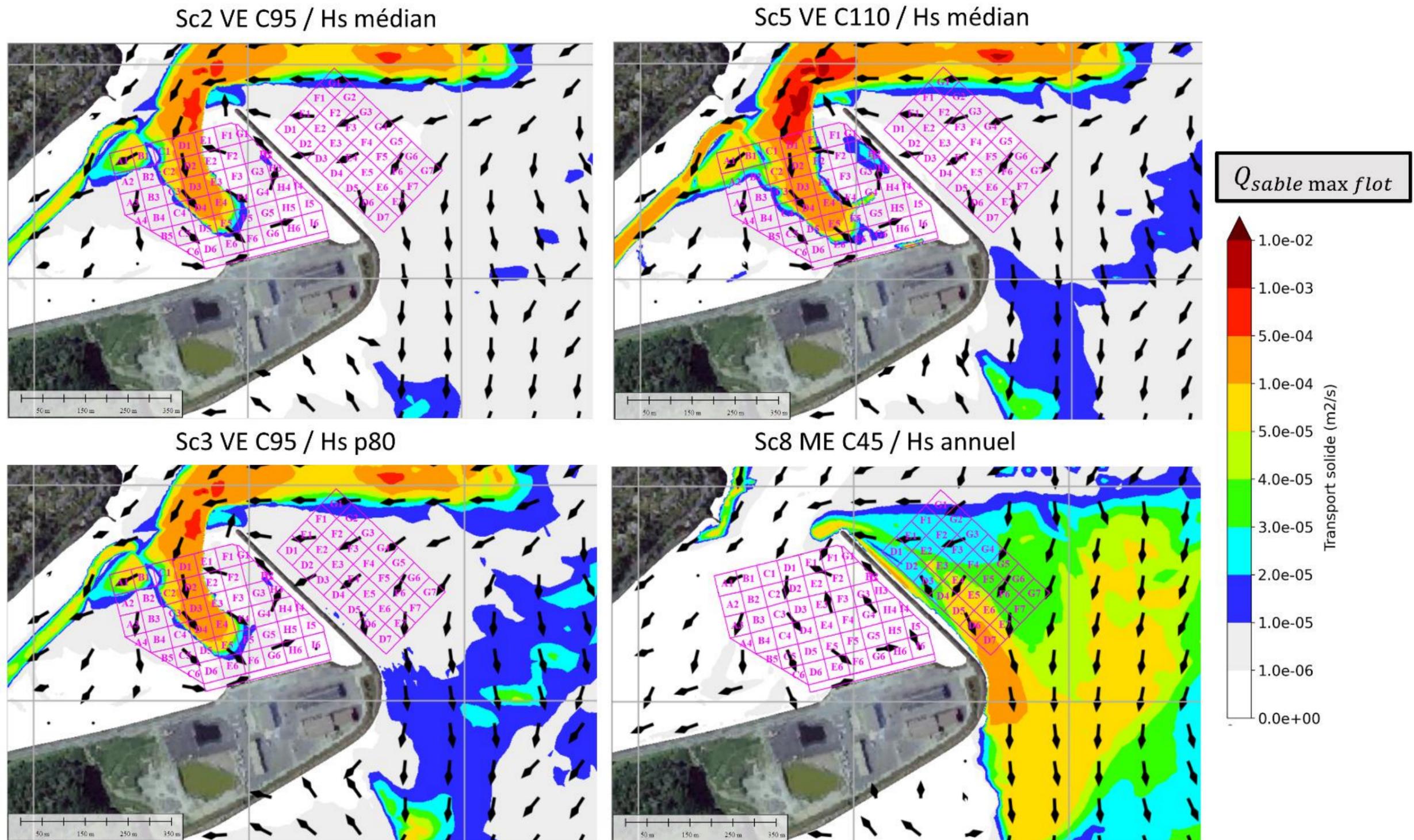


Figure 6-9 Cartes de transport de sable intervenant pendant le maximum de flot, obtenues pour différentes conditions de marée et de vagues, avec superposition des zones de dragage dans l'avant-port et de dépôt devant le môle.

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.

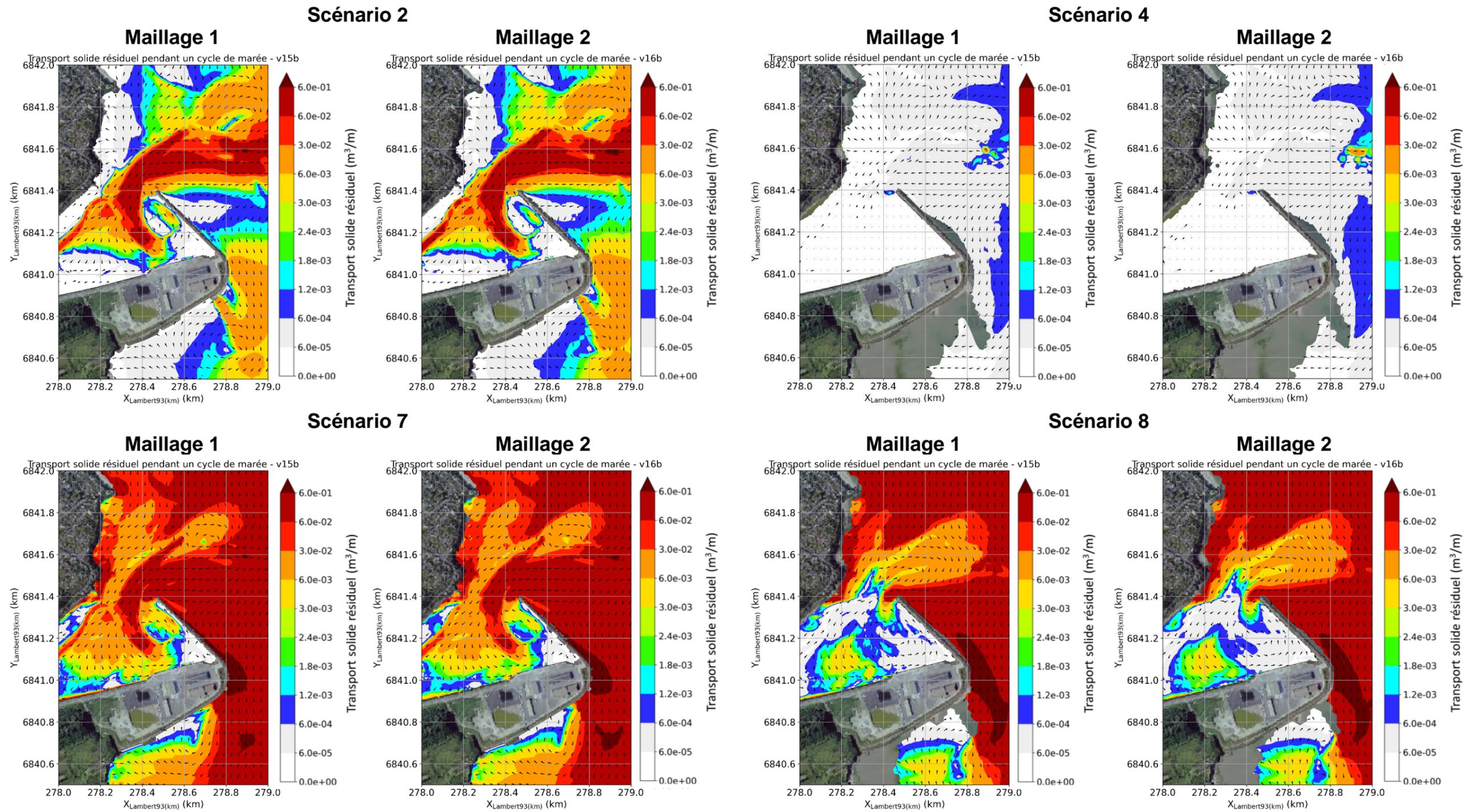


Figure 7-1 Comparaison du transport résiduel sur une marée pour 4 scénarios entre le maillage 1 (maille à 5 m dans l'avant-port) et le maillage 2 (maille à 12 m dans l'avant-port)

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^3)	Volume érodé (m^3)	Evolution du volume (m^3)
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 τ_{cd} et τ_{ce} . Les valeurs retenues, qui sont dans les gammes de valeurs caractéristiques des sédiments fins, sont les suivantes :

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

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^3 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^3). 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^3) ; une certaine quantité ou masse de sédiment déposée (en kg) se traduit en volume (m^3 , 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).

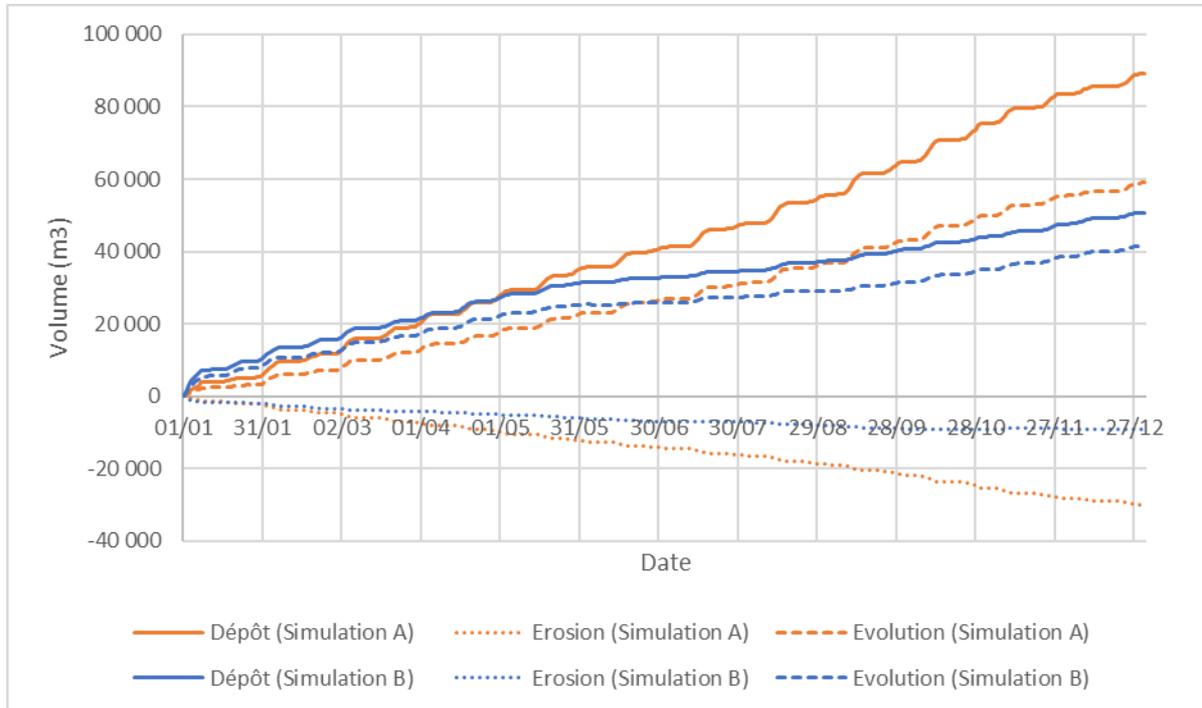


Figure 7-2 Variation temporelle du volume déposé, érodé et évolution du volume de sable dans la zone de dragage entre le 01/01/2018 et le 01/01/2019 pour les simulations A et B.

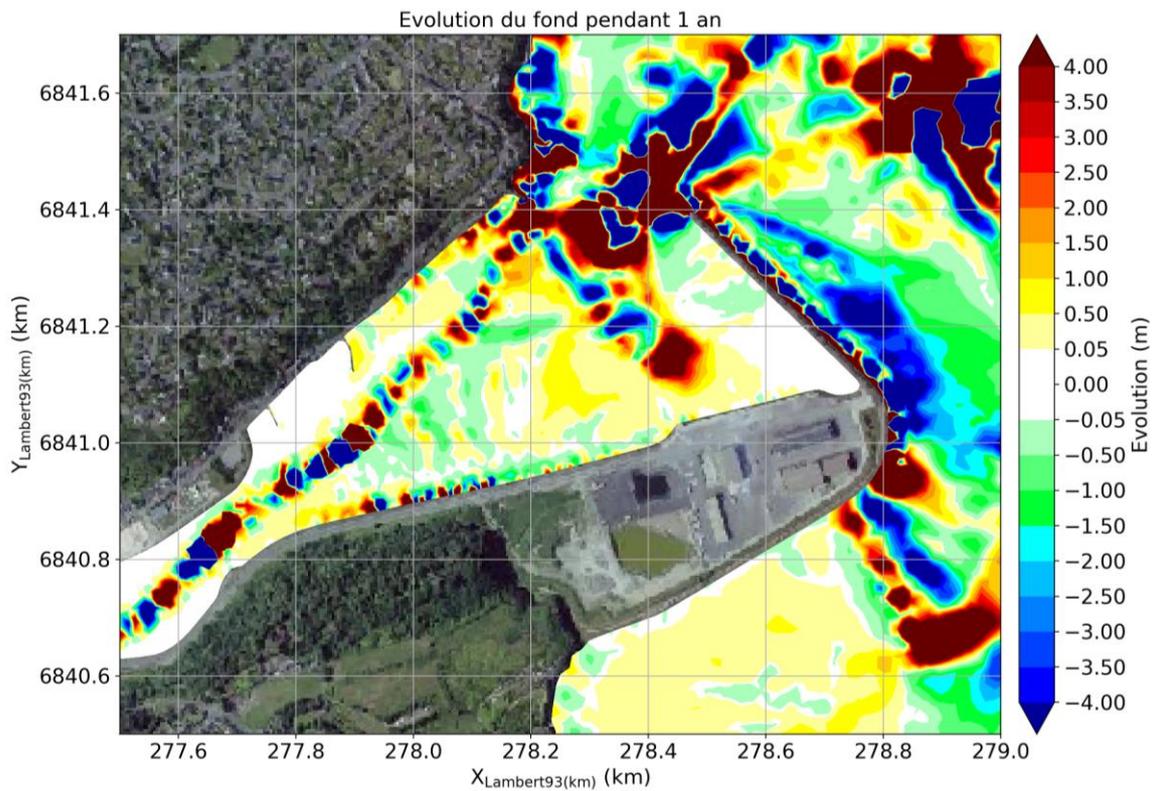


Figure 7-3 Evolution des fonds sableux au bout d'un an de simulation lors de la simulation A (bathymétrie 2020).

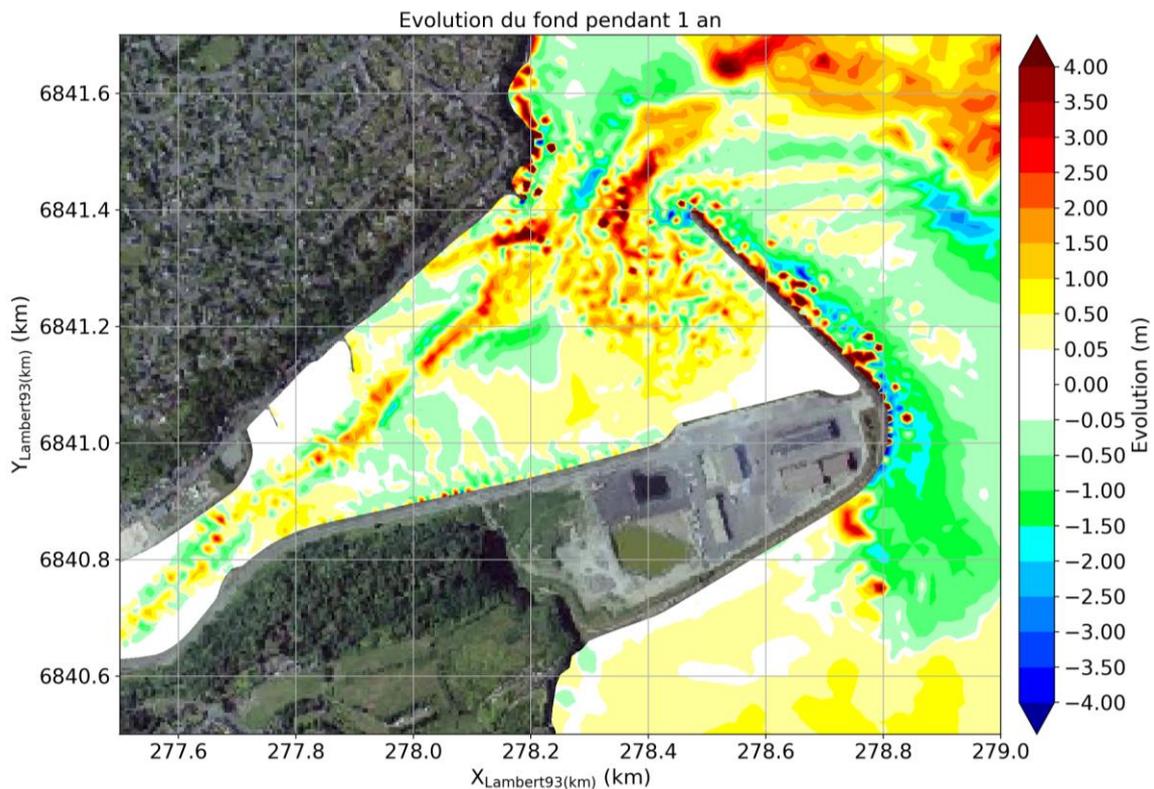


Figure 7-4 Evolution des fonds sableux au bout d'un an de simulation lors de la simulation B (fonds dragués initialement à +4.5m CM dans l'avant-port).

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 m³, 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 m³ dragués annuellement sur la zone.

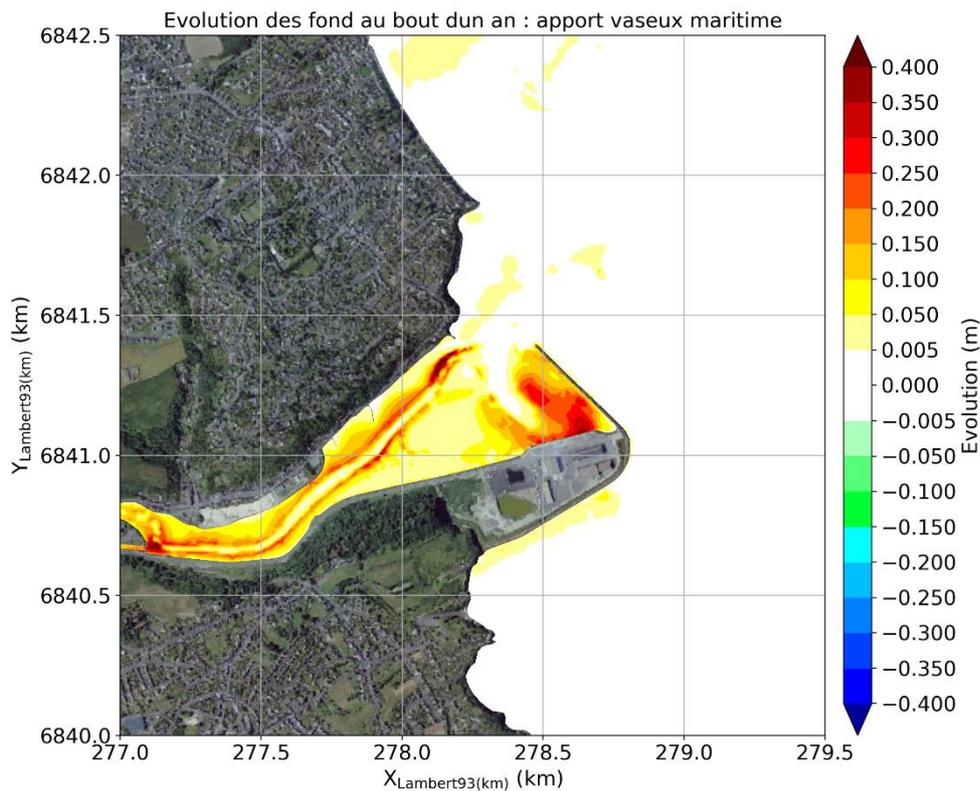


Figure 7-5 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation : apport maritime

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)

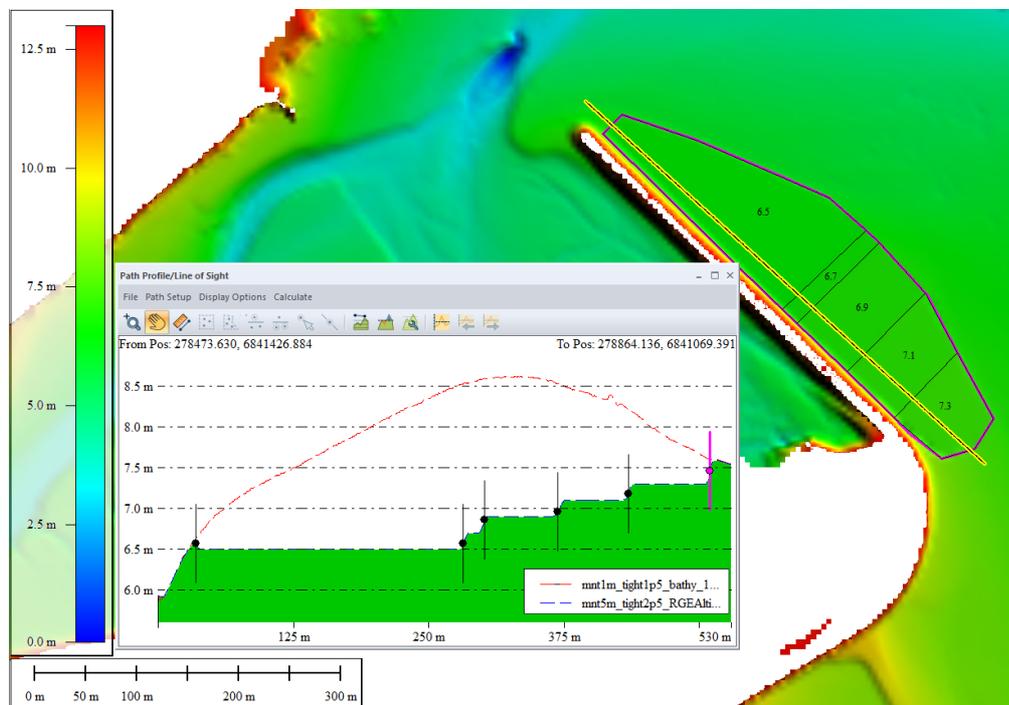


Figure 7-6 Présentation du MNT utilisé pour le test de sensibilité avec bathymétrie arasée dans la zone de dépôt.

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

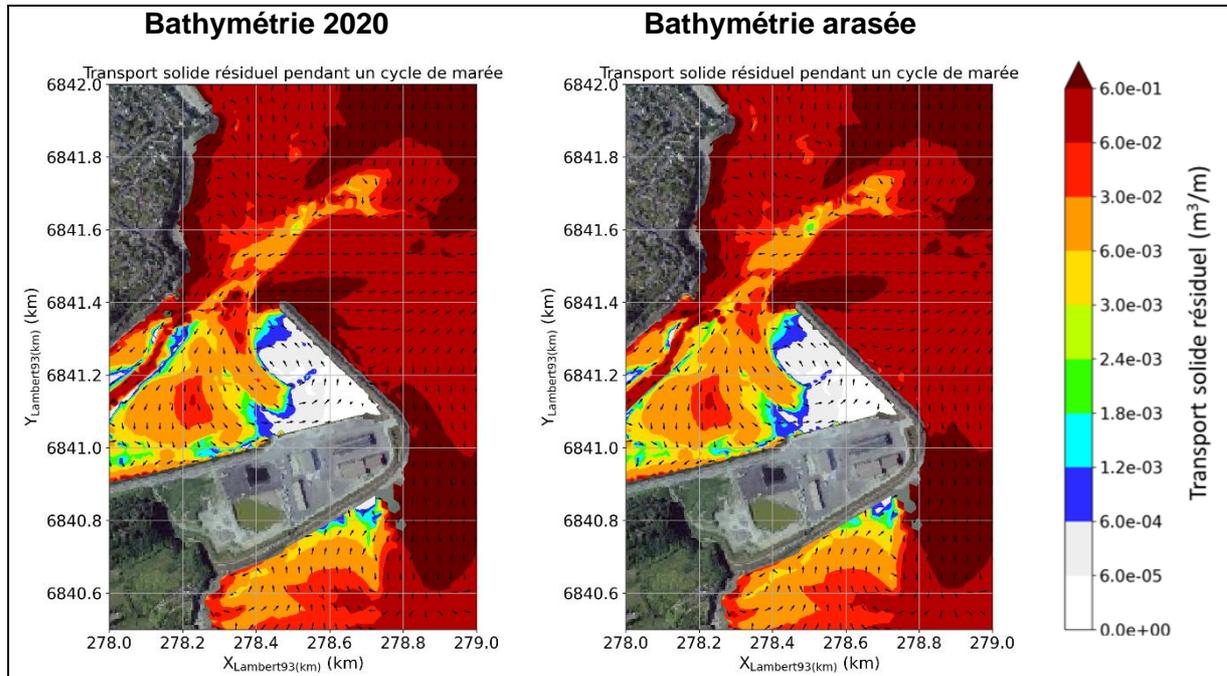


Figure 7-7 Cartographie du transport résiduel au cours du cycle de marée du 06/01/2018 matin (marée de vive-eau 92)

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 composés 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 m³ 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.

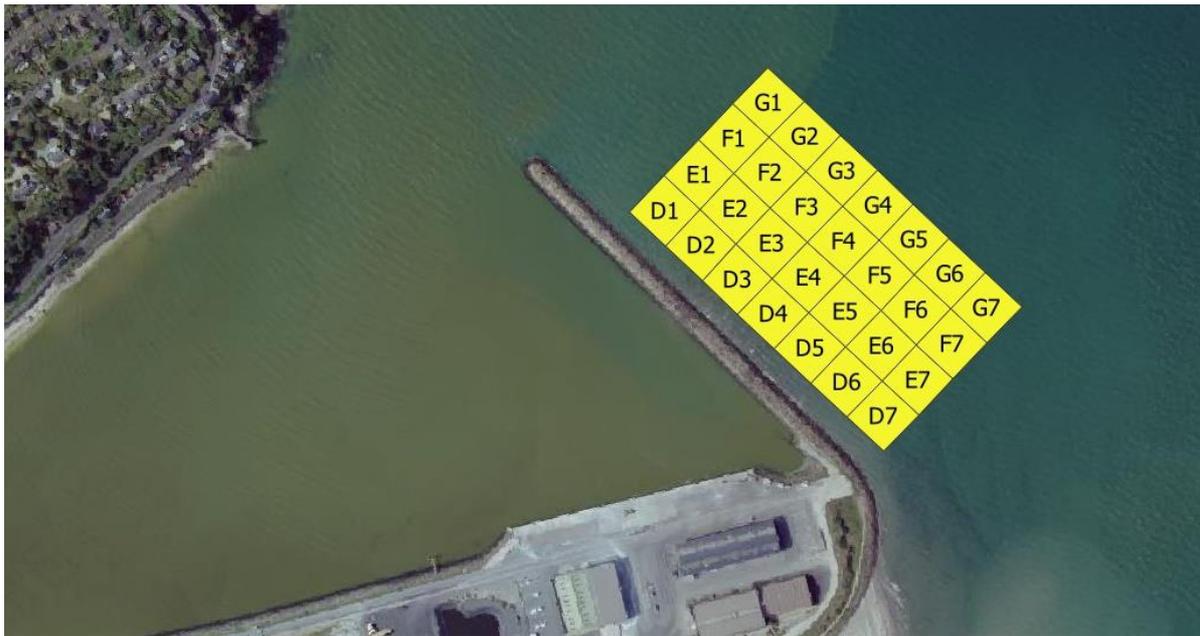


Figure 7-8 Localisation des zones de dépôts.

7.3.2.2 Résultats

La cartographie des zones de dépôt à proximité de la zone d'étude 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). A une échelle plus élargie (Figure 7-10), il n'apparaît pas de zone de dépôts significatifs liés aux dépôts des sédiments dragués.

Le cumul annuel des dépôts de vase dans l'avant-port, c'est à dire dans tout le secteur compris entre le môle et l'écluse ou le déversoir, et ayant pour origine la reprise par l'hydrodynamisme (courants et agitation) des sédiments de la campagne de dragage de l'année précédente (disposés le long du môle, côté extérieur) est estimé d'après la modélisation à 9 200 m³. En d'autres termes, c'est la quantité de sédiment dragué qui revient directement dans l'avant-port d'une année à l'autre. Cette quantité est significative puisqu'elle représente un taux de retour dans l'avant-port de 40% des sédiments fins (vase) dragués. Il faut cependant distinguer :

- ceux qui se redéposent dans la zone entretenue : 5 100 m³, soit 22% du volume de vase dragué annuellement
- ceux qui se redéposent dans les zones non entretenues (plus en amont) : 4100 m³, soit 18% du volume de vase dragué annuellement

Ces quantités sont à comparer aux dépôts liés aux apports maritimes naturels (i.e. à la turbidité de l'eau qui remplit l'avant-port à chaque marée) : 40 500 m³ se déposent en amont du môle dont 14 700 m³ dans la zone de dragage et 25 800 m³ dans les zones non entretenues. Globalement, le retour des sédiments vaseux dragués contribue à environ 20% de l'envasement de l'ensemble de l'avant-port (entre le môle et l'écluse ou le déversoir).

D'autre part, 12 000 m³, soit environ 53% des sédiments vaseux dragués (et disposés le long du môle), sont dispersés au-delà de l'emprise de la figure 7.9. 5% des sédiments ayant été déposé

restent dans ou à proximité de la zone de dépôts, moins de 1% se déposent dans le secteur de la plage du Valais et moins de 1% dans le secteur de la flèche sableuse.

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

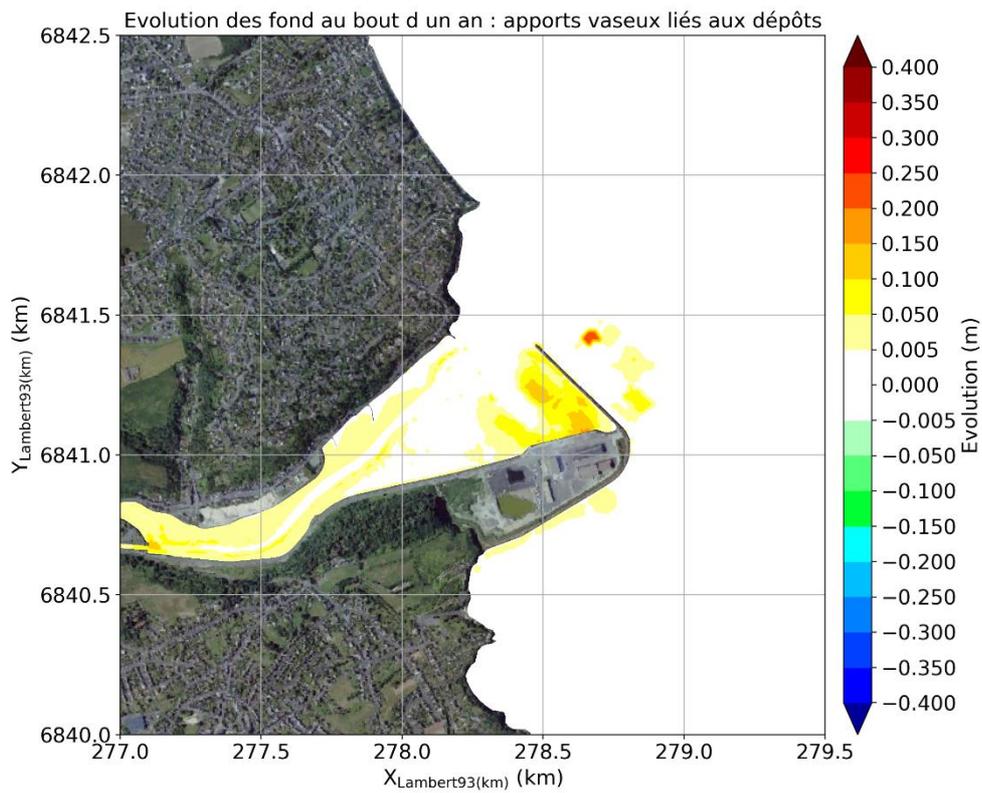


Figure 7-9 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation : apport lié au dépôt des sédiments dragués

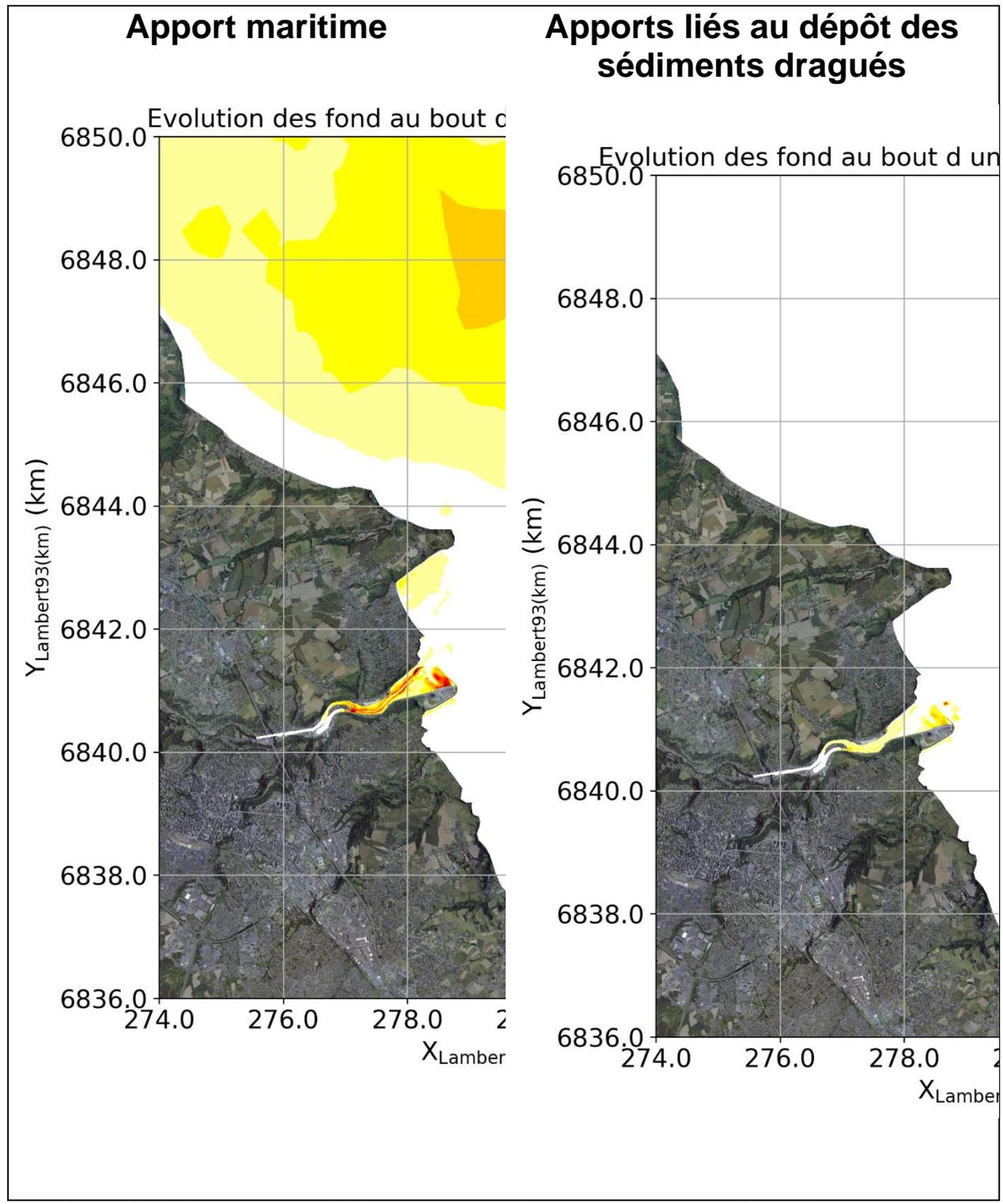


Figure 7-10 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation à une échelle élargie : comparaison des résultats entre les apports maritimes et les apports lié au dépôt des sédiments dragués

7.4 SYNTHÈSE

- Concernant les sables, le transport résiduel est entrant sur le secteur de l'avant-port du fait de l'asymétrie de la marée en faveur du flot. L'ensablement de la zone d'entretien intervient sur une courte période (~ 20 minutes) au tout début du remplissage de l'avant-port lors du flot (~ 3 heures avant la pleine mer) ; Pour des coefficients de marée inférieures à 60 environ, il n'y a pas d'évolution du volume déposé dans la zone de dragage. Puis plus le coefficient de marée augmente, plus le volume se déposant dans la zone de dragage est élevé ;
- Concernant la vase, le modèle hydro-sédimentaire a mis en évidence un processus classique de décantation des Matières En Suspension (MES) apportées à chaque marée dans l'avant-port ;
- L'effet morphodynamique des dépôts de dragage devant le môle contribue à 15% de l'ensablement de l'avant-port, ce qui correspond à un volume d'environ 15 000 m³/an ;
- Environ 20% des vases déposées devant le môle rentrent à nouveau dans l'avant-port (~5 000 m³/an).

8. ANNEXES

8.1 ANNEXE 1 : COMPLEMENTS SUR LES EVOLUTIONS BATHYMETRIQUES HISTORIQUES

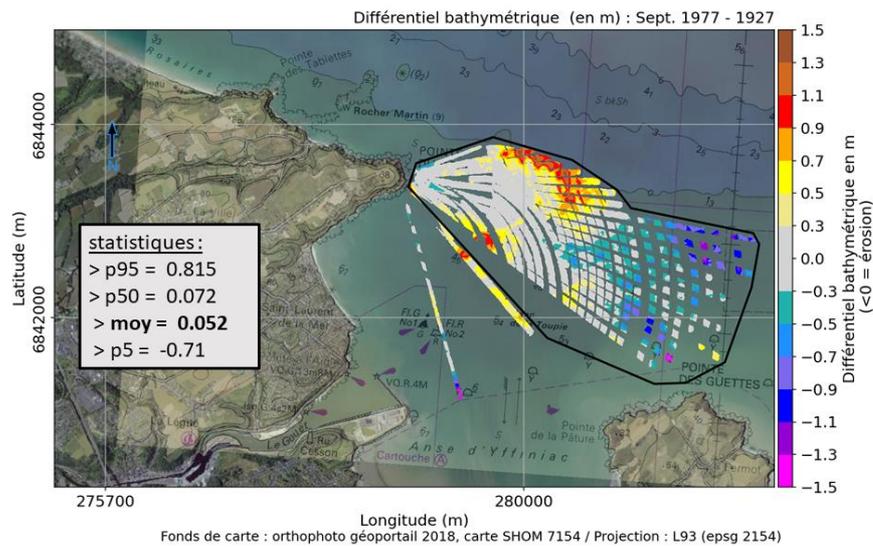


Figure 8-1 Différentiel bathymétrique entre 1977 (LCHF) et 1927 (lot SHOM). Le contour noir correspond à la zone utilisée pour évaluer la tendance générale d'évolution (cf. encadré statistiques).

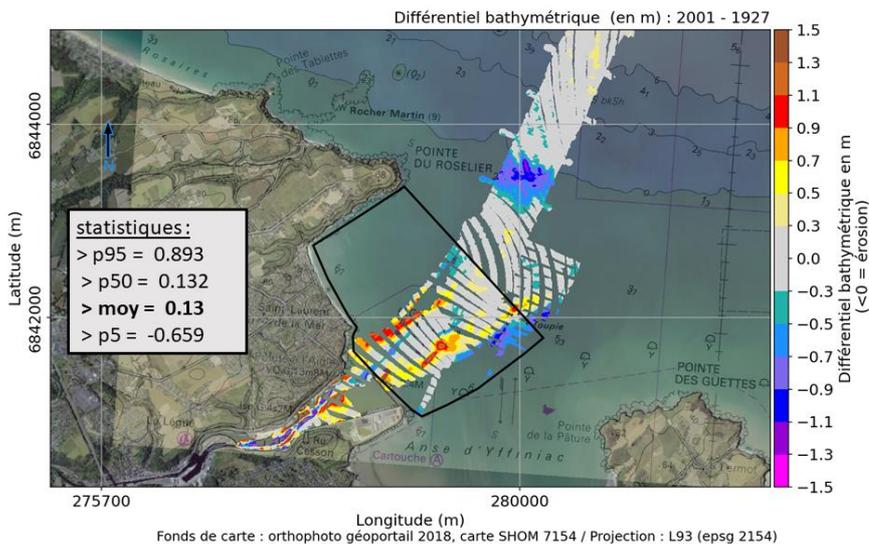


Figure 8-2 Différentiel bathymétrique entre 2001 (lot SHOM) et 1927 (lot SHOM). Le contour noir correspond à la zone utilisée pour évaluer la tendance générale d'évolution (cf. encadré statistiques).

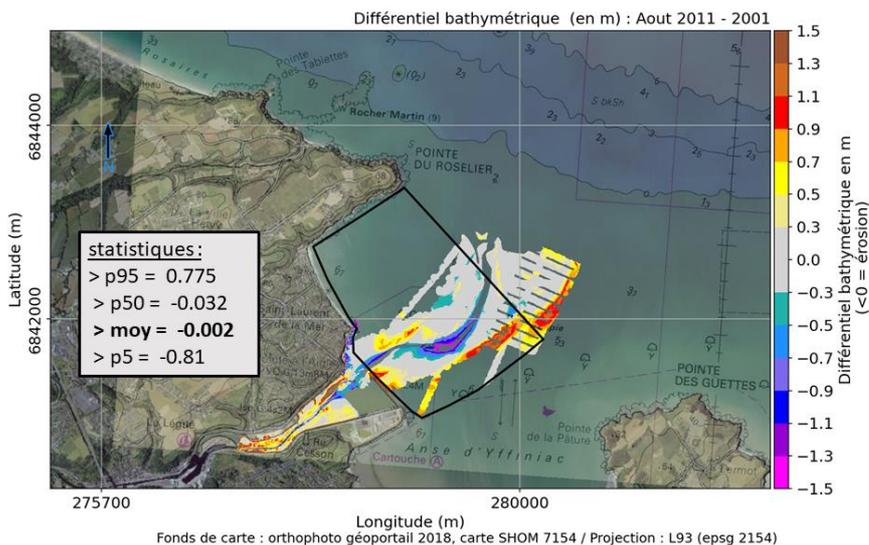


Figure 8-3 Différentiel bathymétrique entre 2011 (données RGE ALTI) et 2001 (lot SHOM). Le contour noir correspond à la zone utilisée pour évaluer la tendance générale d'évolution (cf. encadré statistiques).

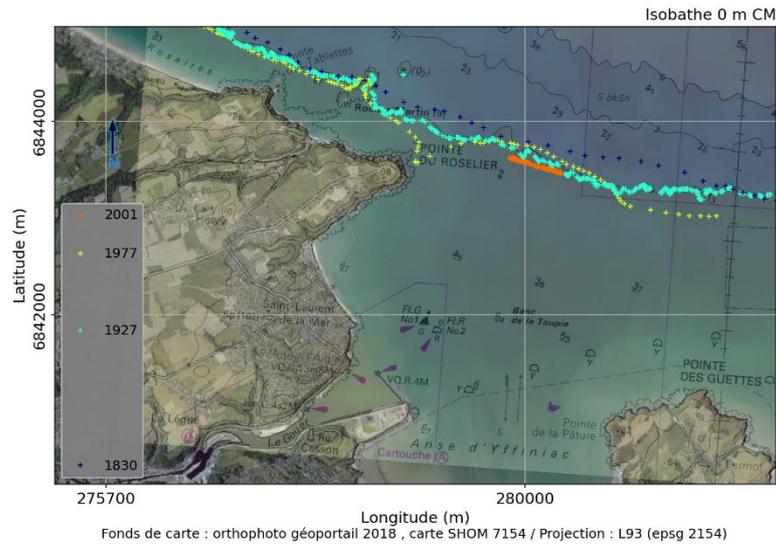


Figure 8-4 Evolution historique de la position de l'isobathe 0 m CM.

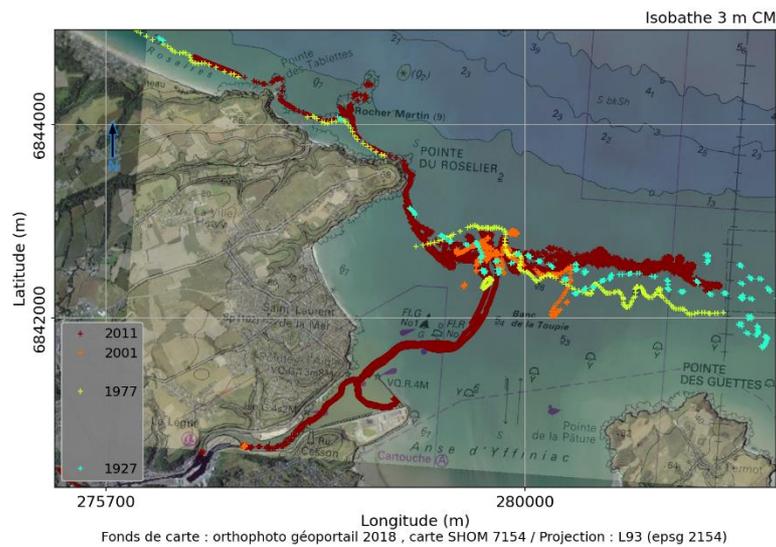


Figure 8-5 Evolution historique de la position de l'isobathe +3 m CM.

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

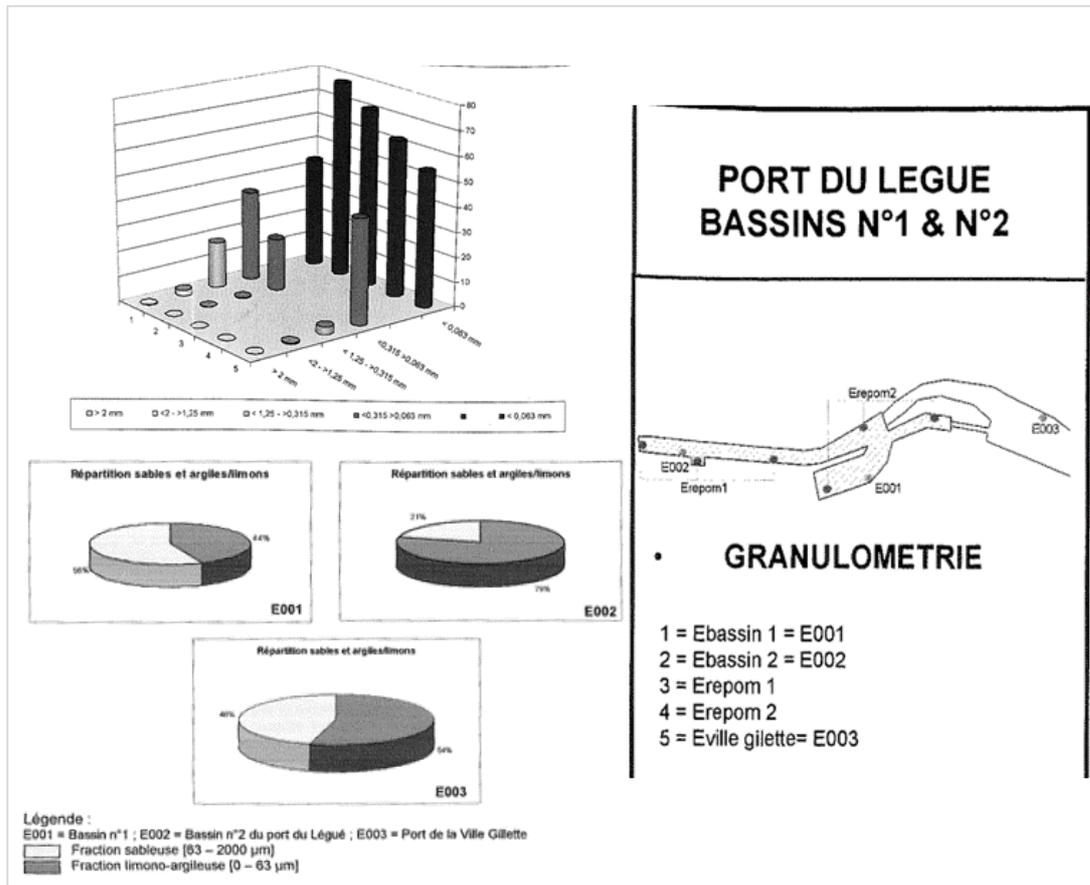


Figure 8-6. Analyses granulométriques réalisées par la CCI22 en octobre 2001 (source : rapport IDRA, 2002).

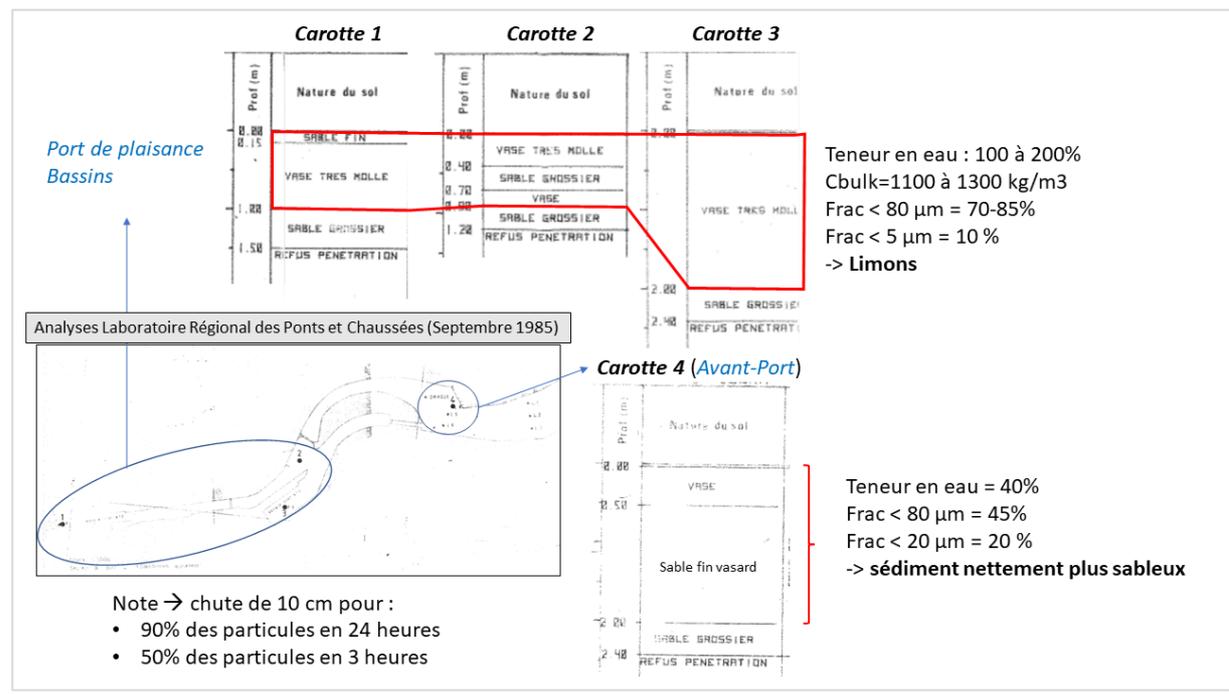
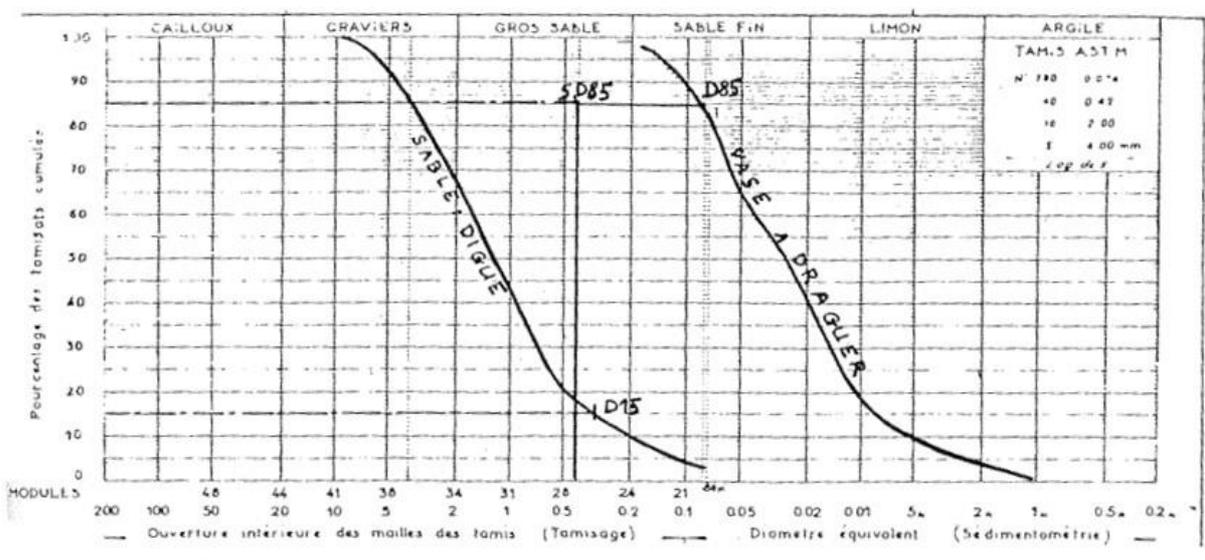


Figure 8-7. Carottages et analyses sédimentaires - port de plaisance, bassins à flot, fond de l'avant-port – (laboratoire régional des Ponts et Chaussées en septembre 1985).



Étude PB Environnement, 1983 (Source : D.D.E. Côtes du Nord)

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'endiguement 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

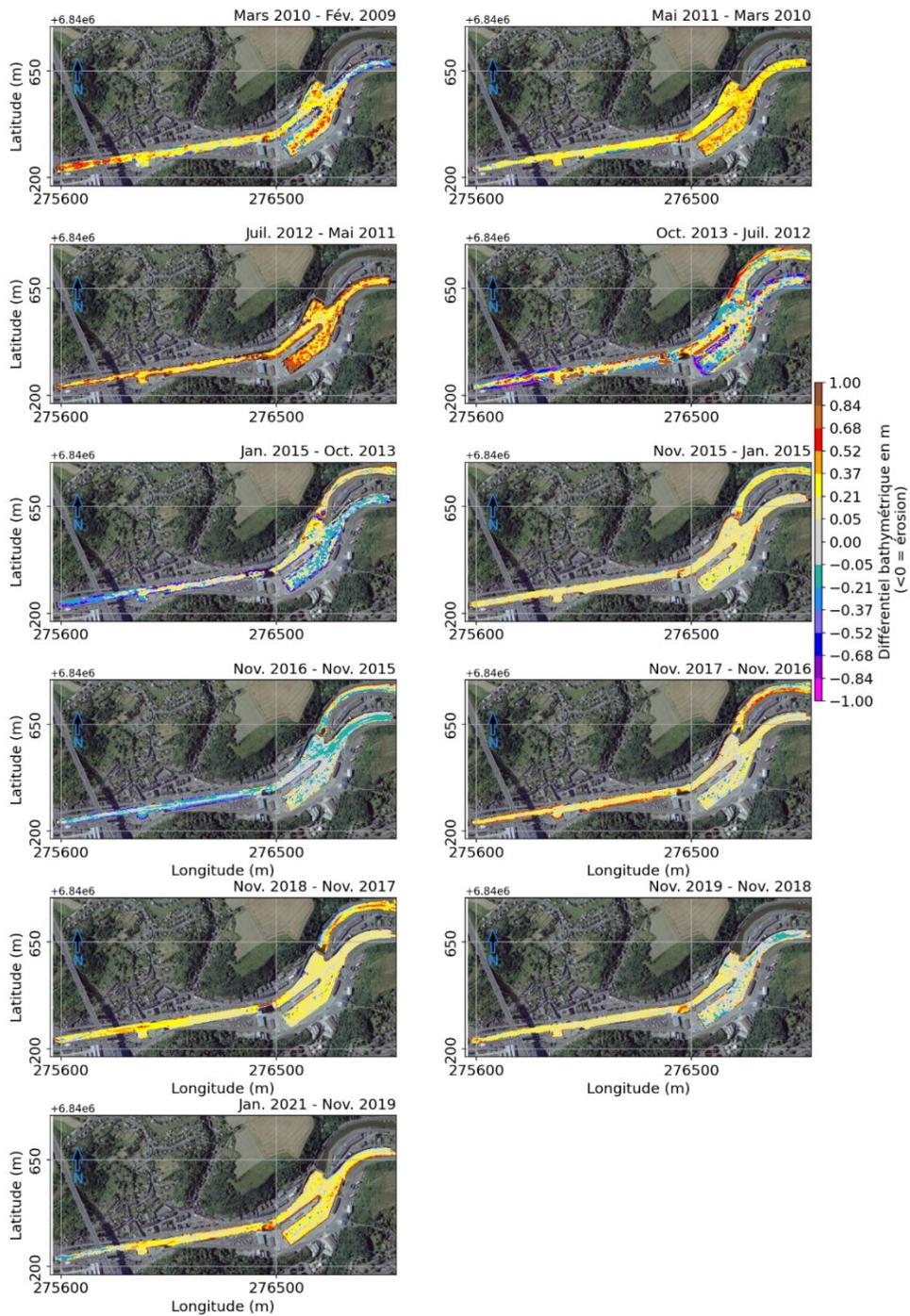
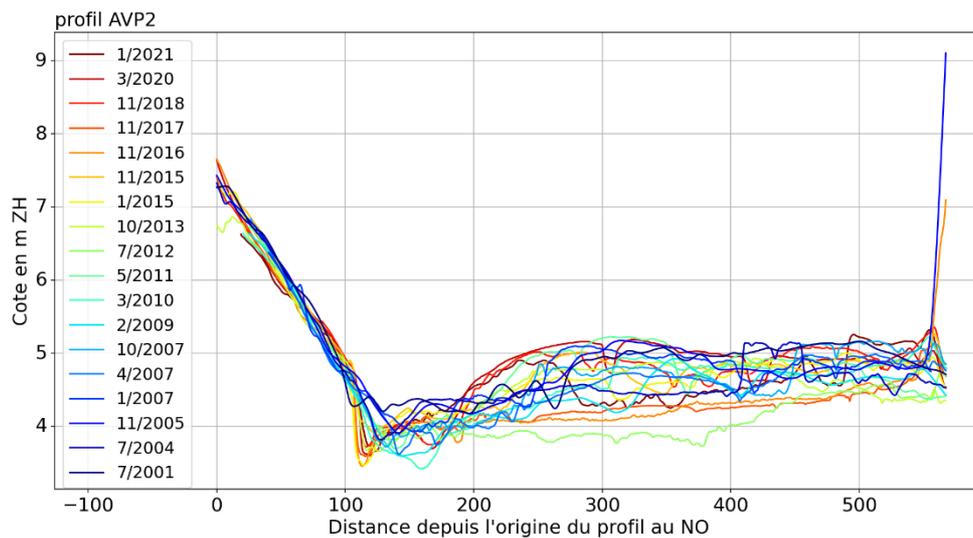
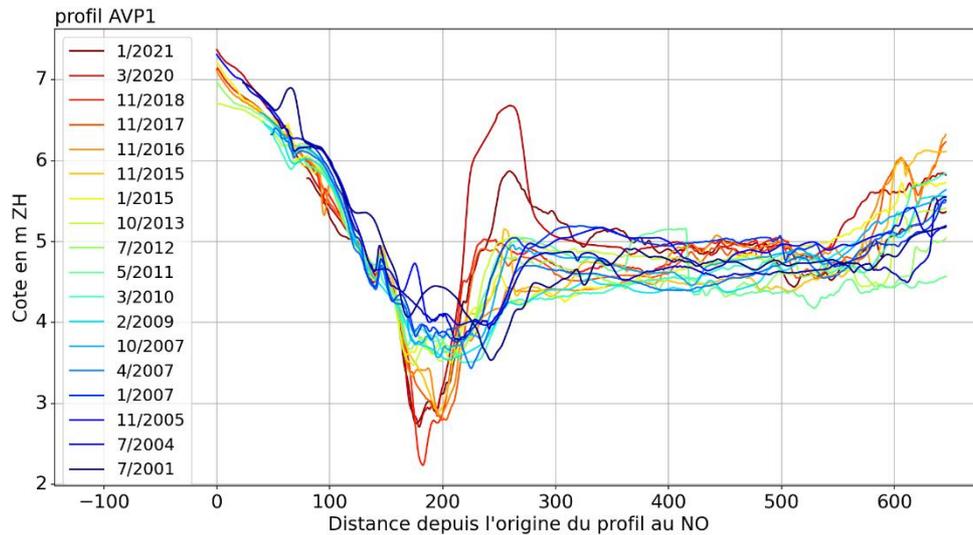
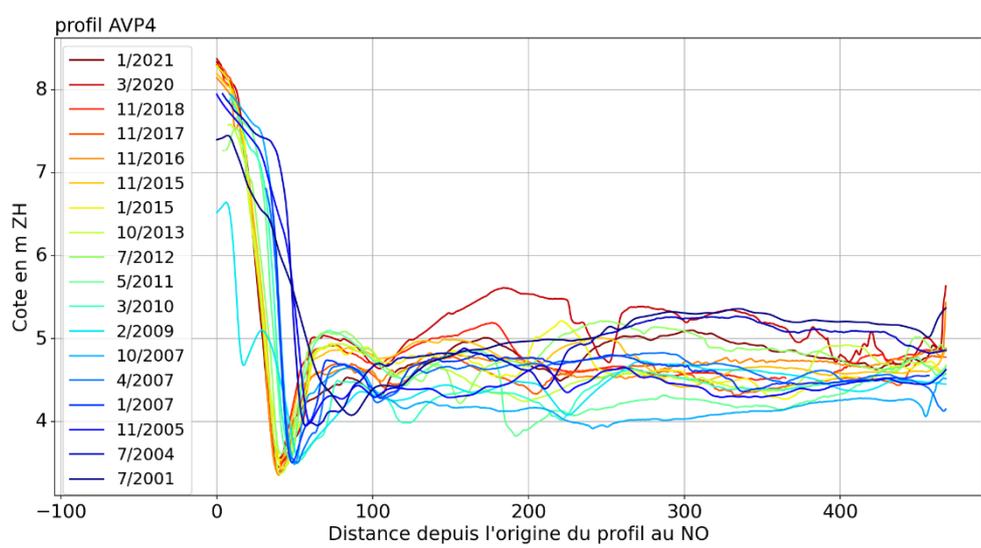
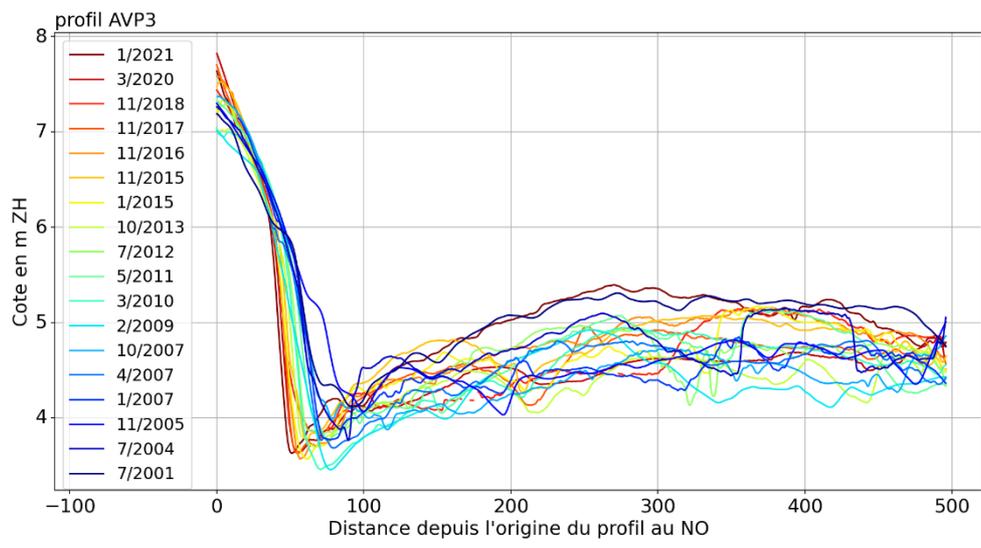


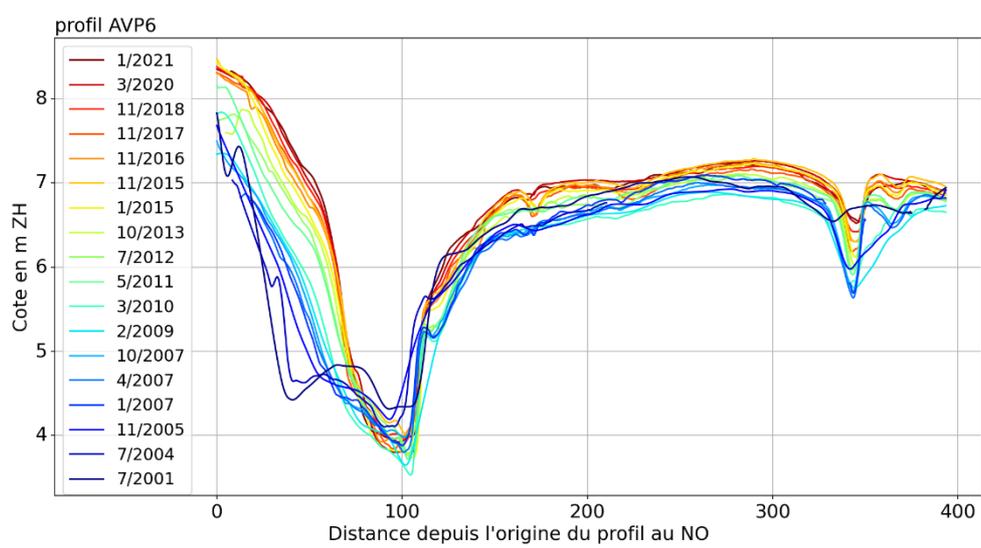
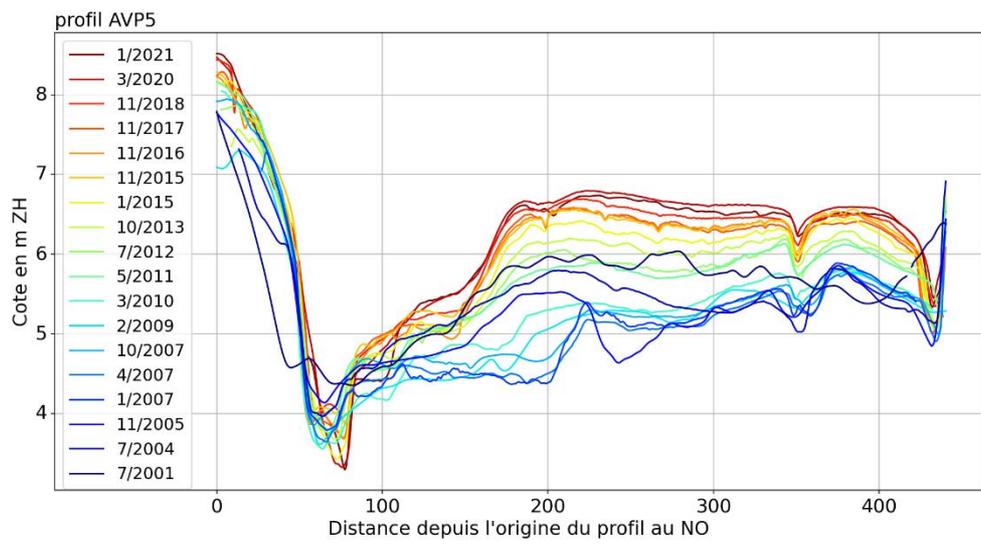
Figure 8-9. Différentiels bathymétriques entre les levés bathymétriques successifs mis à disposition par la CCI sur la zone amont incluant le port de plaisance, les bassins à flot, et le déversoir. Fond de plan : orthophotographie géoportail 2018. Projection : Lambert 93 (epsg 2154).

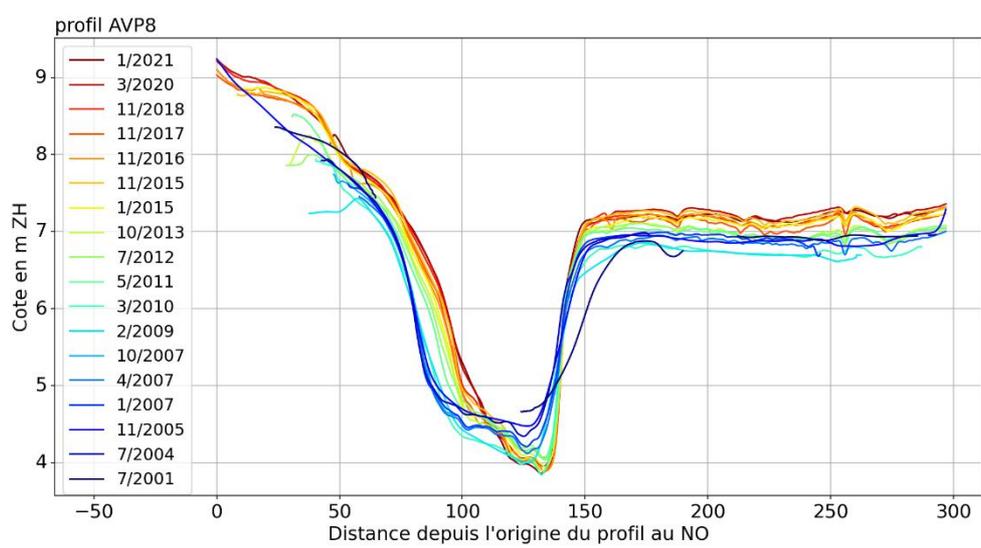
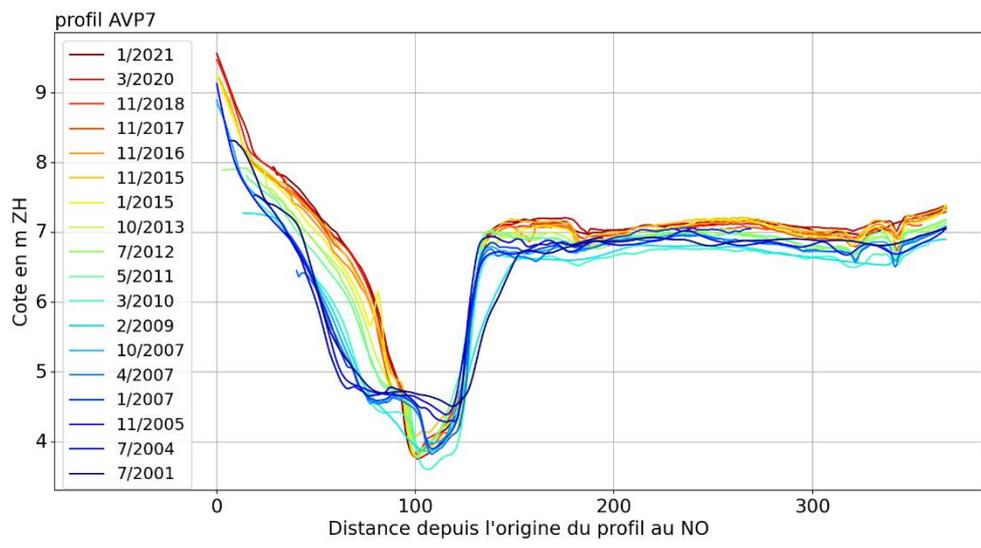
8.4 ANNEXE 4 : COMPLEMENT SUR LES COMPARAISONS DES LEVES – ANALYSES PAR PROFILS, SECTEUR DE L'AVANT-PORT/ZONE EXTERIEURE

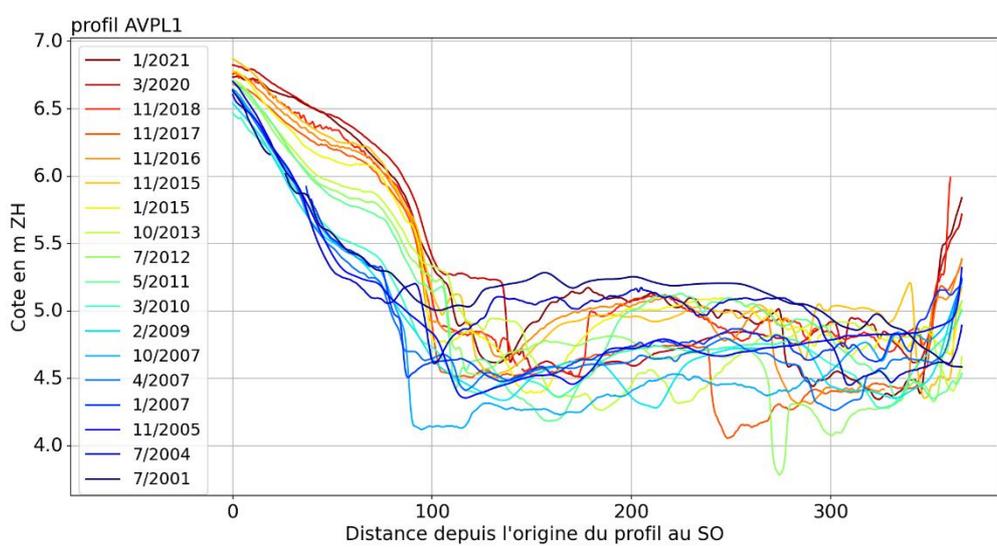
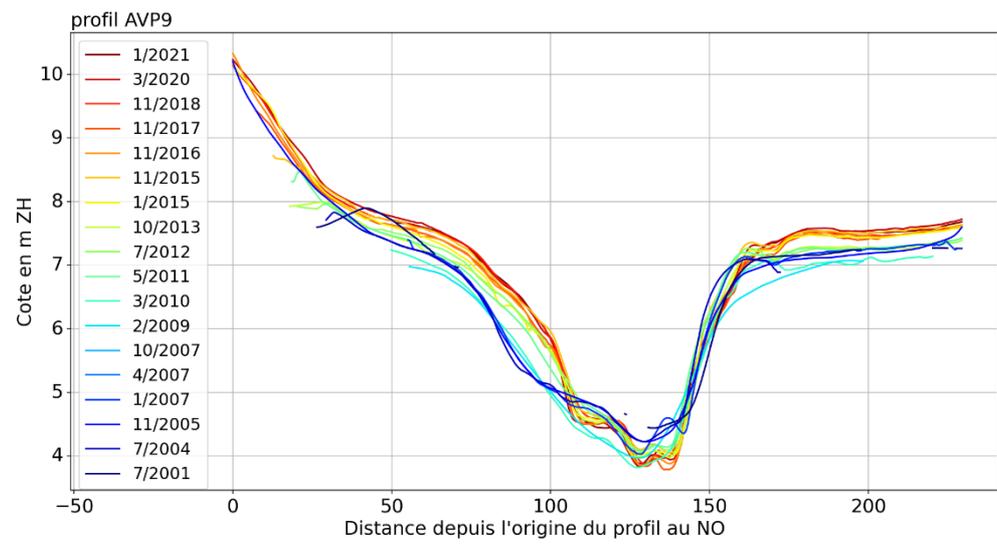
Les comparaisons des levés de la CCI (1983 à 2021) sont illustrées pour l'ensemble des profils définis sur le secteur de l'avant-port et de la zone extérieure (cf. Figure 2-49).

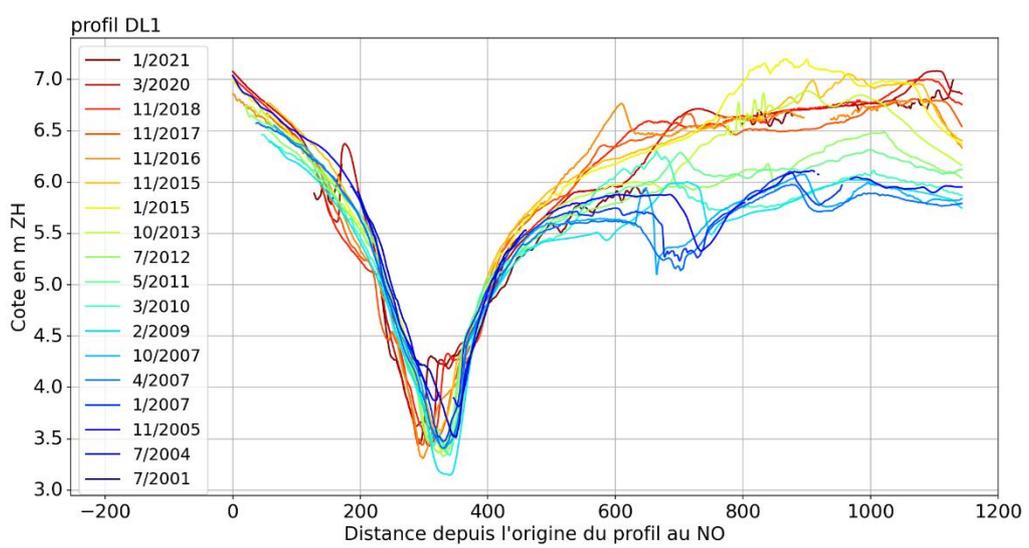
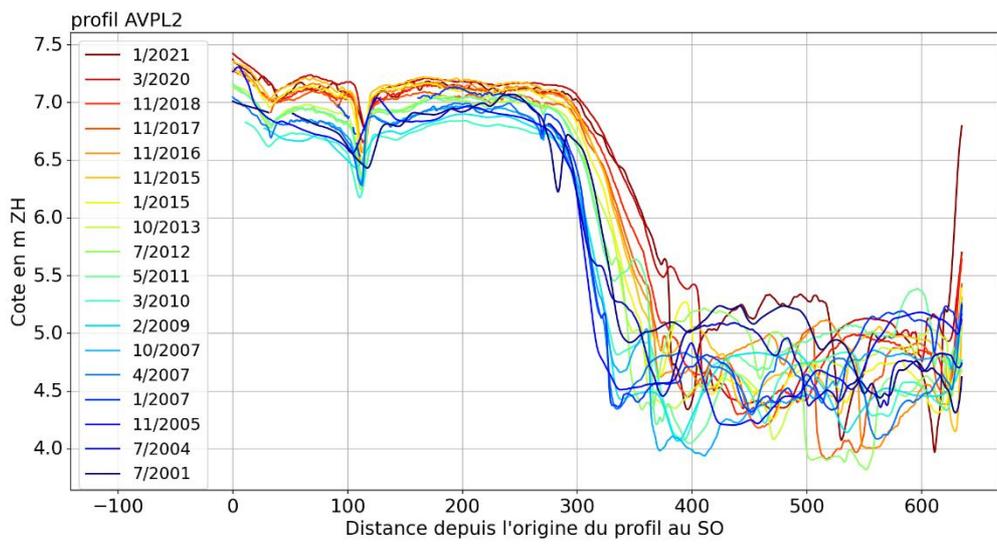


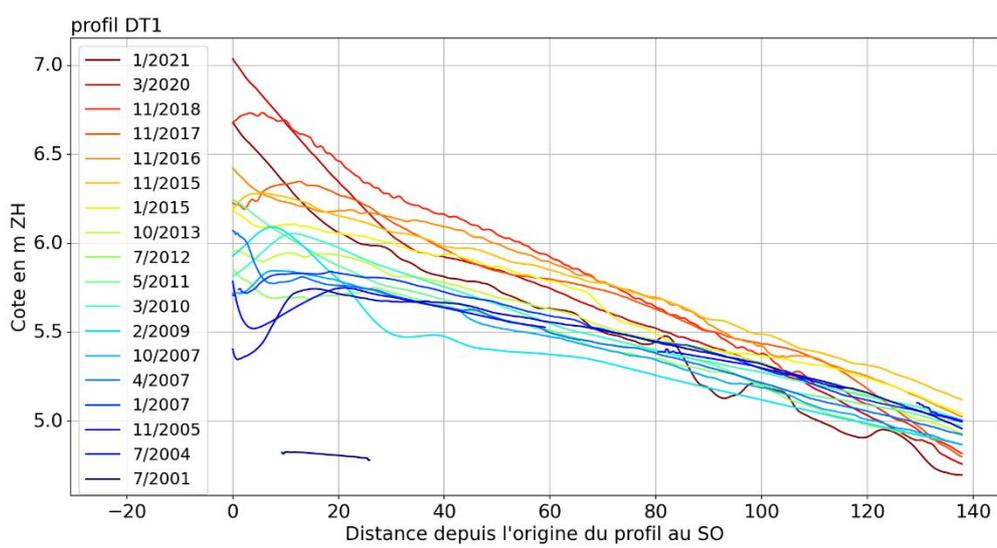
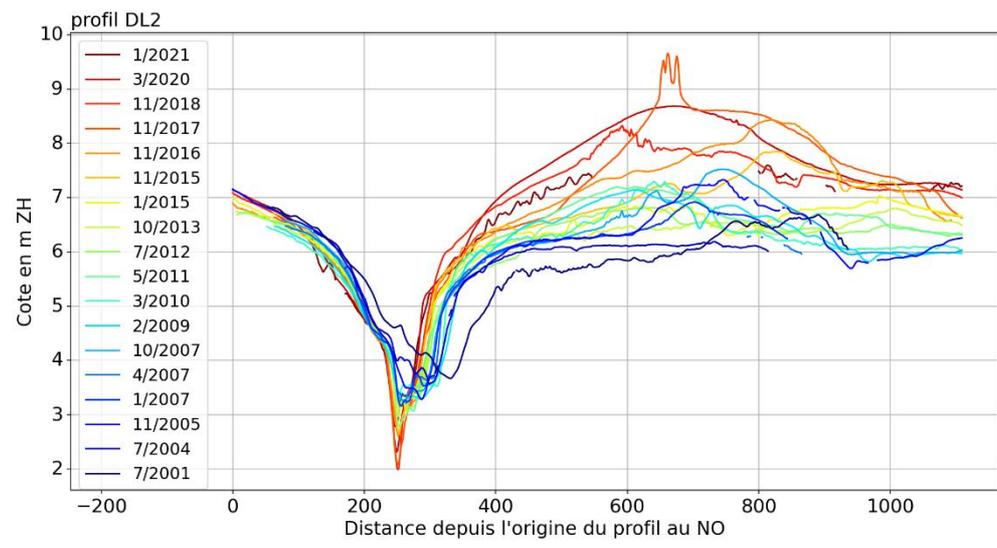


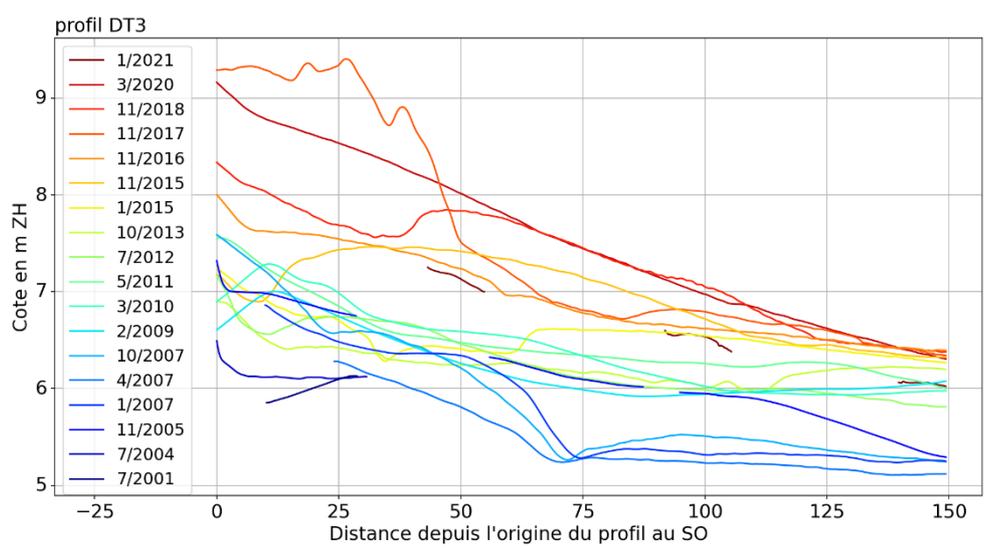
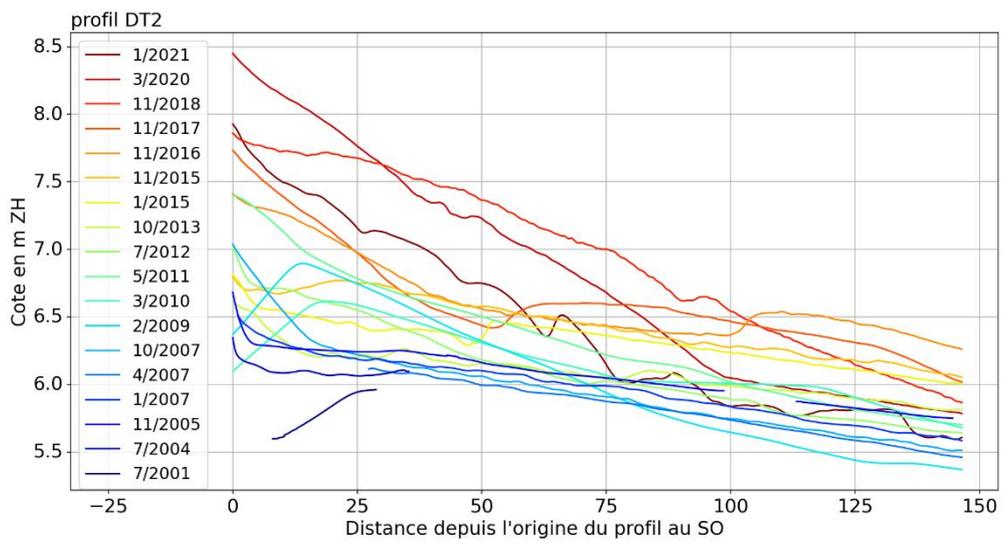


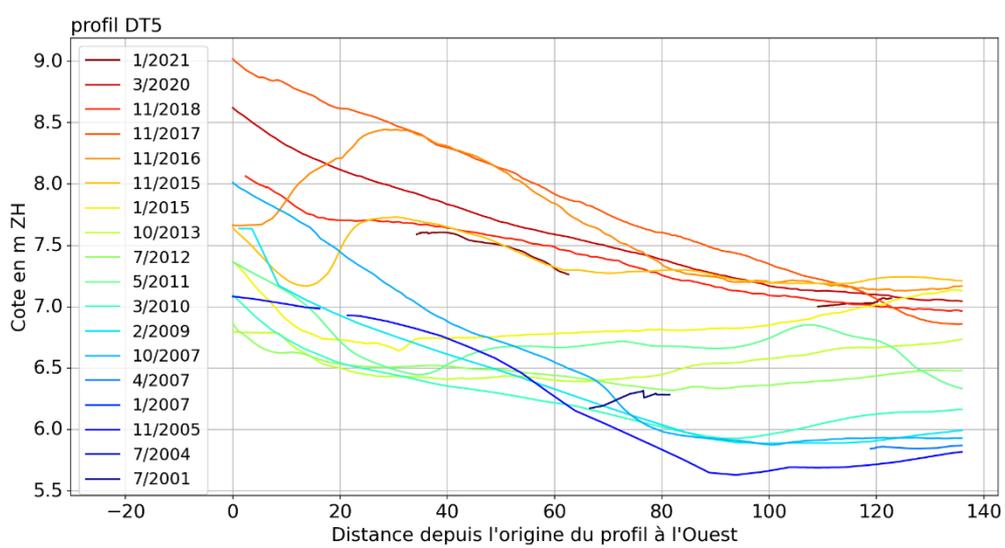
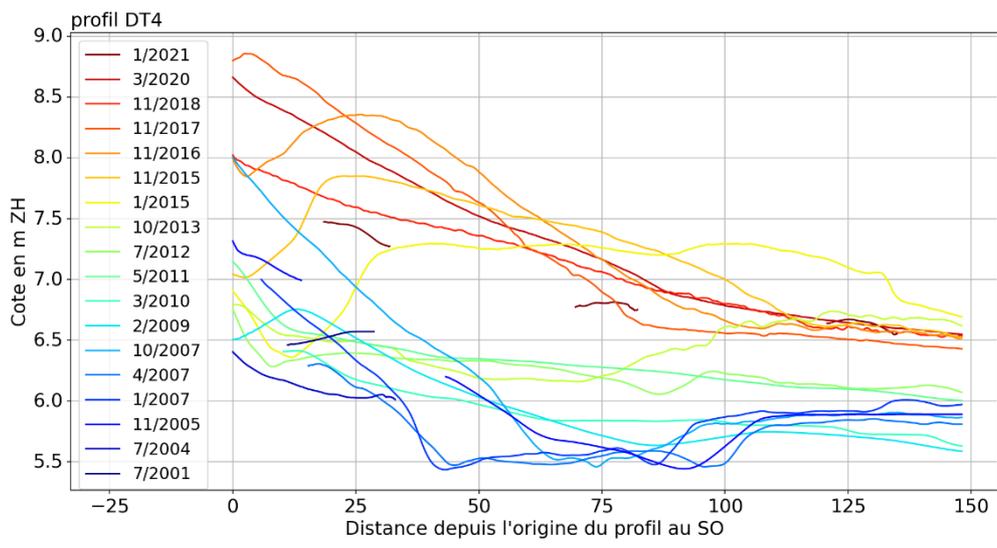


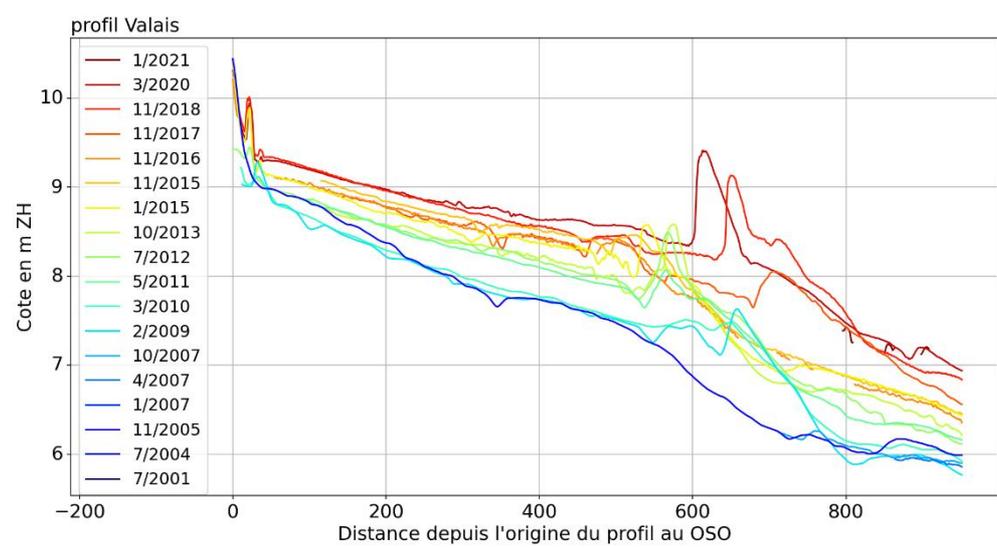
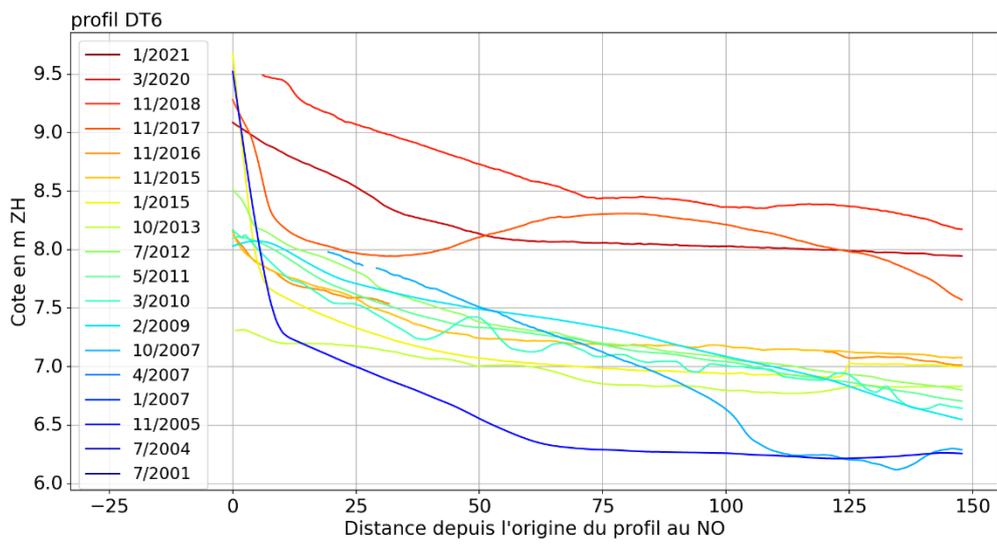












8.5 ANNEXE 5 : COMPLEMENTS SUR LES ANALYSES PAR ZONES SUR LE SECTEUR DE L'AVANT-PORT/ZONE EXTERIEURE

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

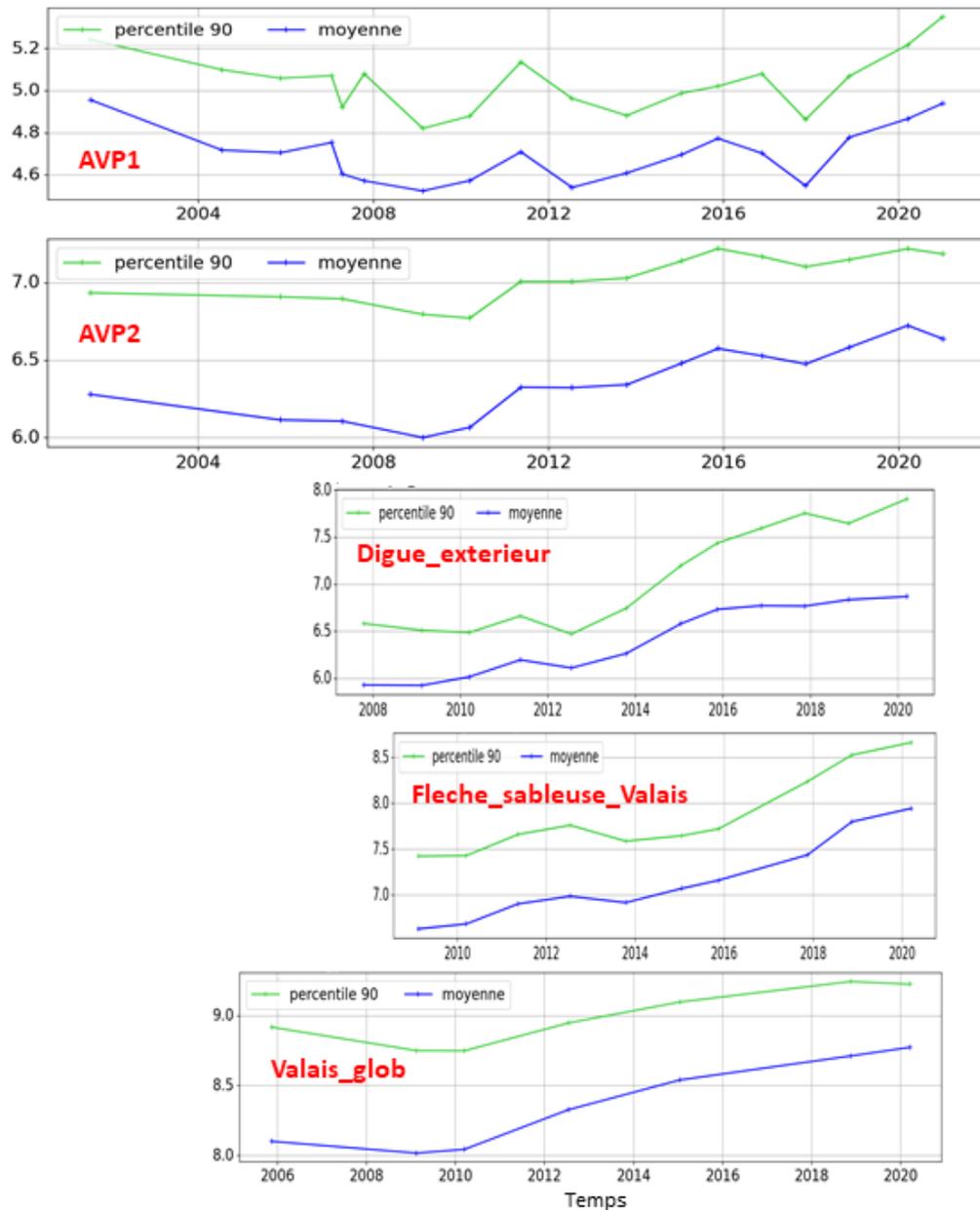


Figure 8-10. Evolution au cours du temps des cotes bathymétriques (moyenne, percentile 90 et maximale) pour l'ensemble des zones du secteur aval (incluant l'avant-port, devant le môle et le secteur de la plage de Valais).

8.6 ANNEXE 6 : CONCENTRATION EN MES AU COURS D'UNE MAREE DE VIVE-EAU (02/02/2018, COEFFICIENT 109) LIEE AUX DEPOTS DES SEDIMENTS DRAGUES

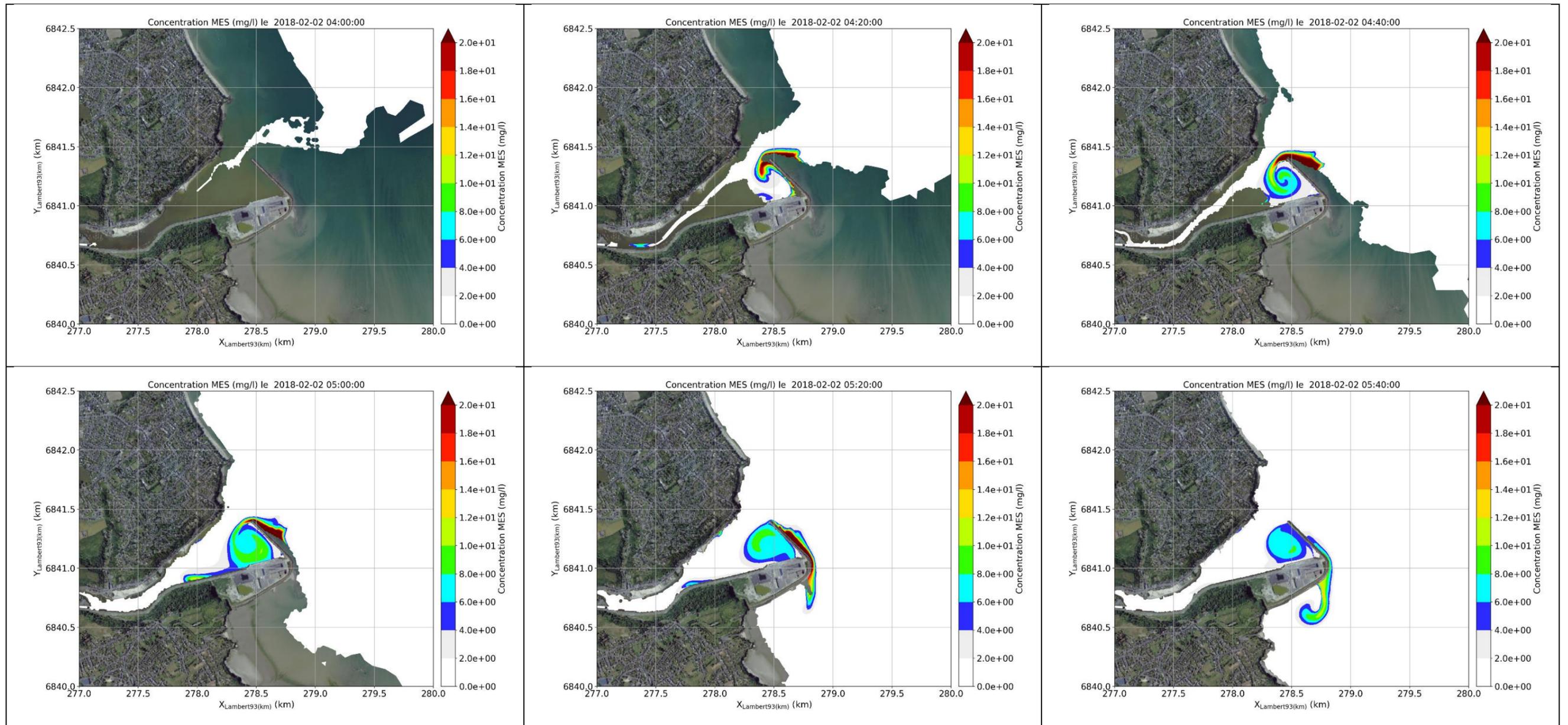


Figure 8-11 Concentration en MES au cours d'une marée de vive-eau (02/02/2018, coefficient 109) liée aux dépôts des sédiments dragués – Marée montante

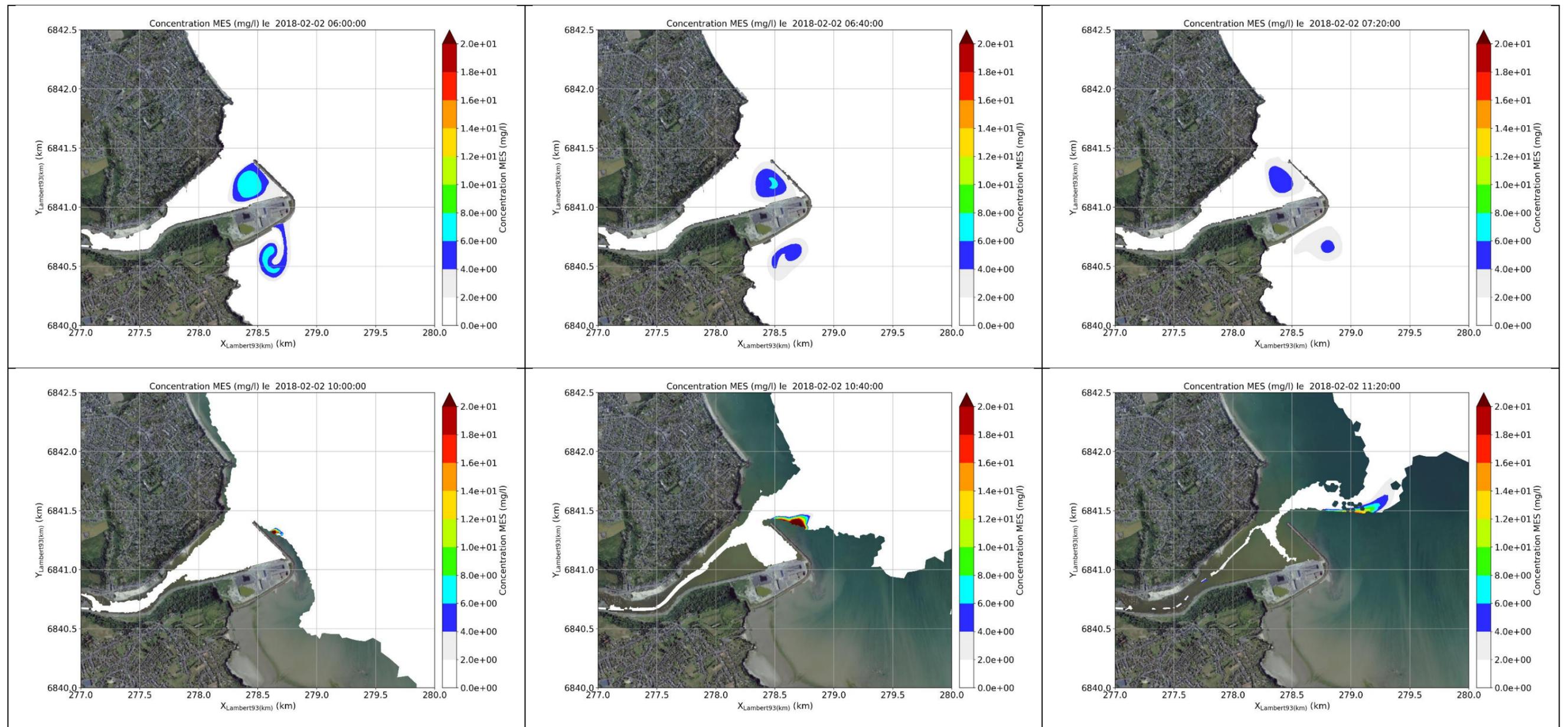


Figure 8-12 Concentration en MES au cours d'une marée de vive-eau (02/02/2018, coefficient 109) liée aux dépôts des sédiments dragués – Marée descendante.

8.7 ANNEXE 7 : FIGURES AU FORMAT A3 POUR LES SCENARIOS COURTS

8.7.1 COURANT

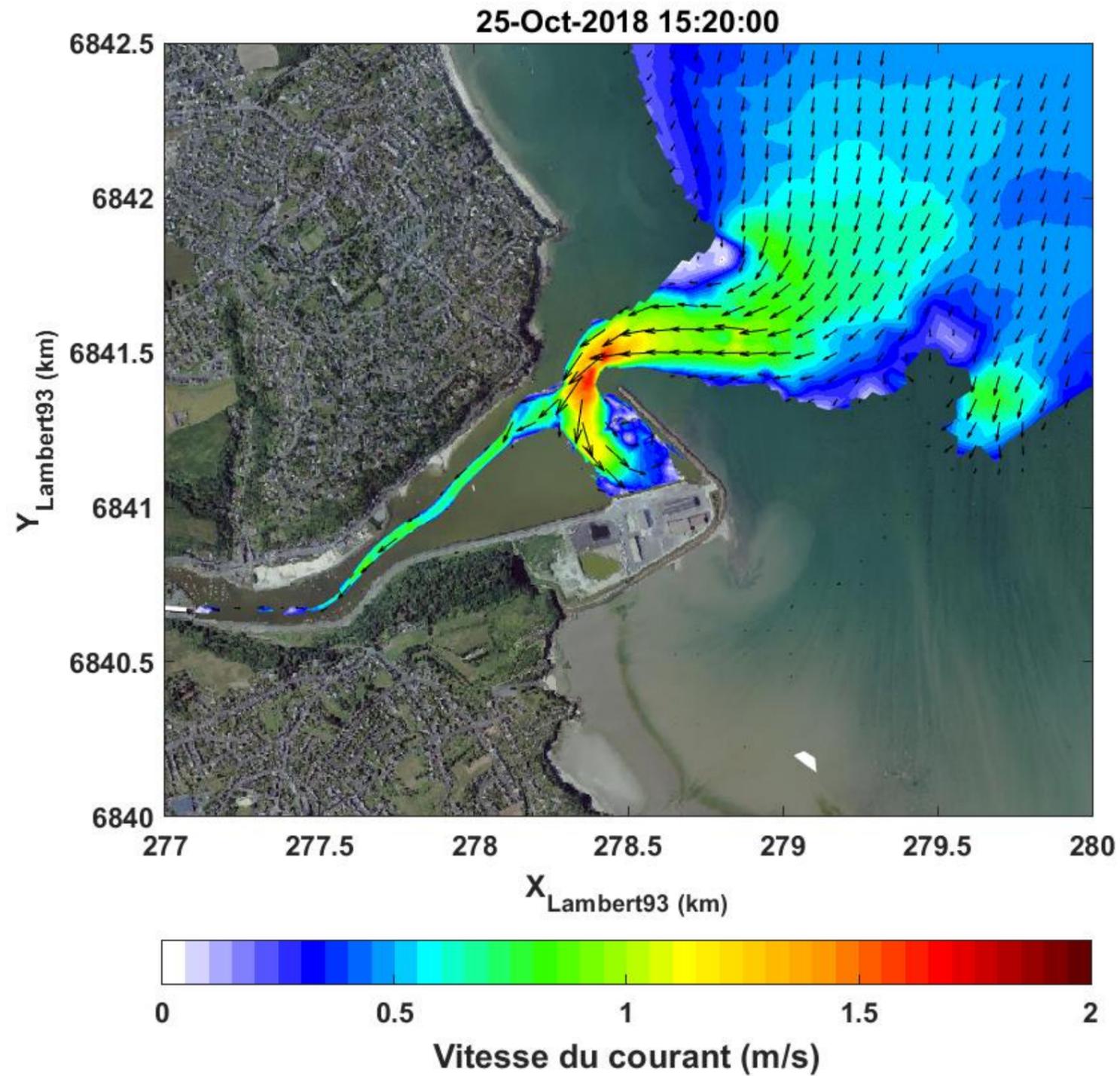


Figure 8-13 Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 1/4.

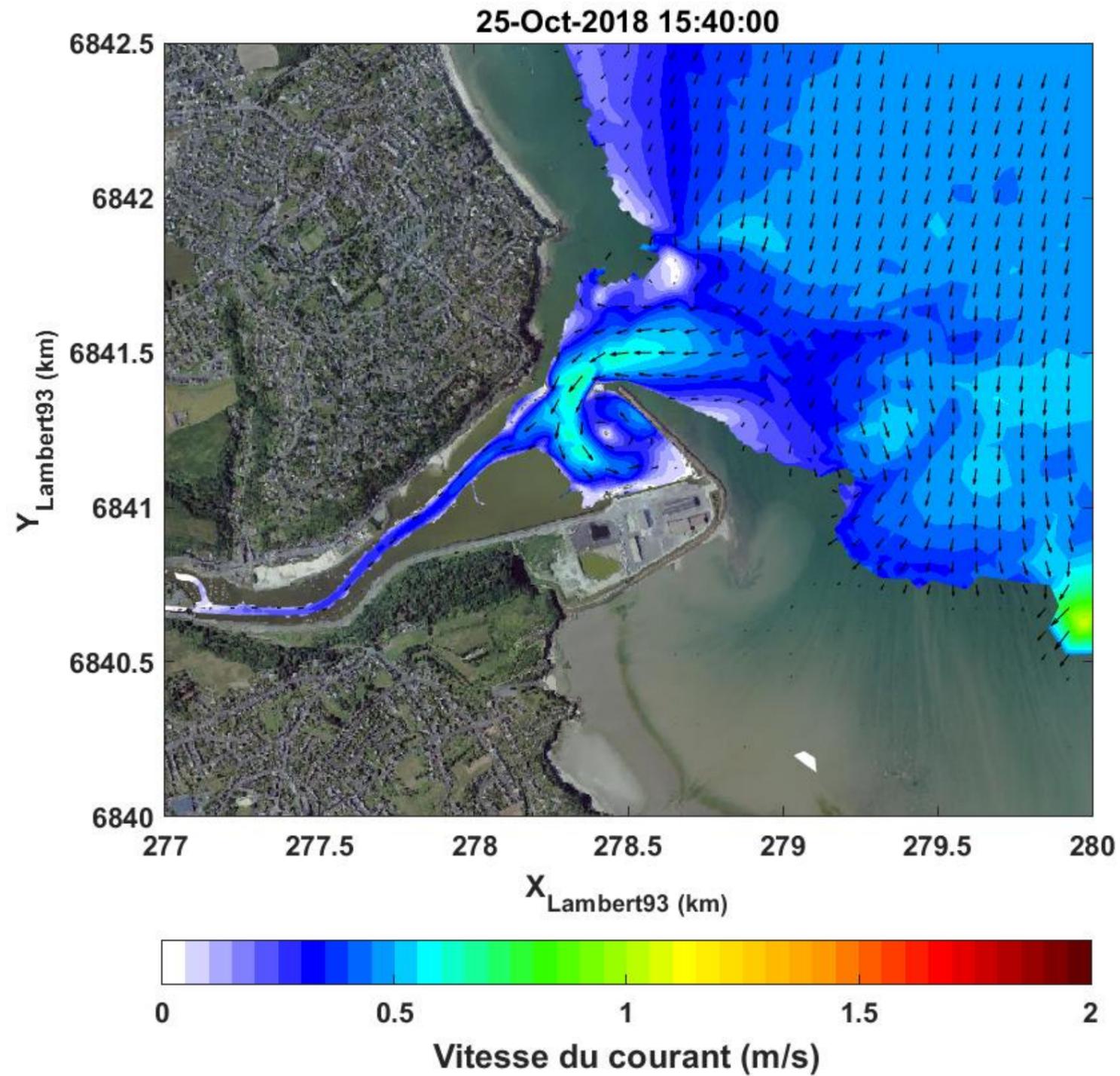


Figure 8-14: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 2/4.

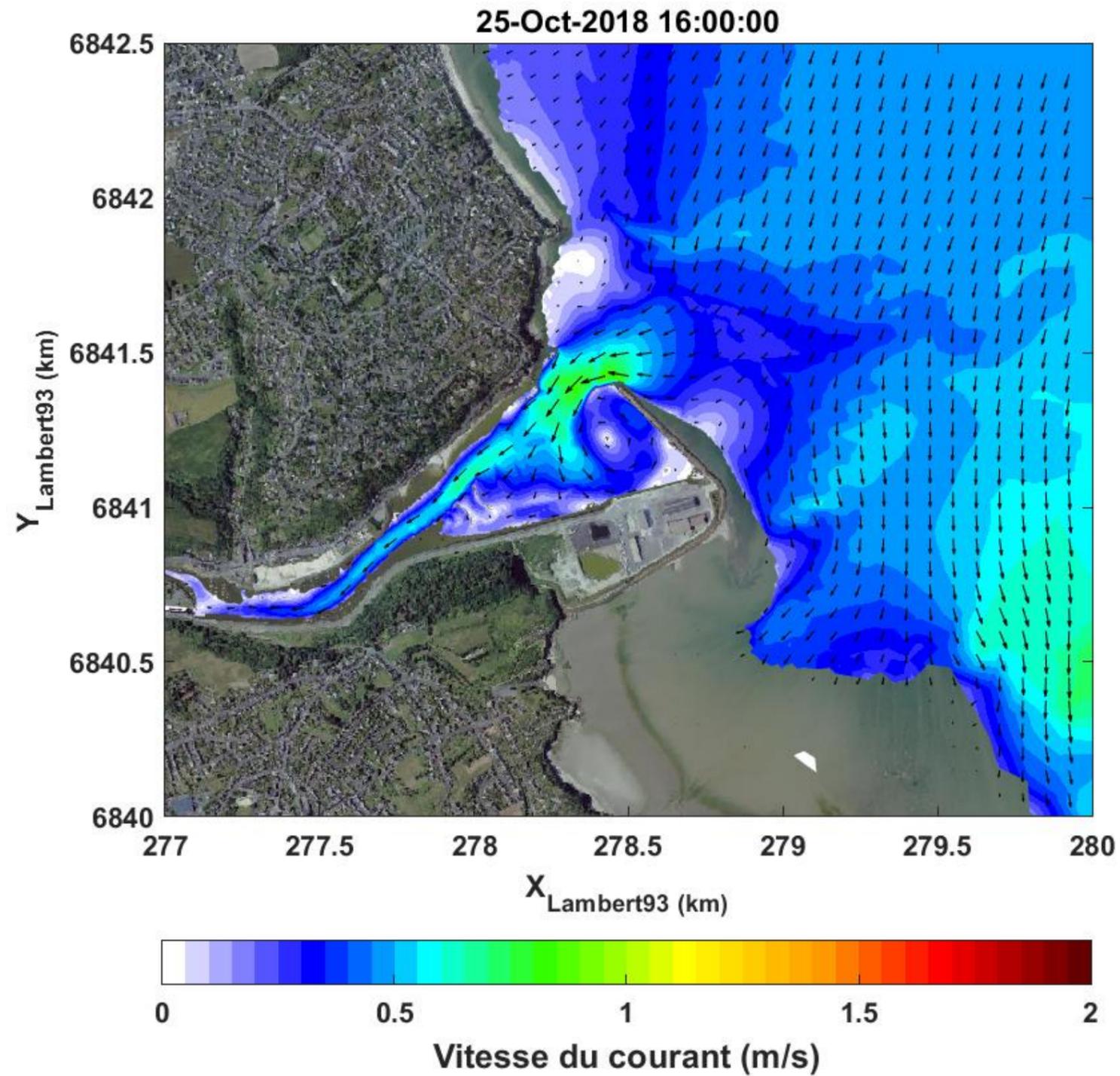


Figure 8-15: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 3/4.

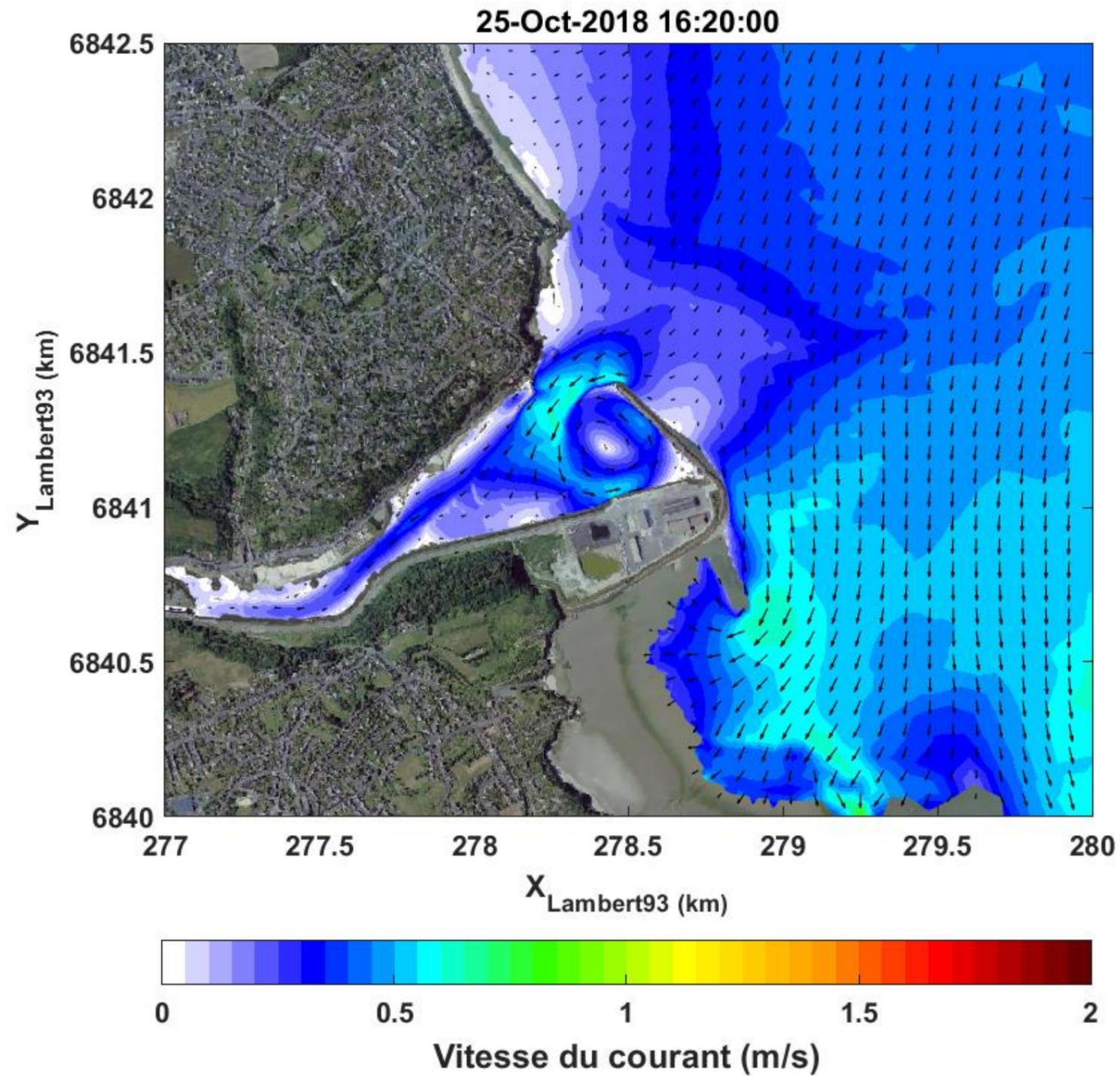


Figure 8-16: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée montante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 4/4.

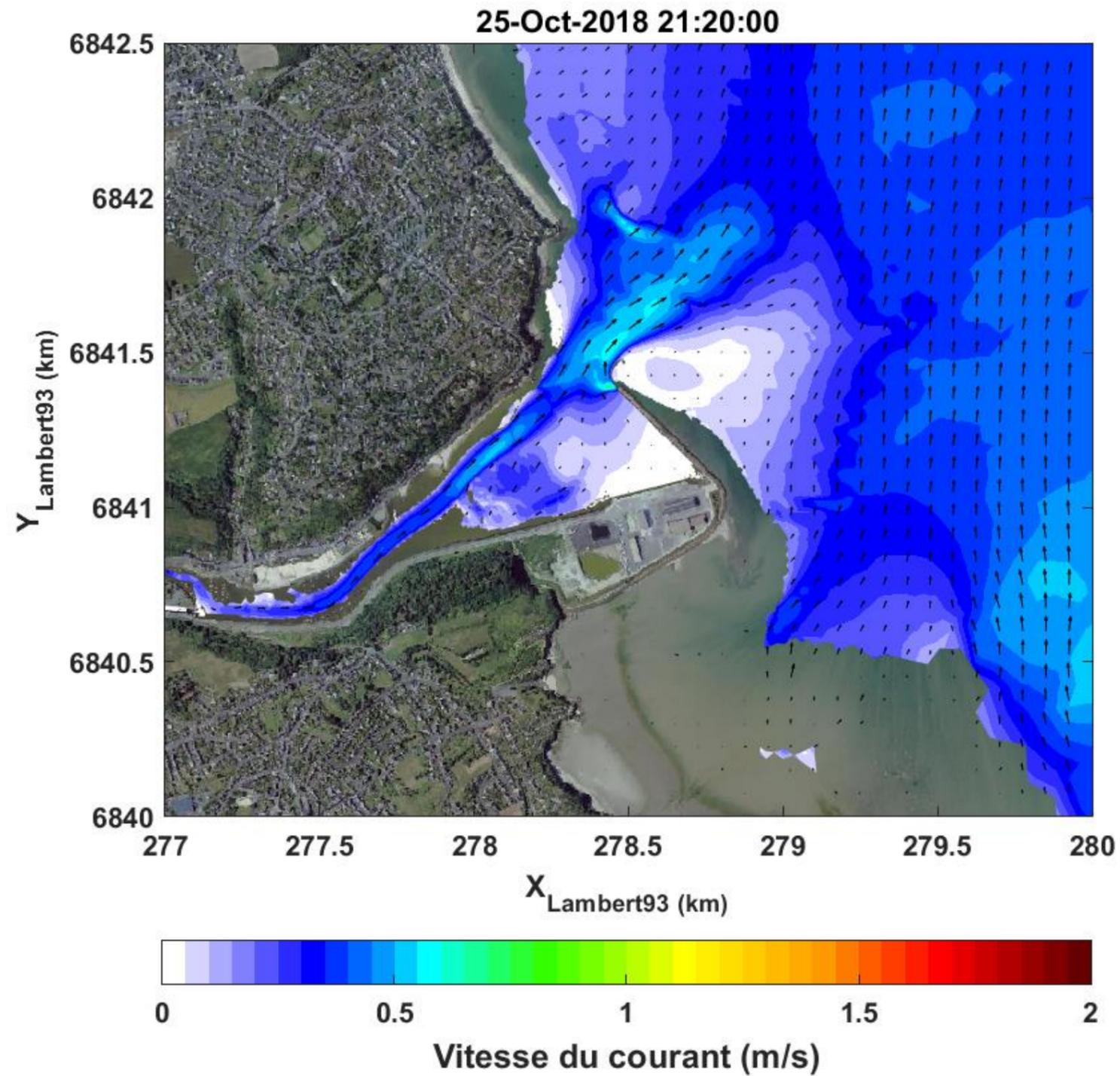


Figure 8-17: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 1/4.

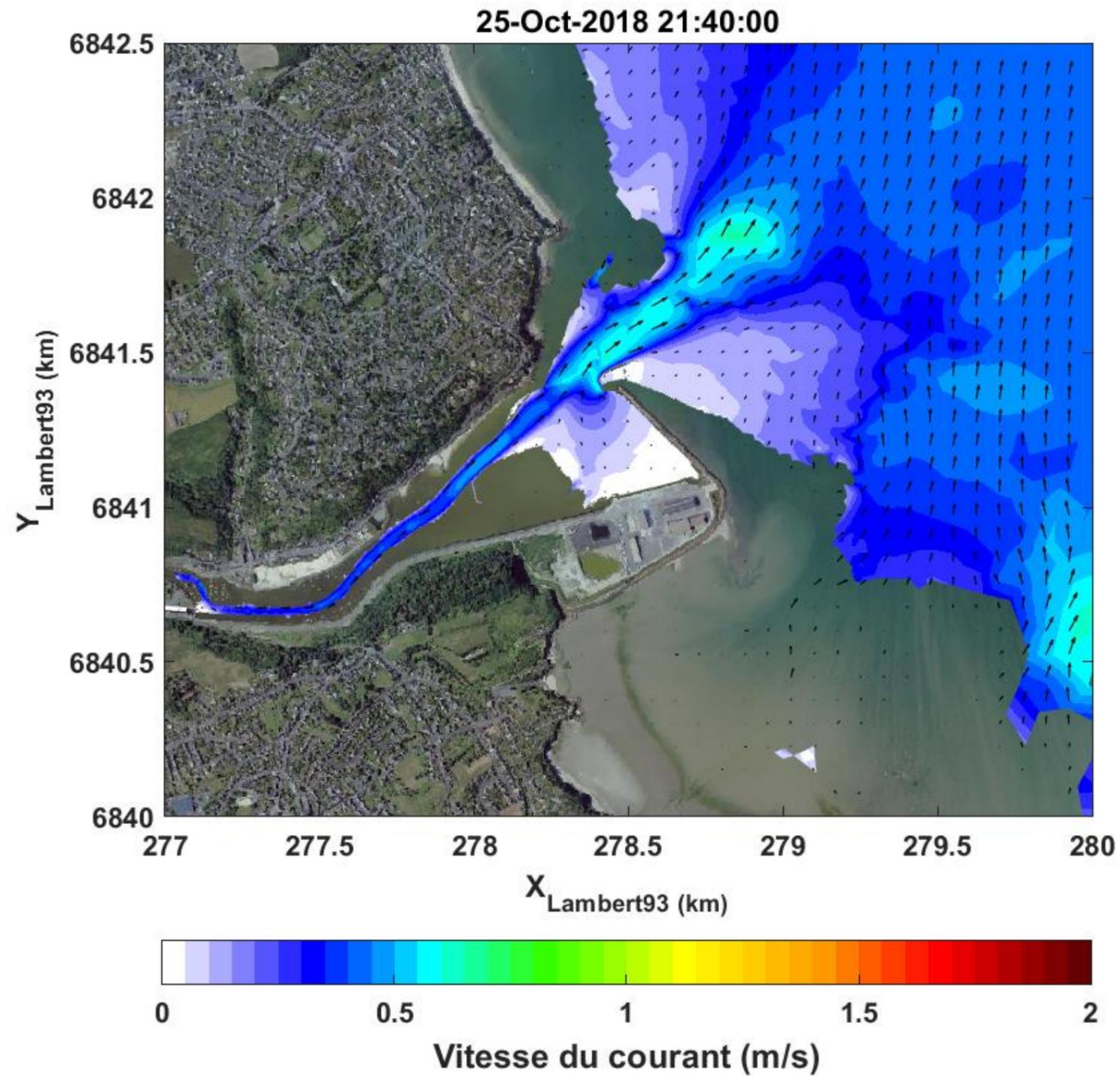


Figure 8-18: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 2/4.

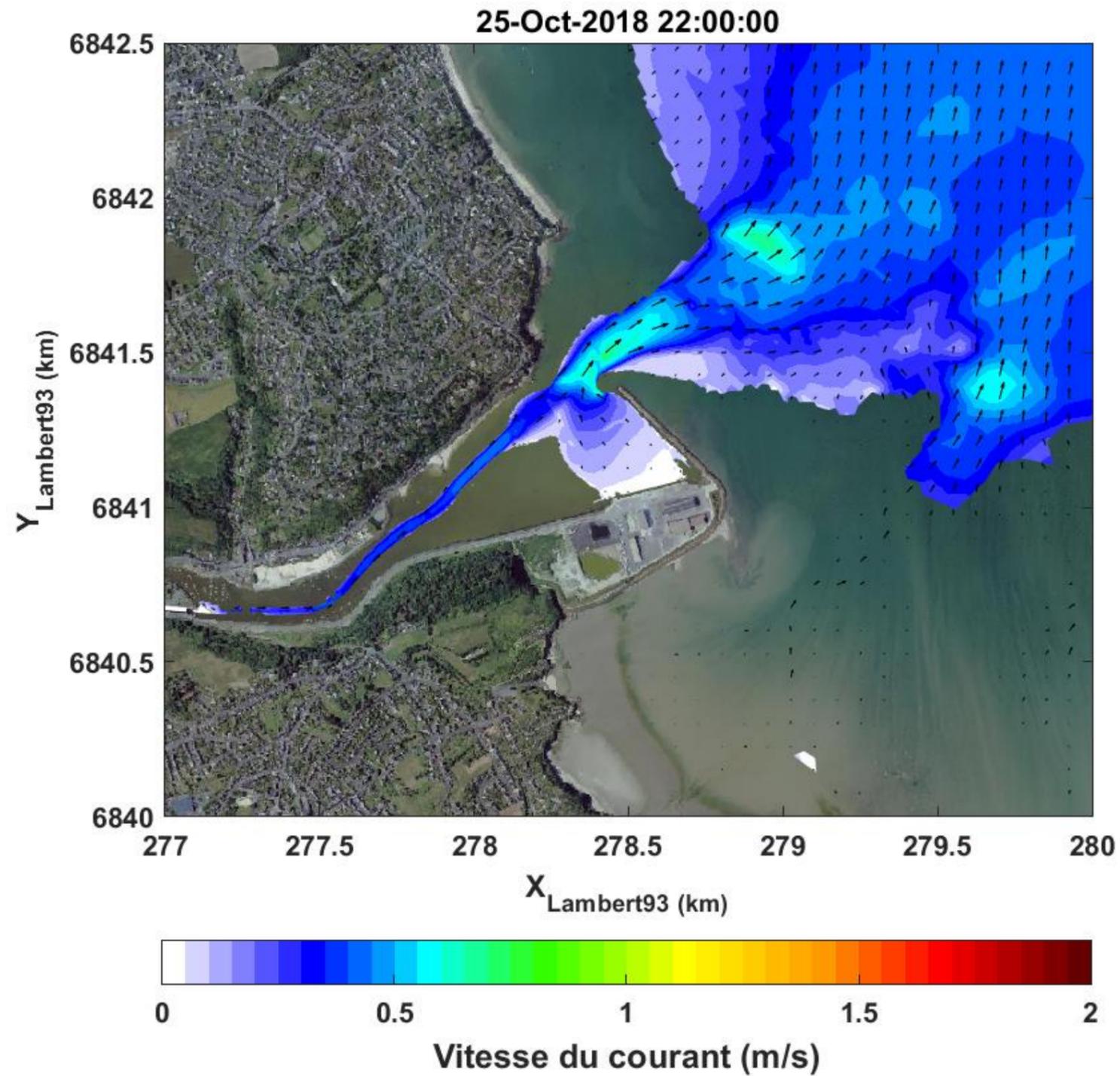


Figure 8-19: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 3/4.

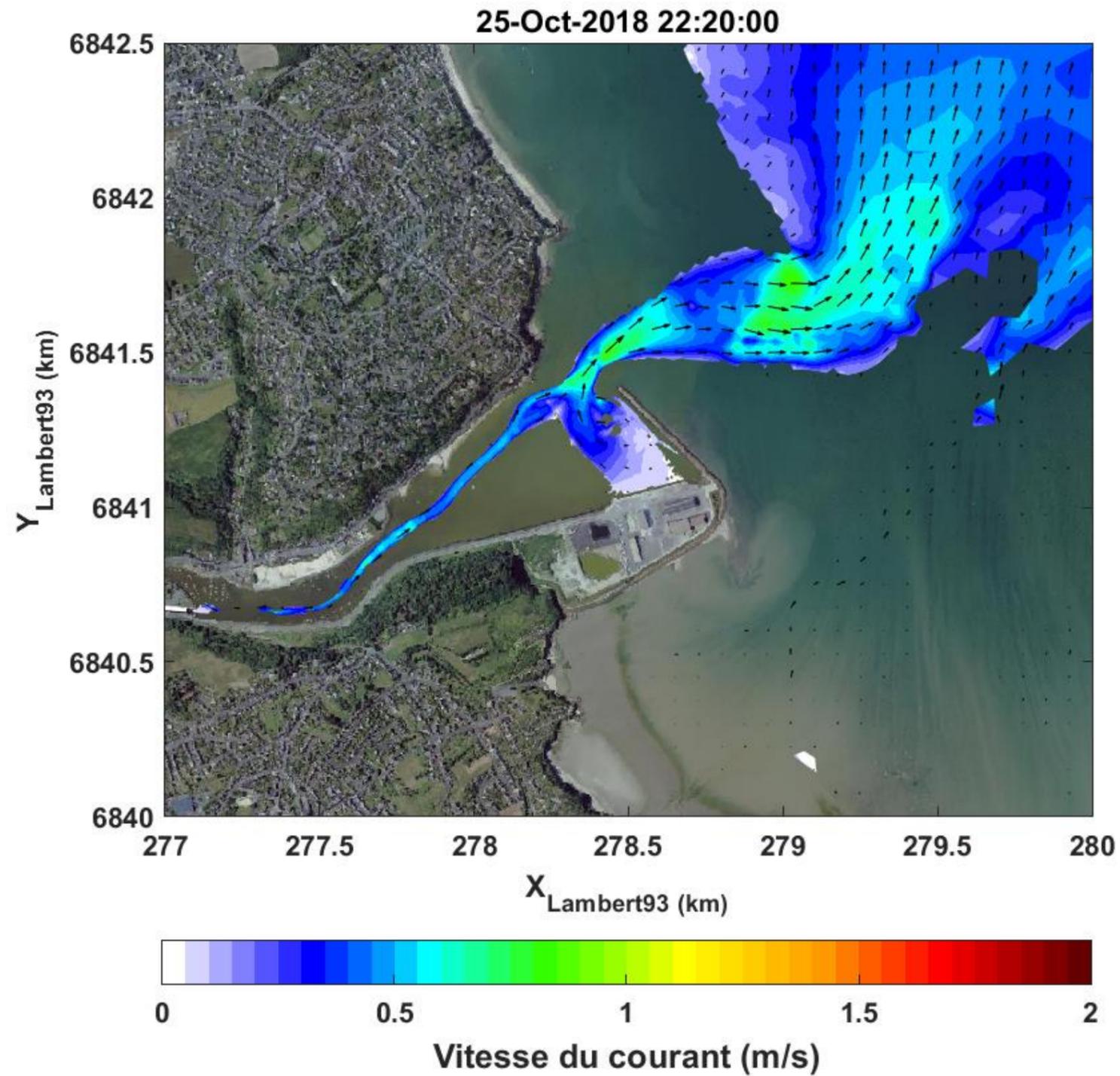


Figure 8-20: Cartographie du courant sur la zone d'étude en vive-eau moyenne à marée descendante (pleine Mer à 18h40) – Scénario 1 - 4/4.

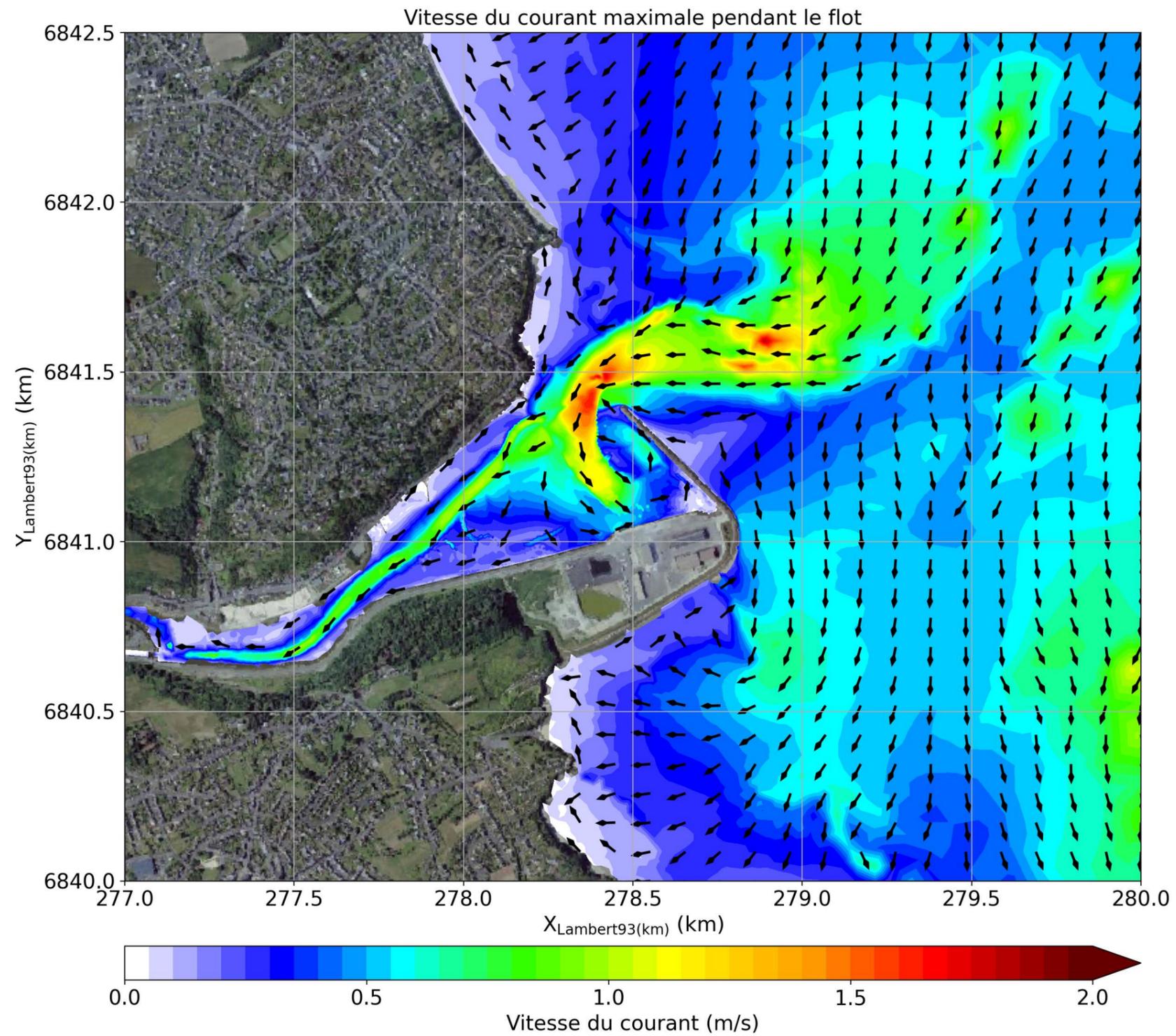


Figure 8-21: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 1.

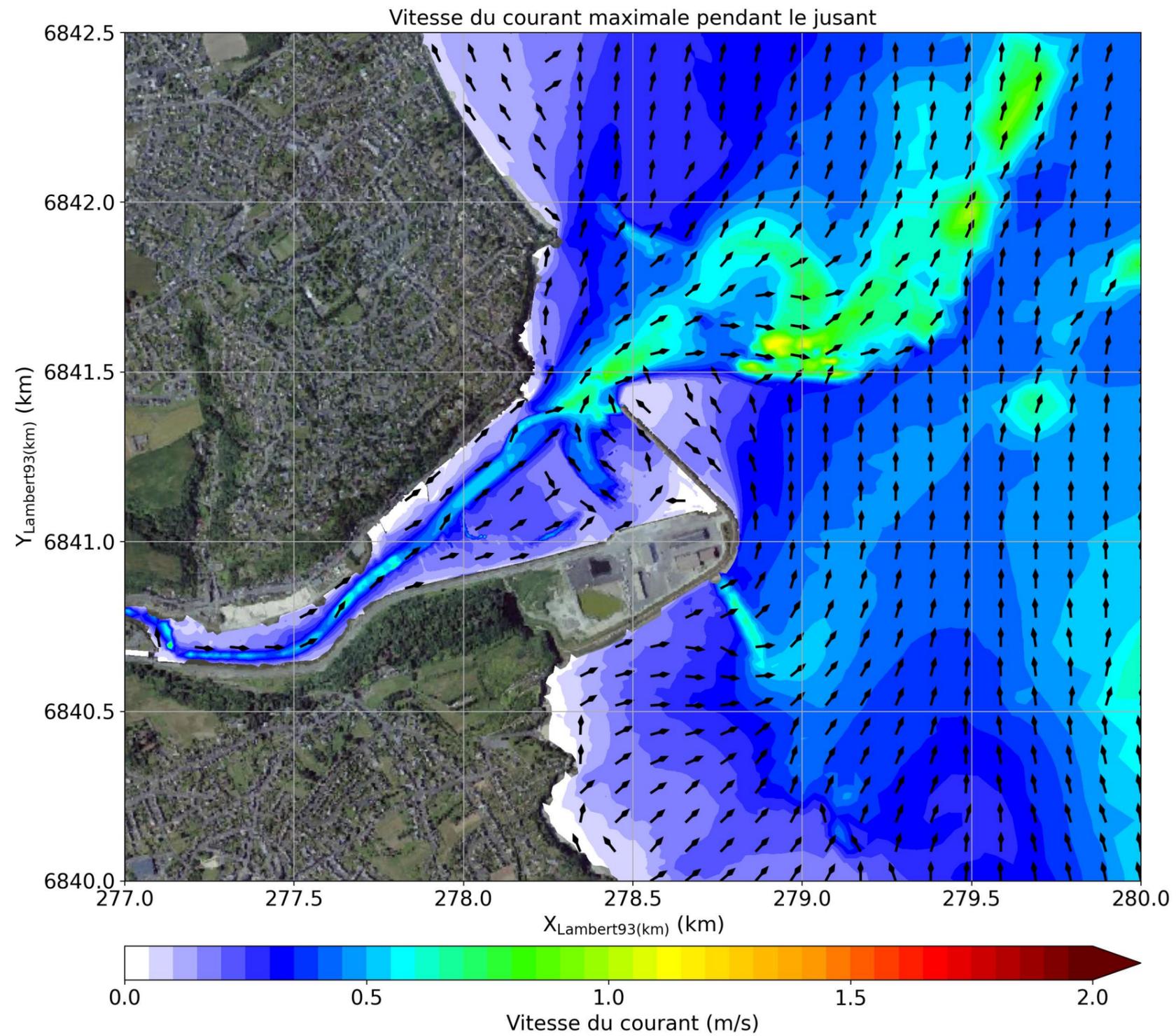


Figure 8-22: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 1.

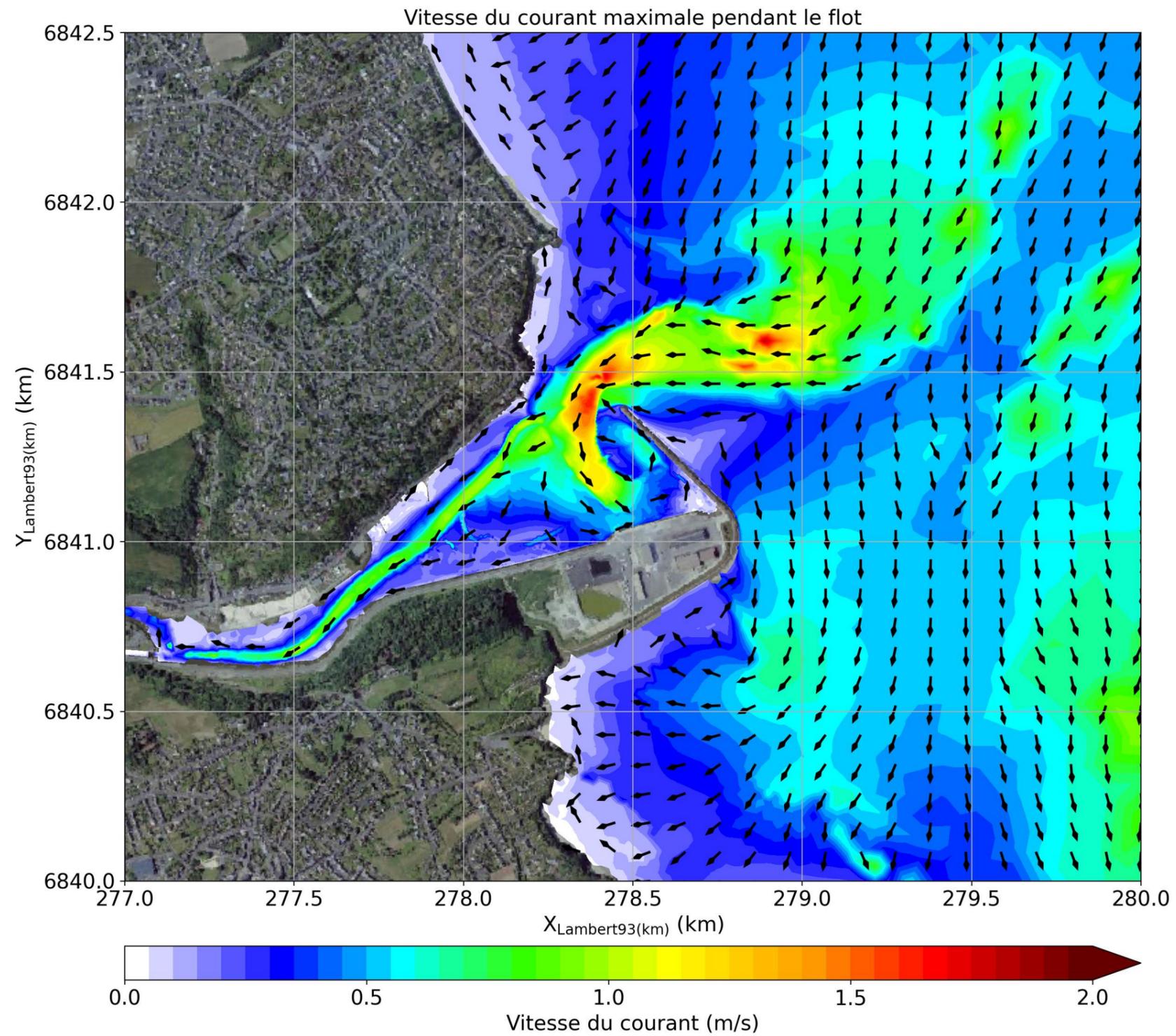


Figure 8-23: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 2.

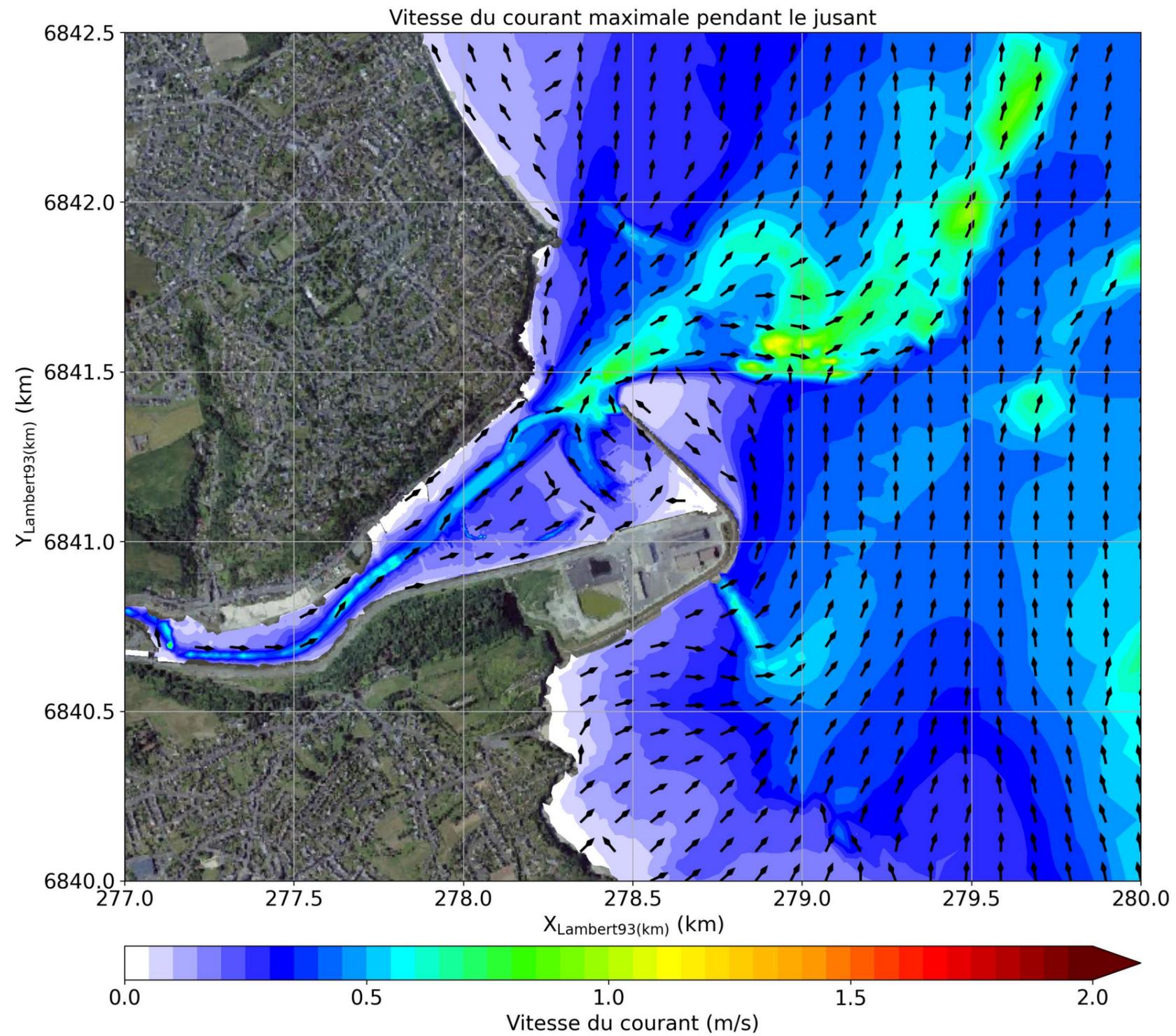


Figure 8-24: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 2.

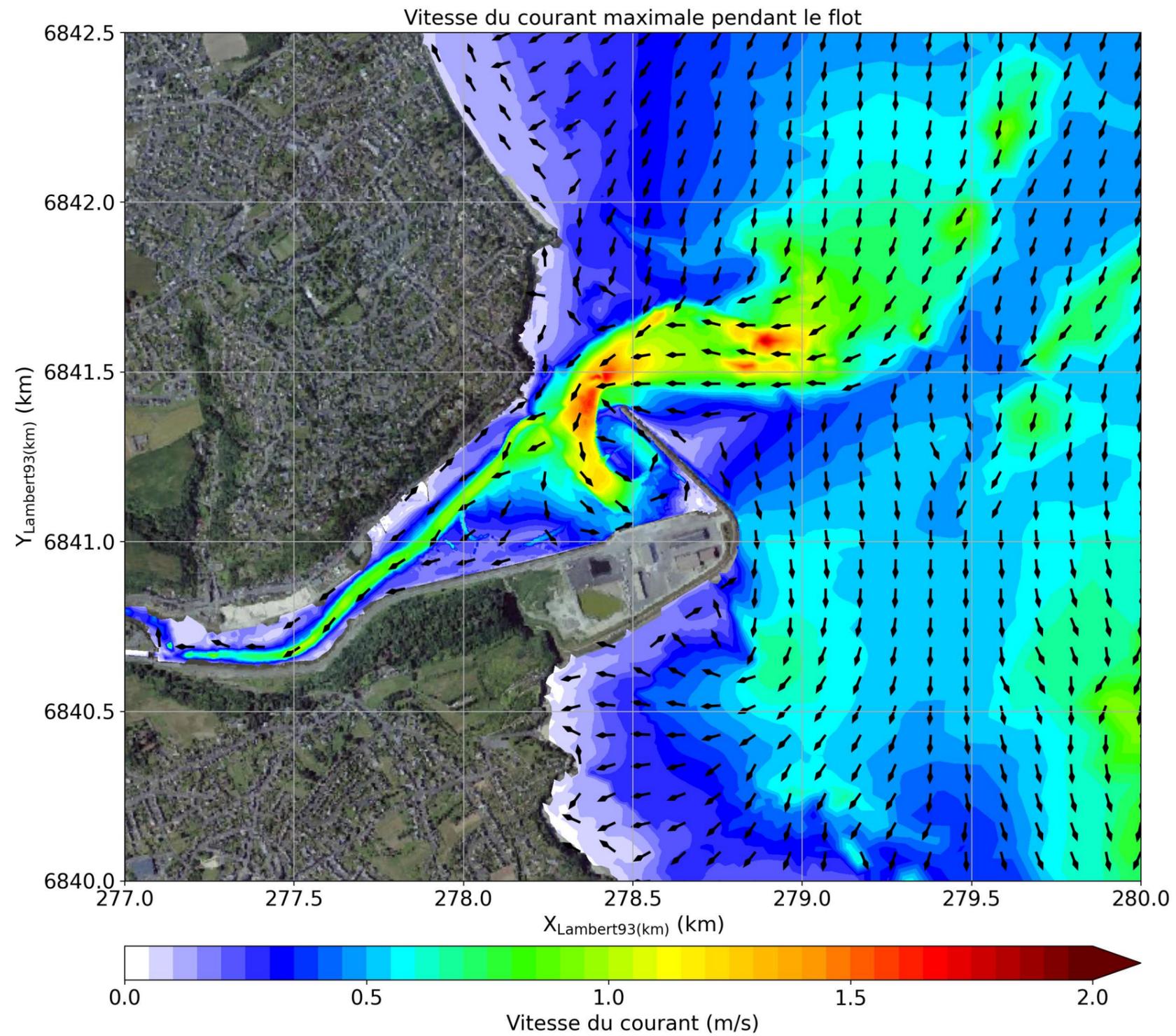


Figure 8-25: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 3.

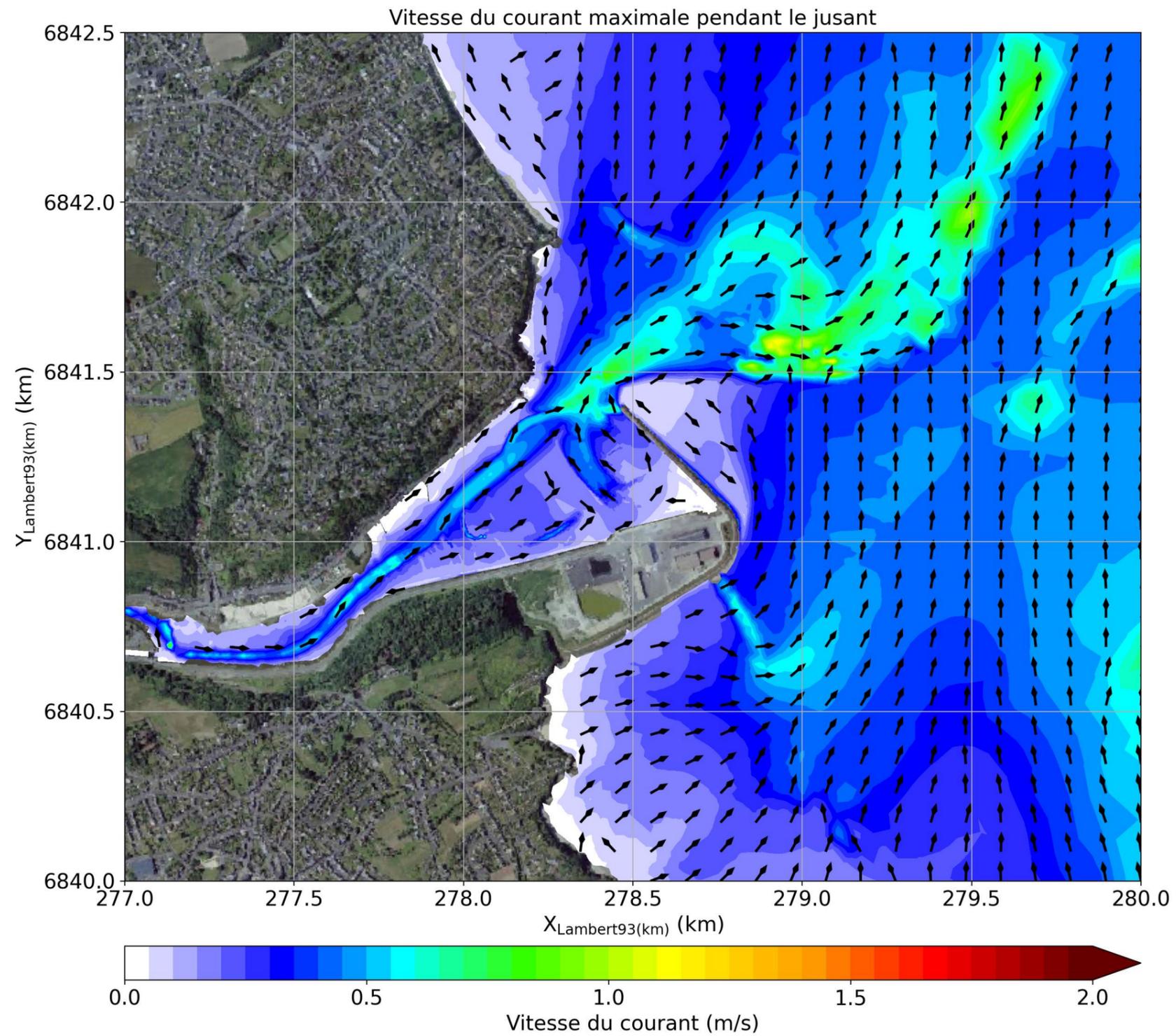


Figure 8-26: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 3.

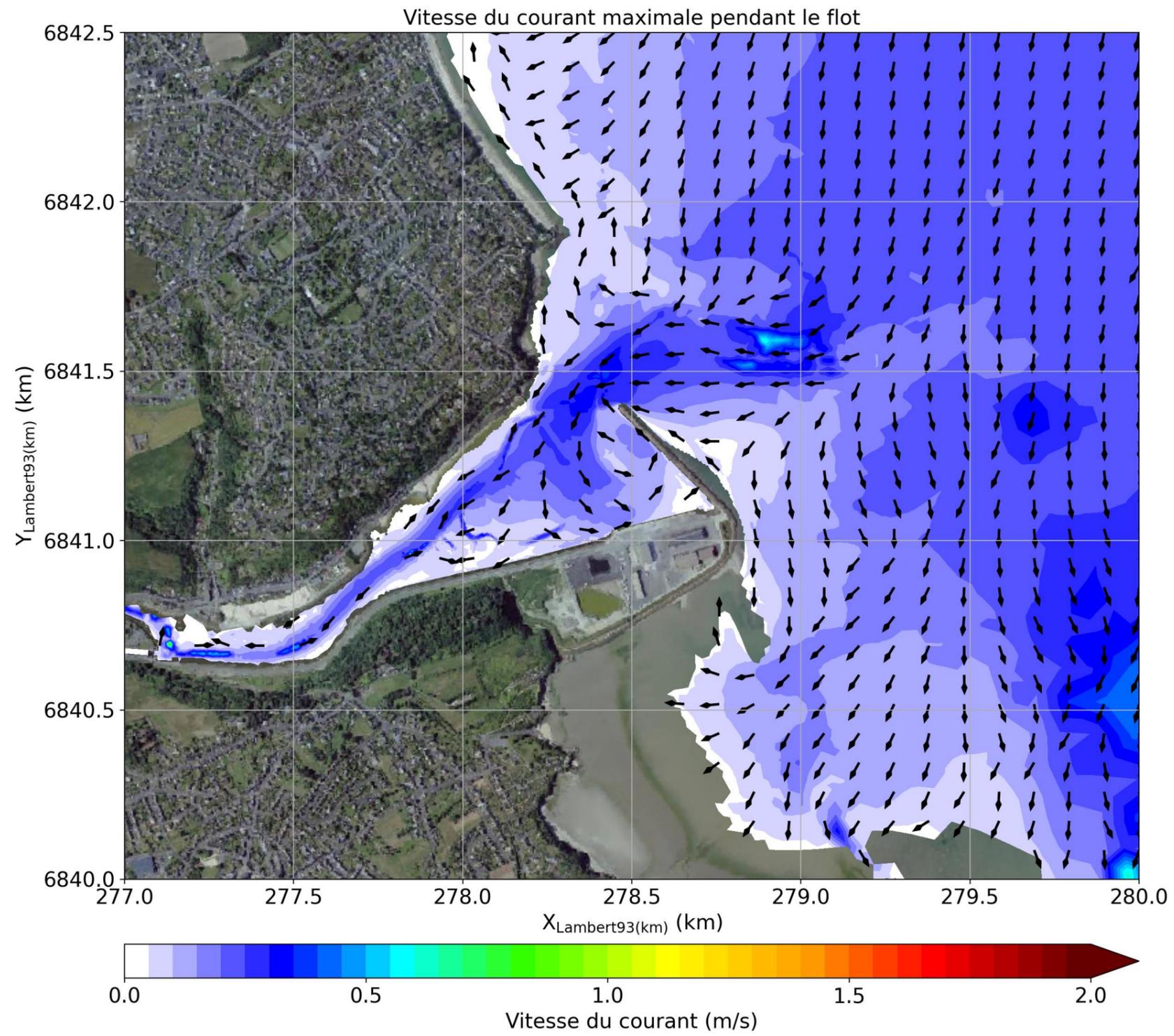


Figure 8-27: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 4.

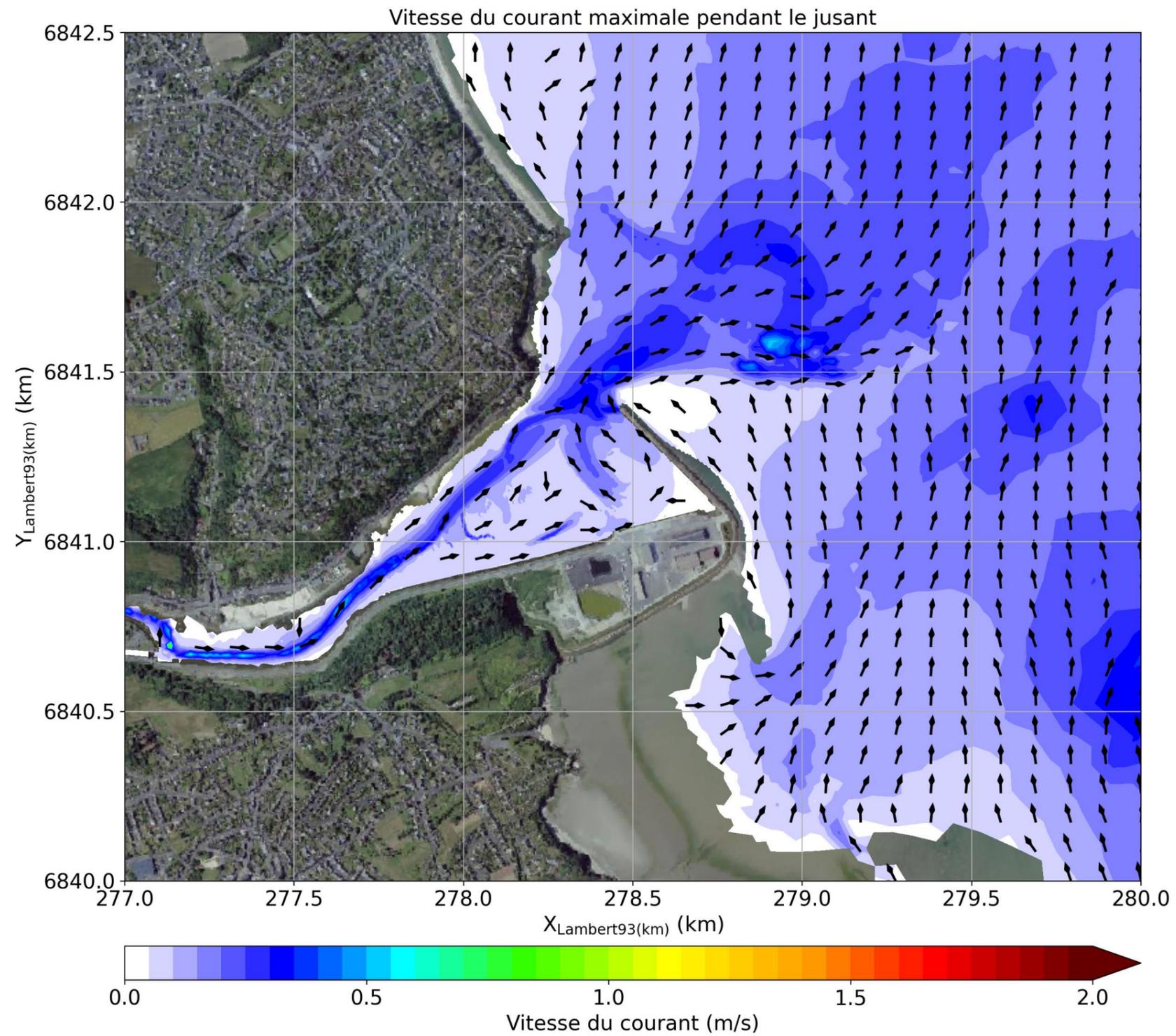


Figure 8-28: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 4.

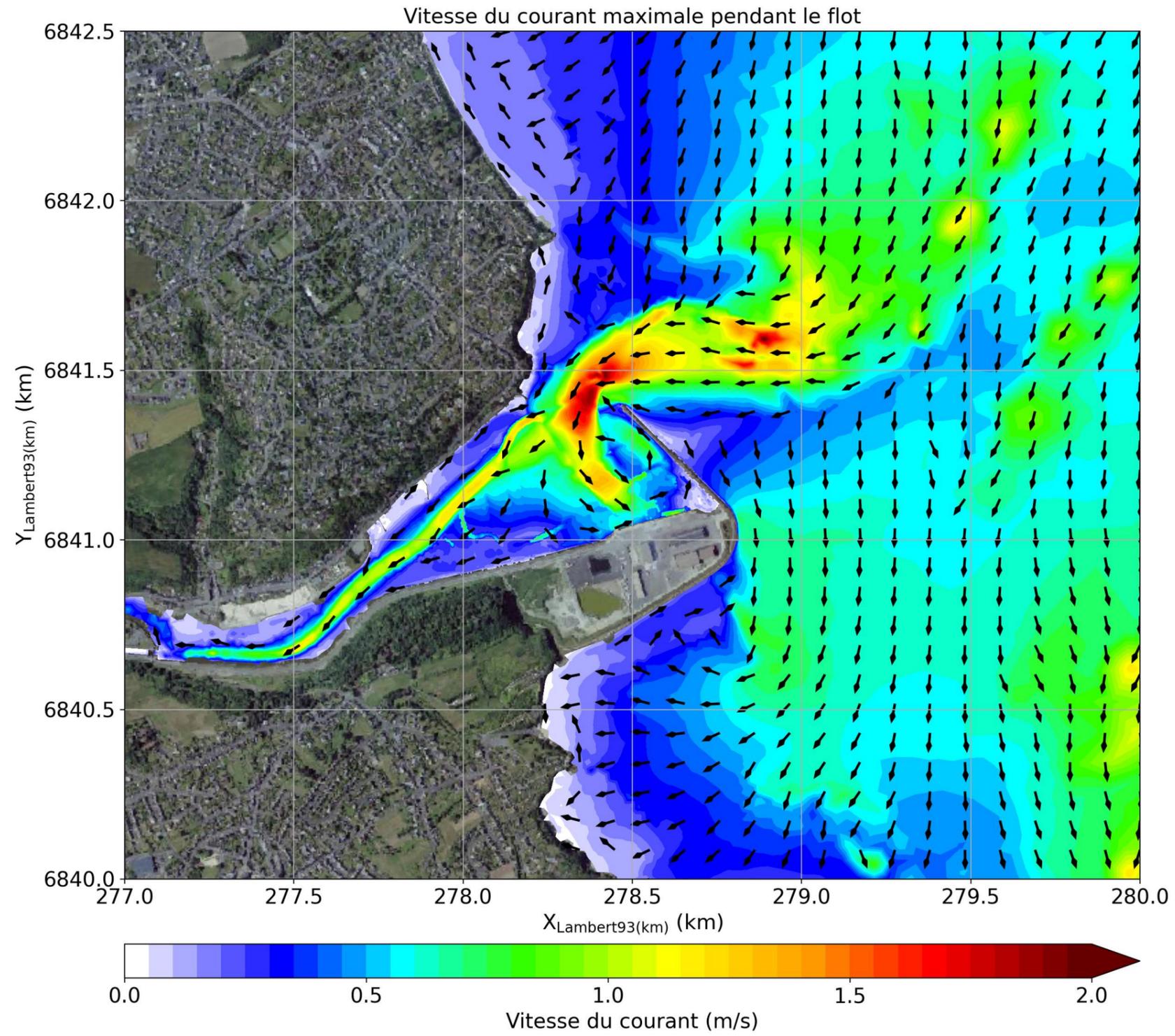


Figure 8-29: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 5.

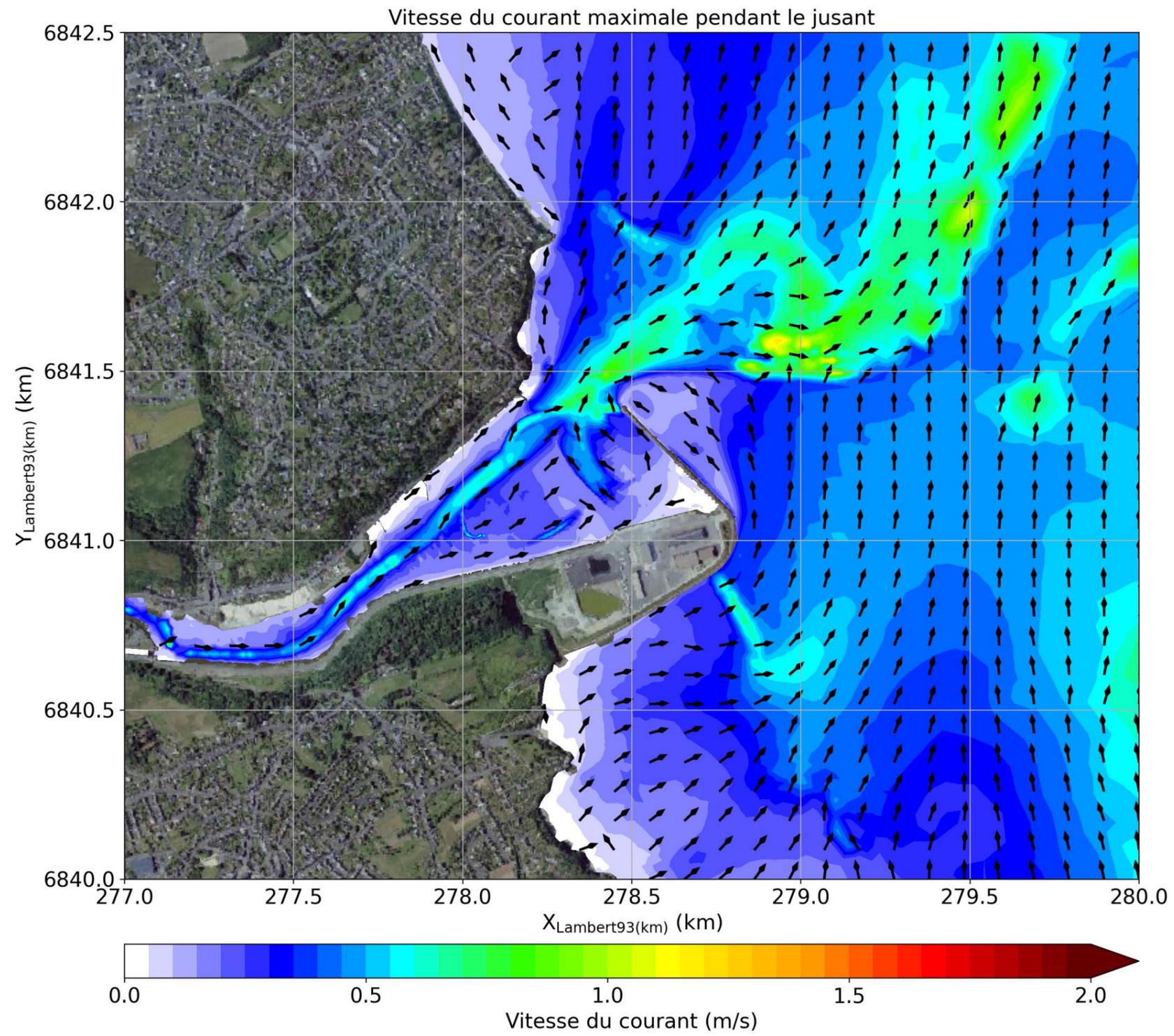


Figure 8-30: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 5.

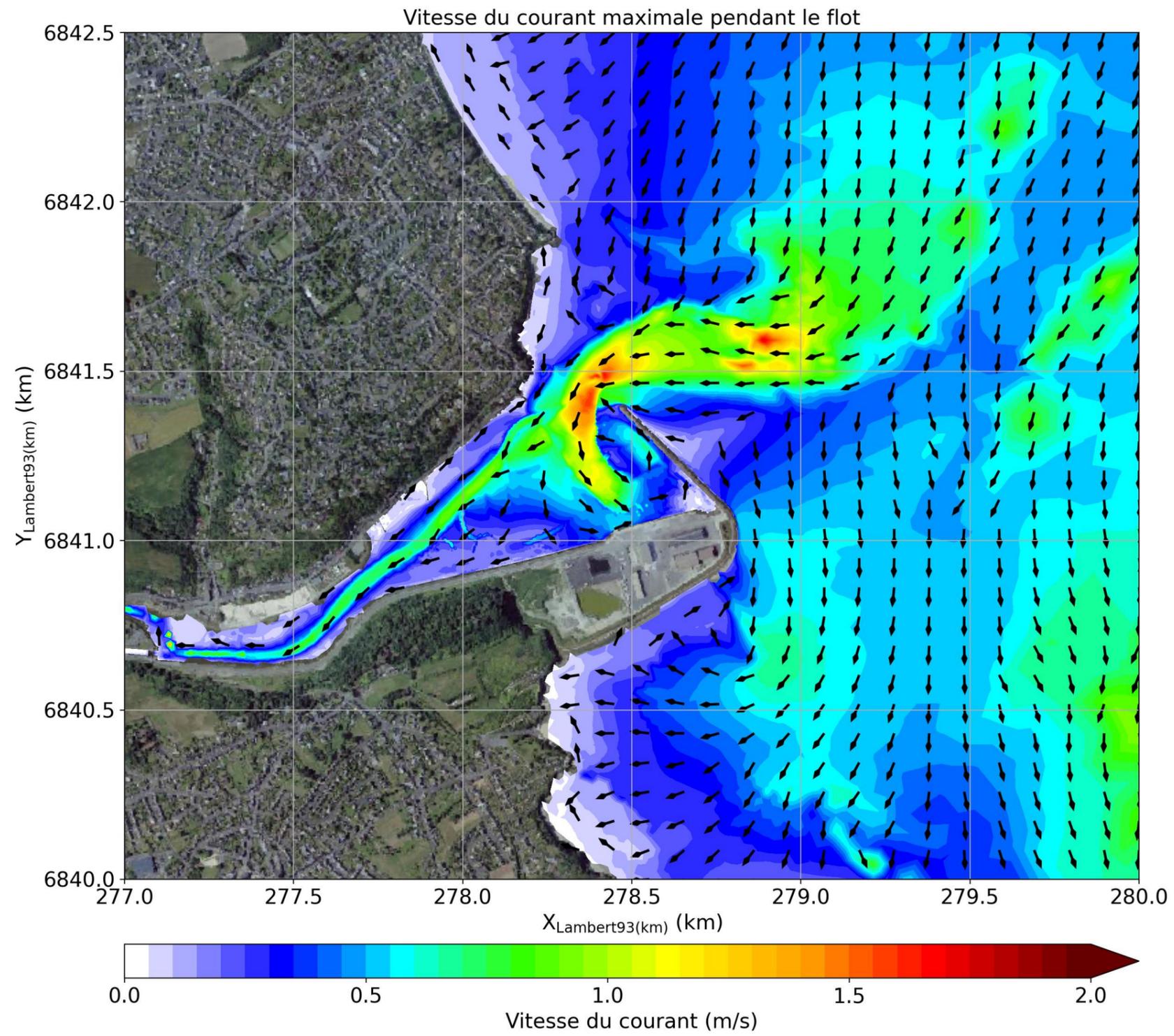


Figure 8-31: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 6.

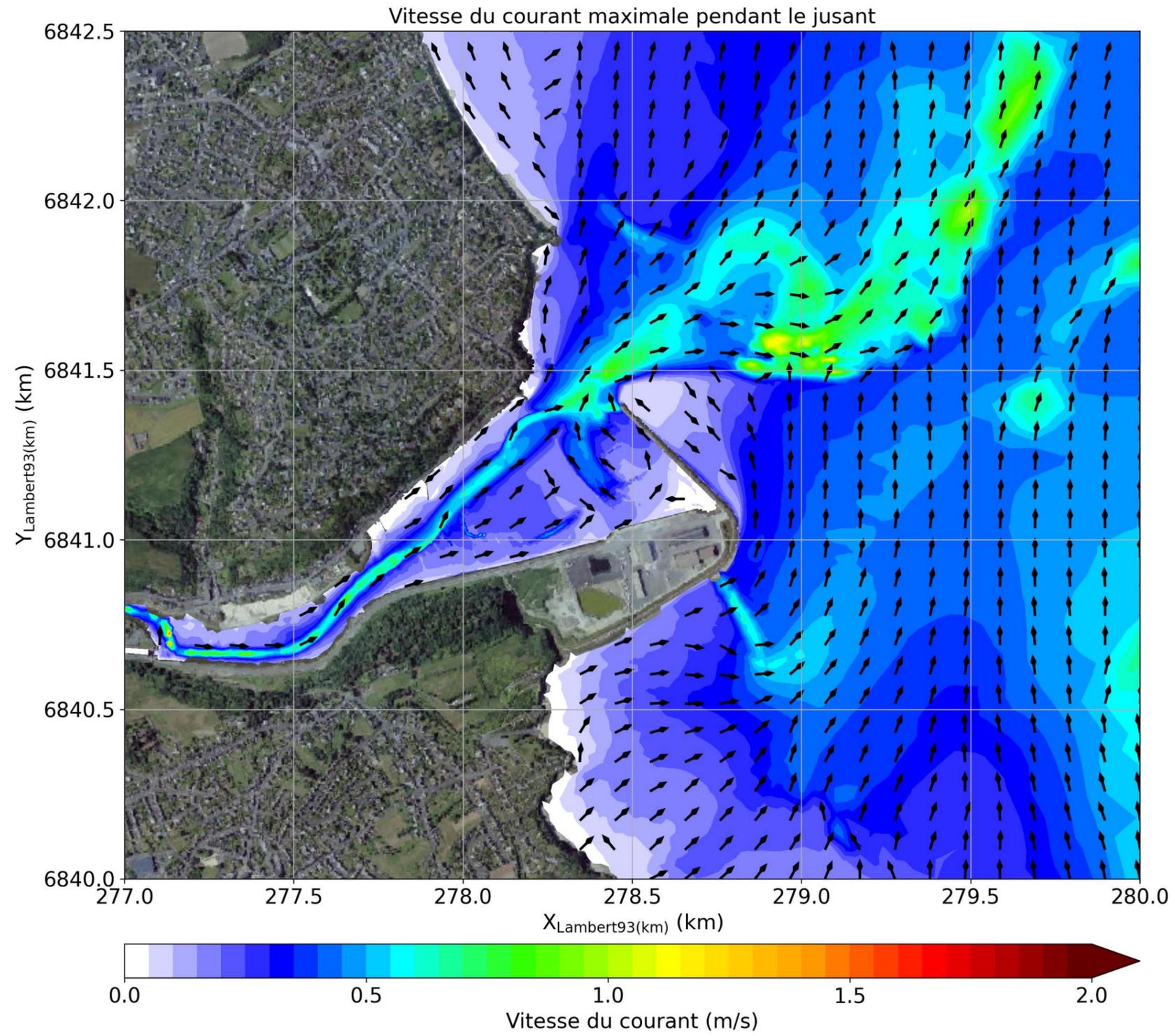


Figure 8-32: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 6.

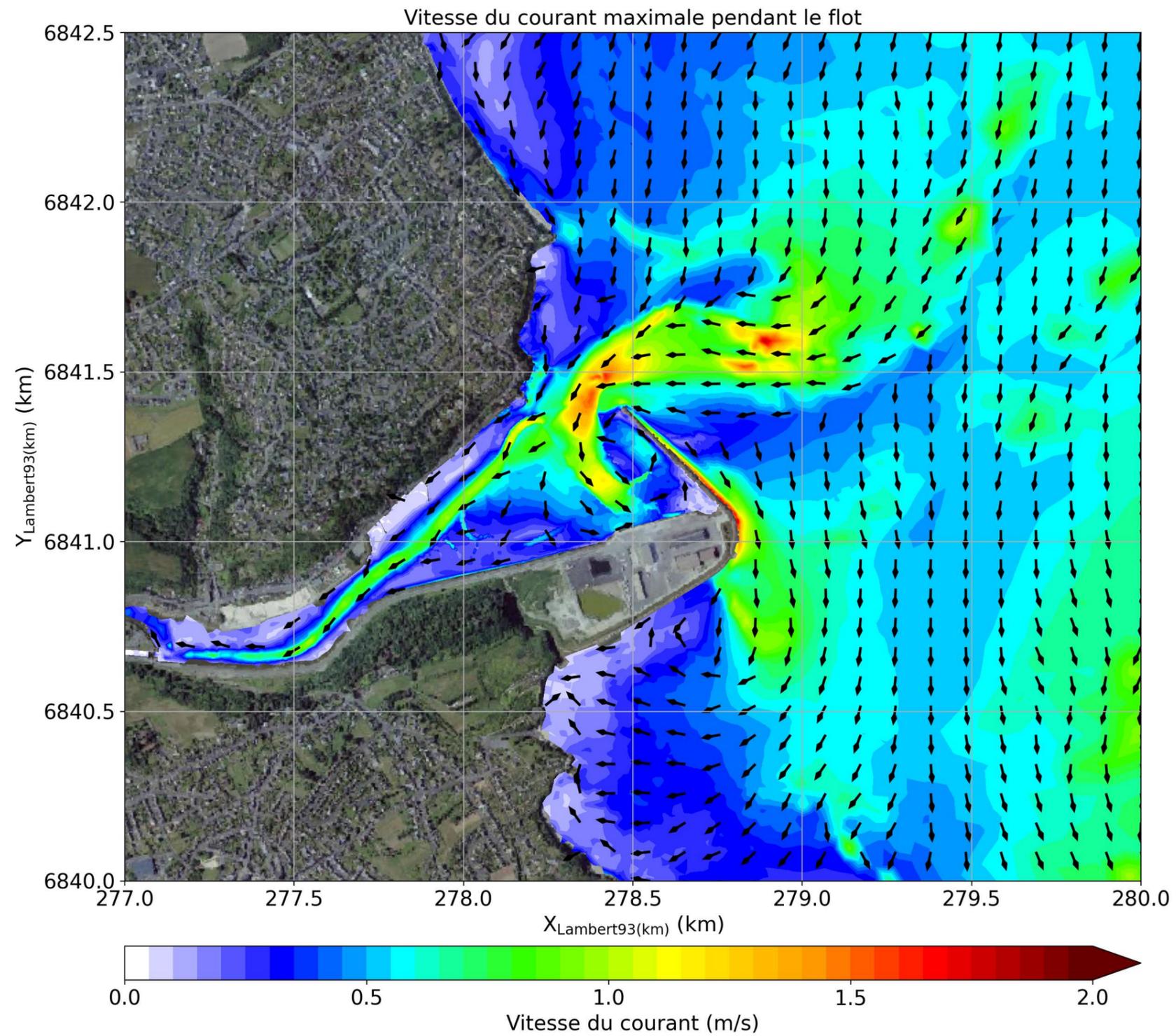


Figure 8-33: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 7.

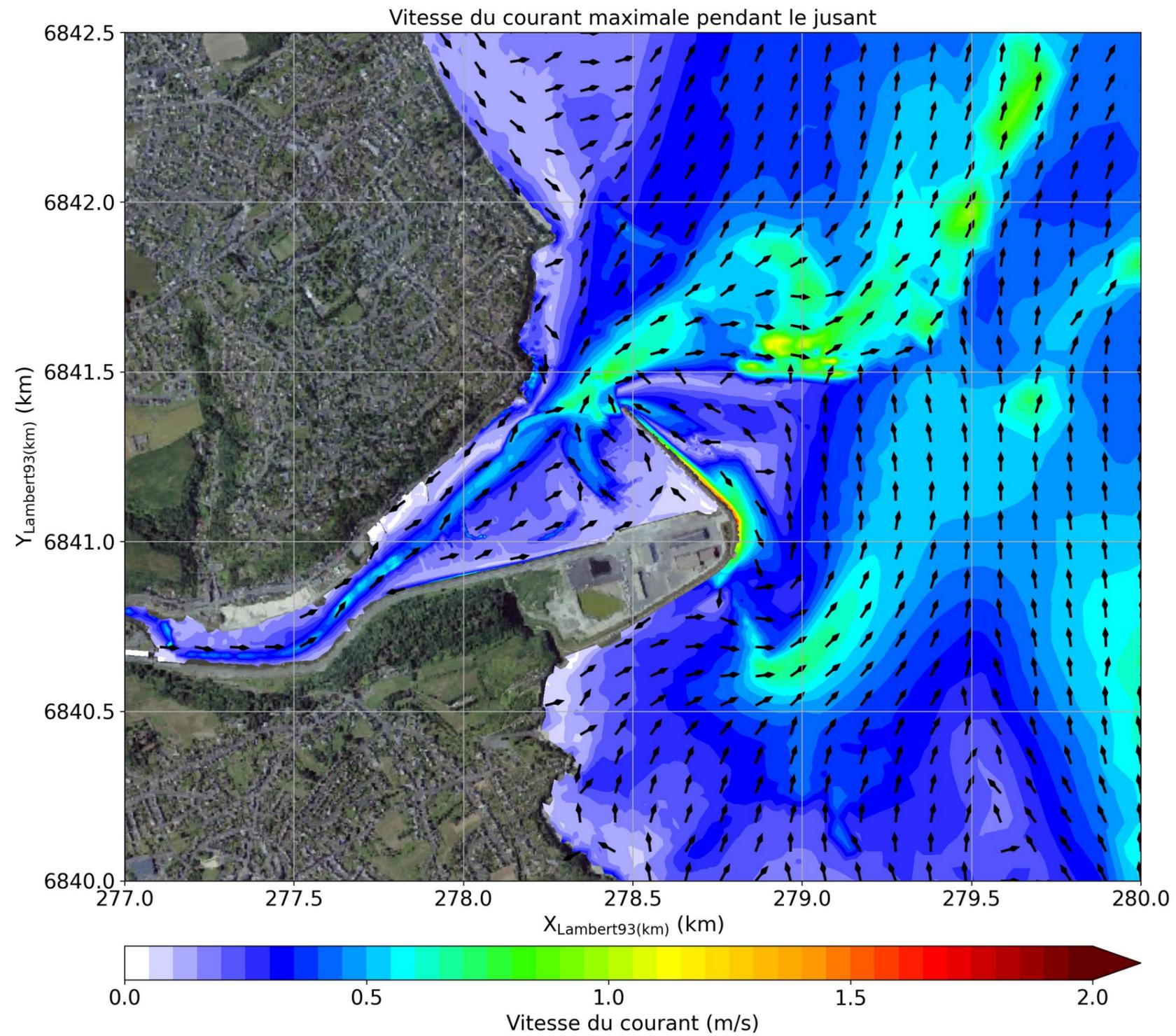


Figure 8-34: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 7.

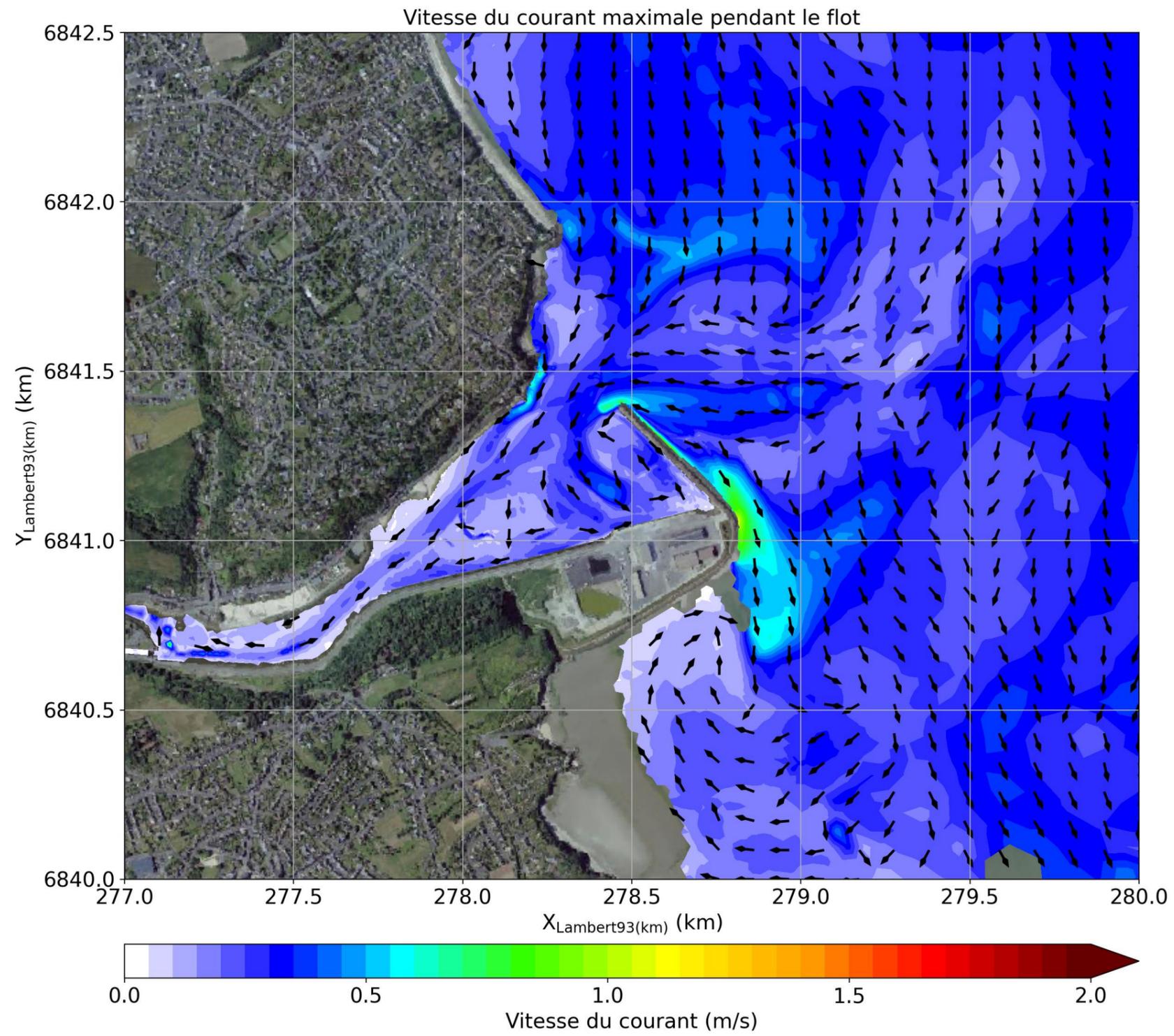


Figure 8-35: Vitesse du courant maximale pendant le flot pour le scénario 8.

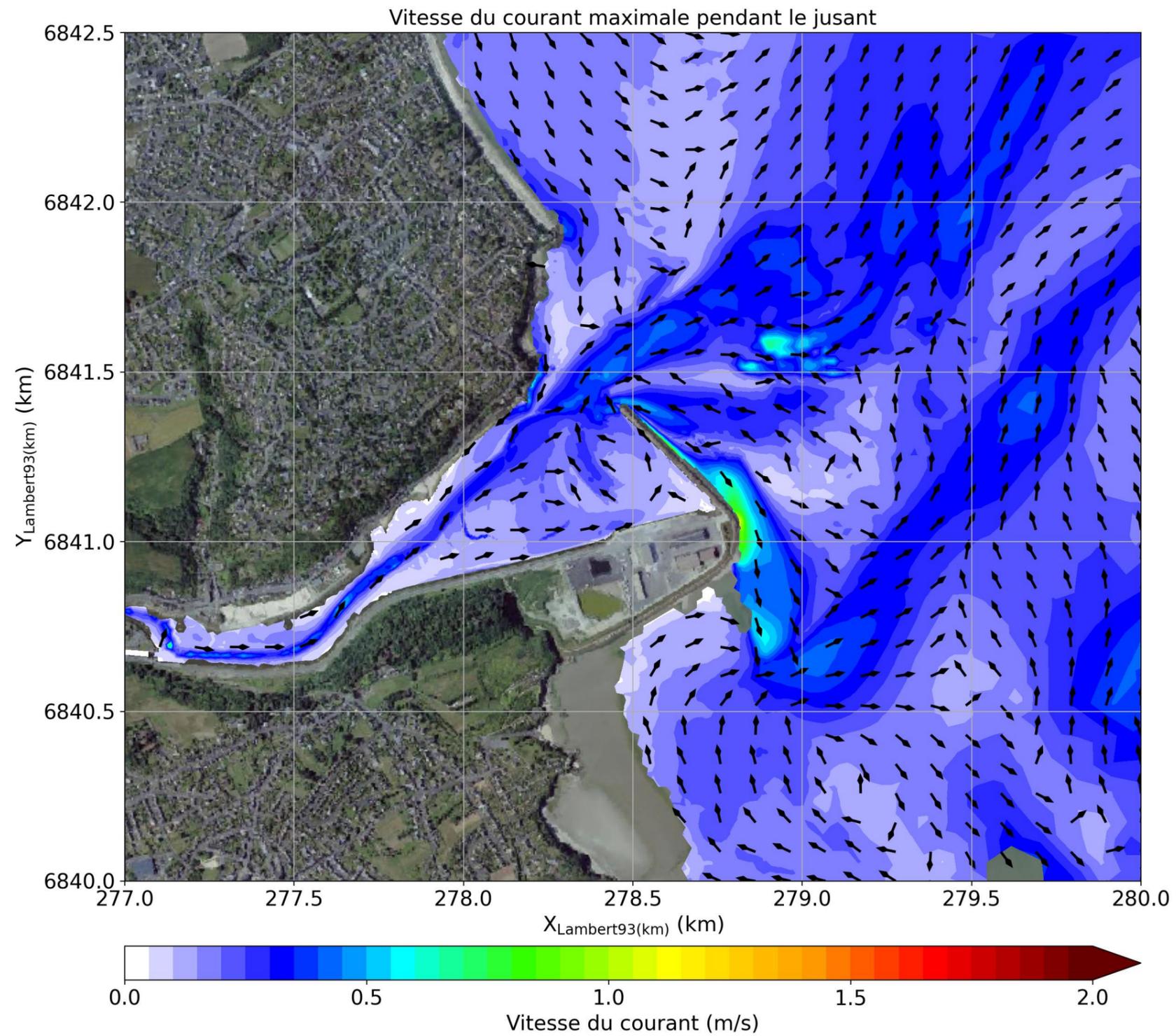


Figure 8-36: Vitesse du courant maximale pendant le jusant pour le scénario 8.

8.7.2 VAGUE

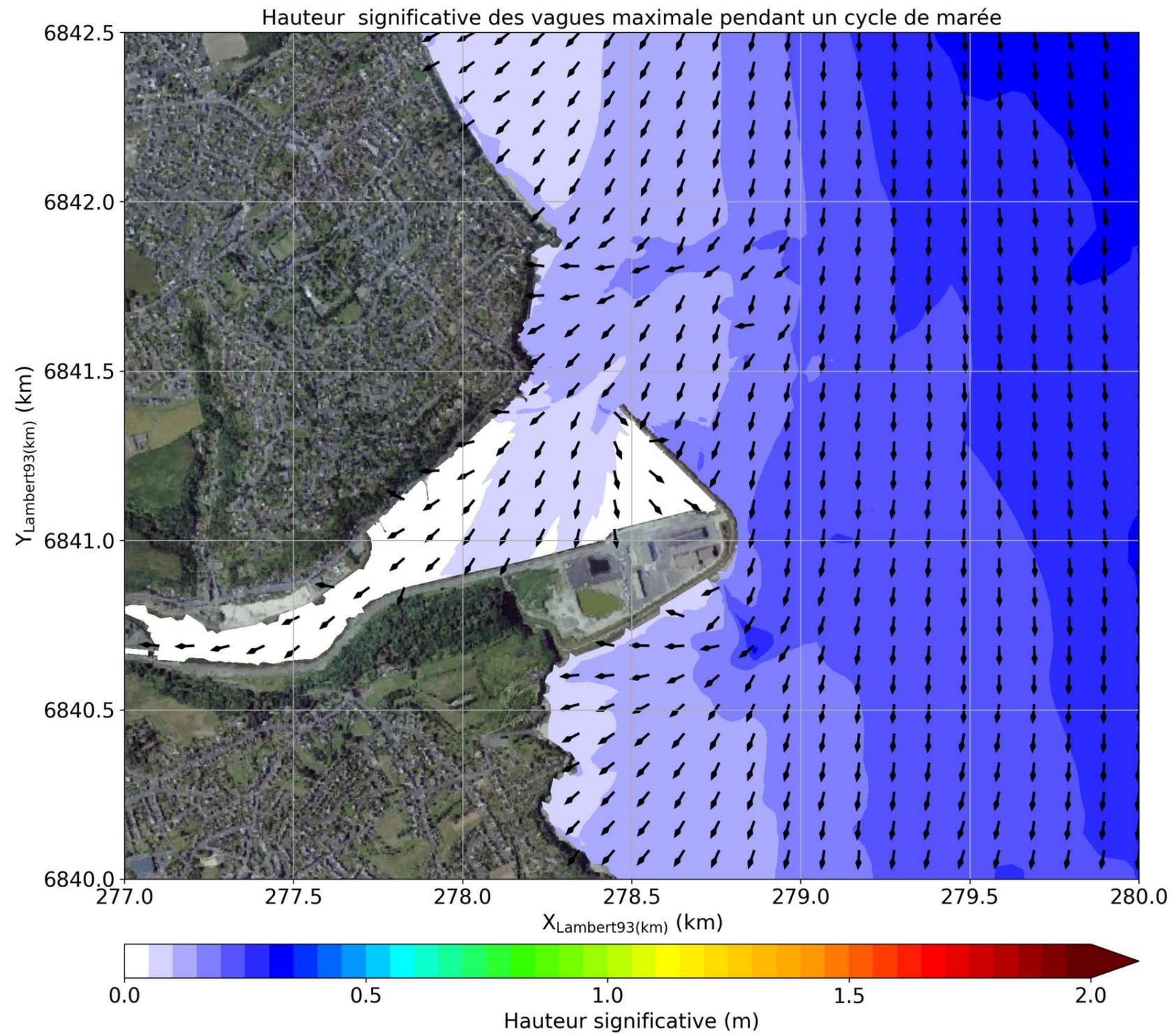


Figure 8-37: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 2.

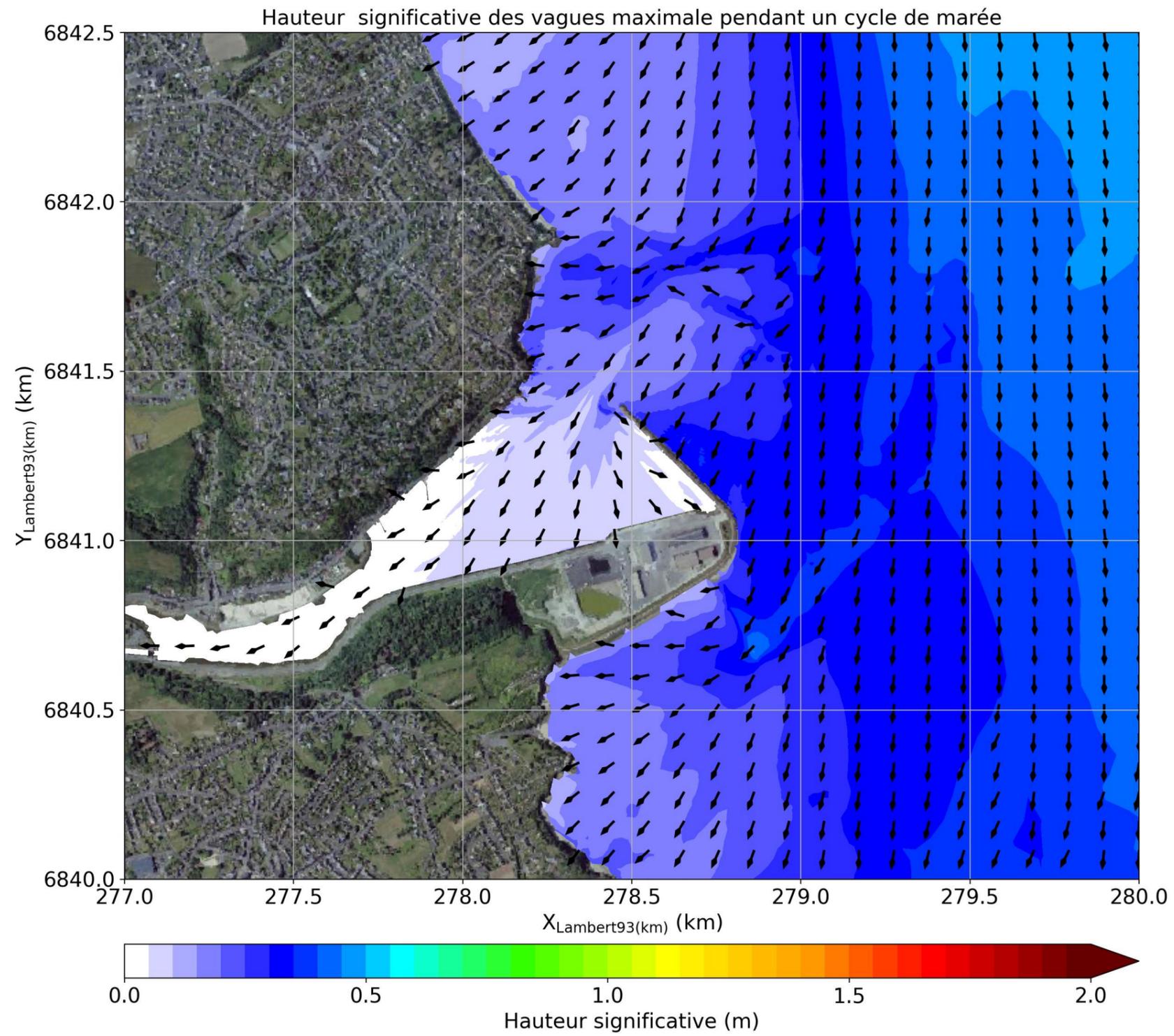


Figure 8-38: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 3.

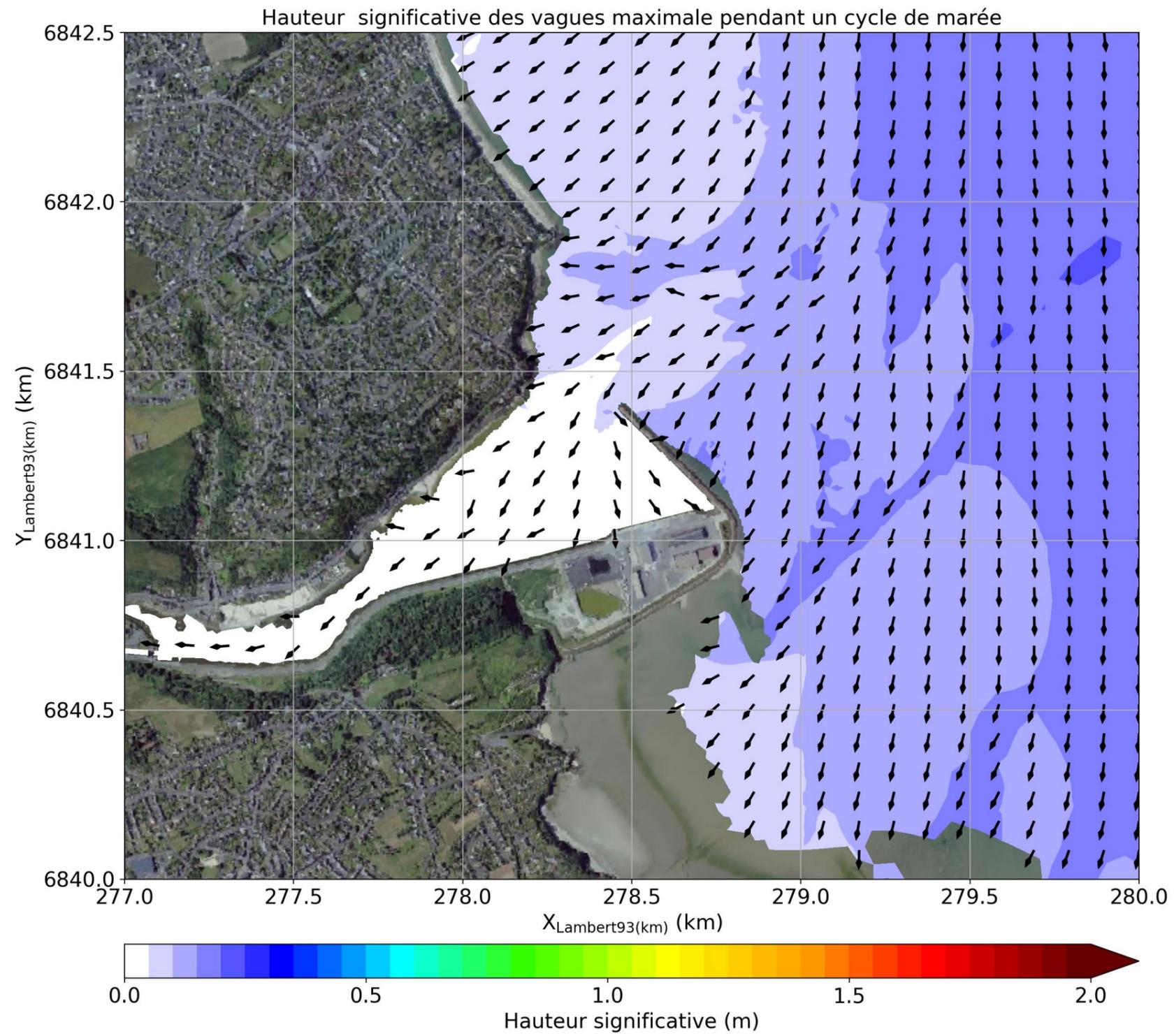


Figure 8-39: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 4.

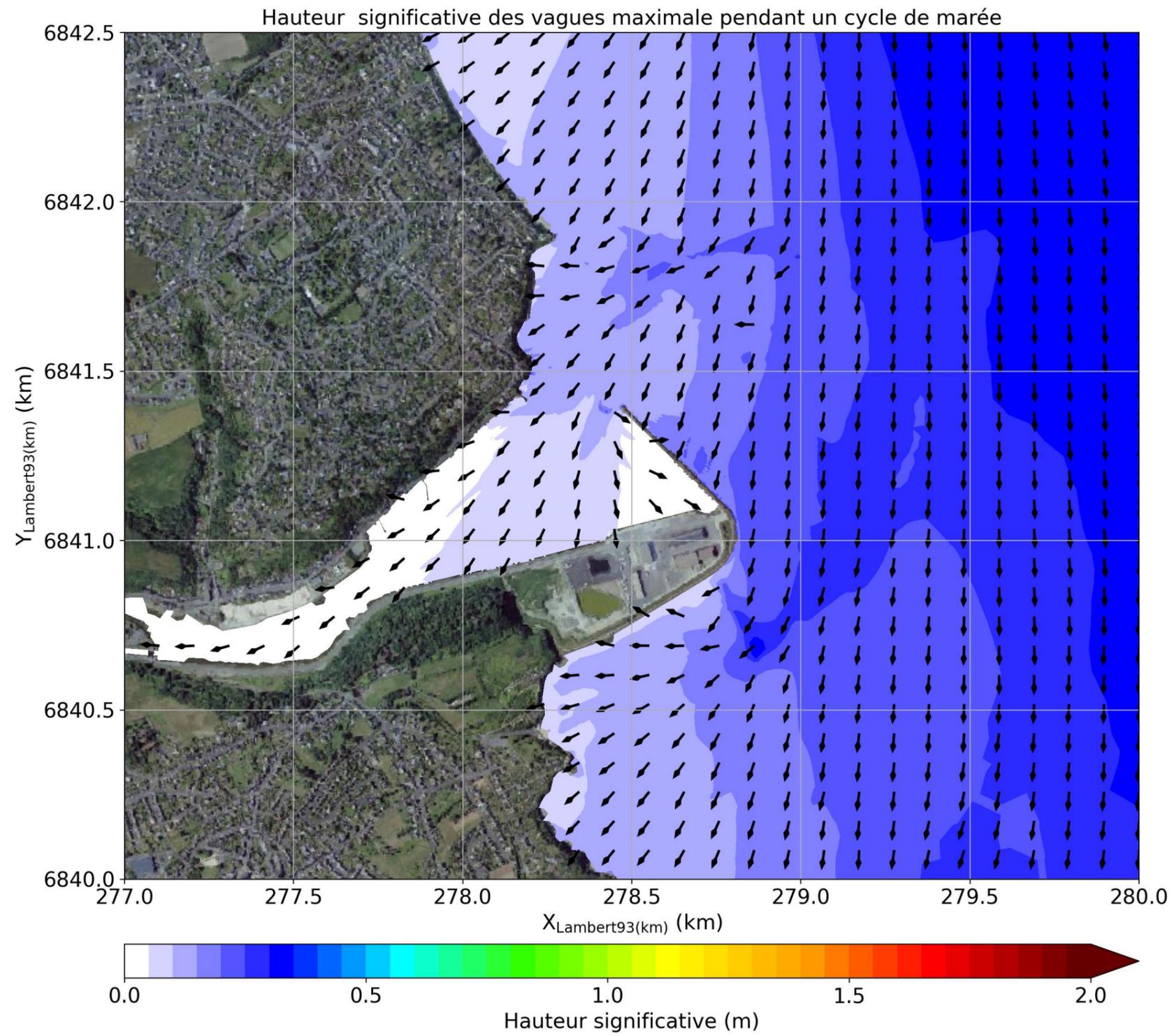


Figure 8-40: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 5.

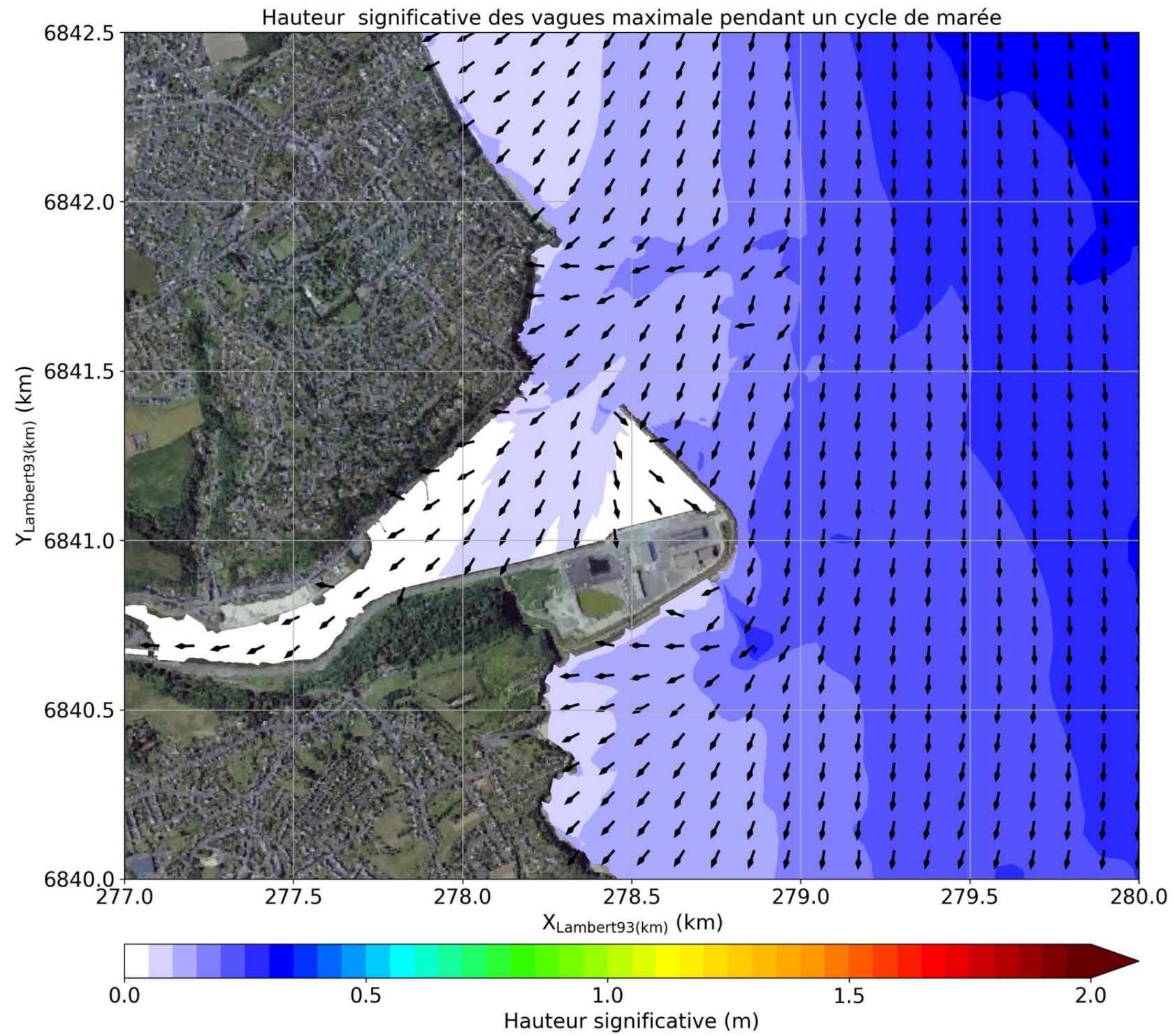


Figure 8-41: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 6.

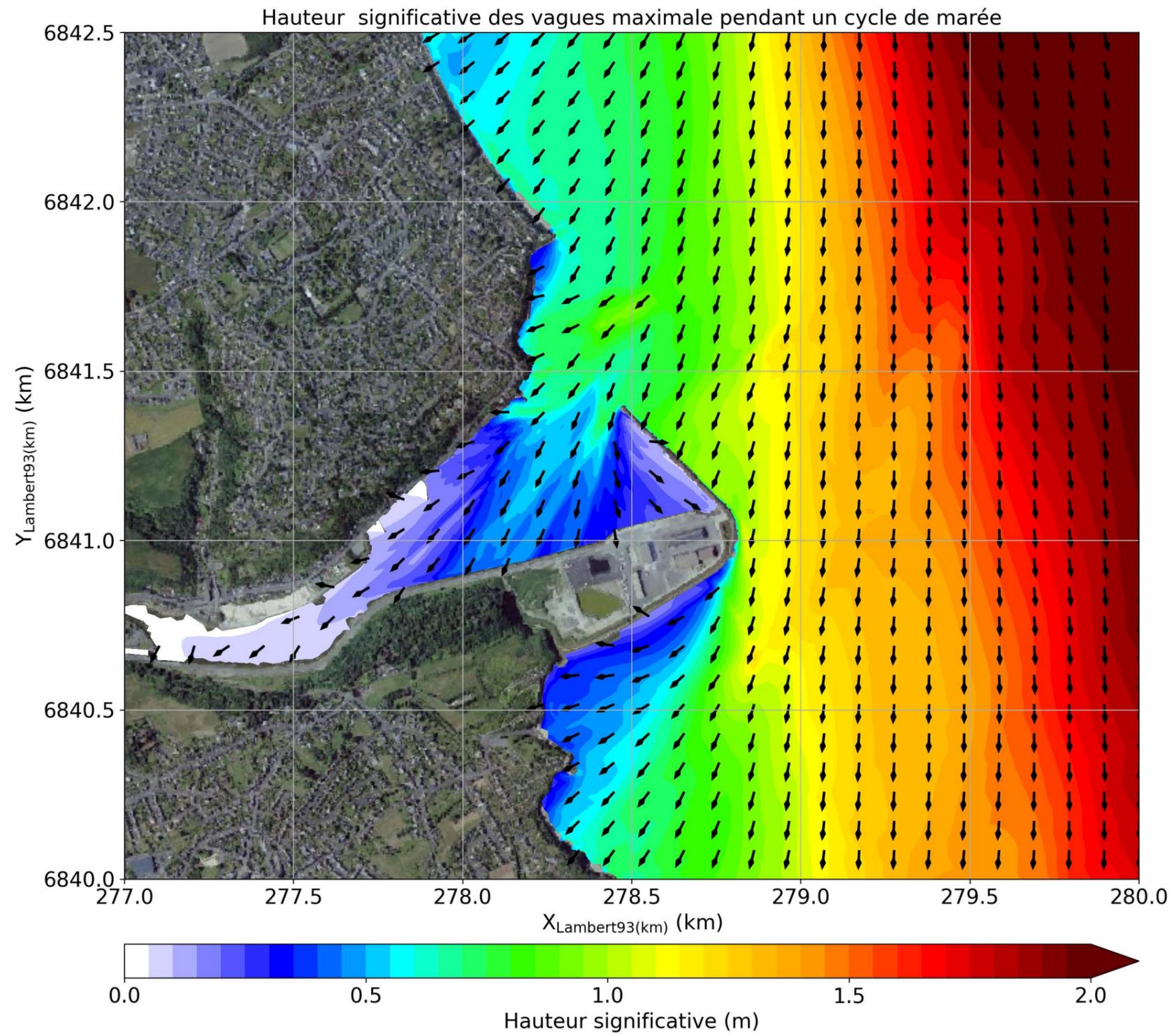


Figure 8-42: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 7.

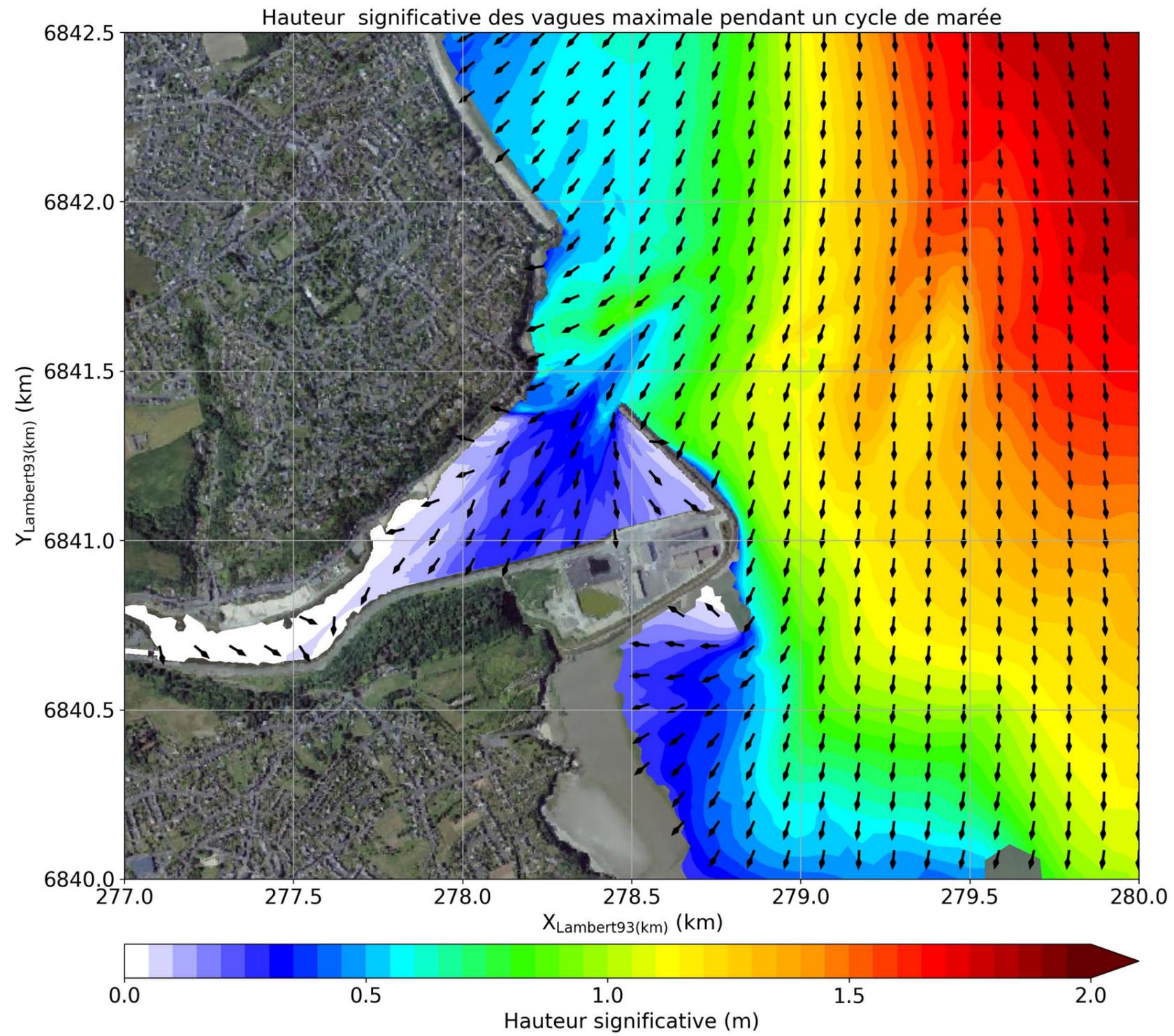


Figure 8-43: Hauteur significative des vagues maximale pendant un cycle de marée pour le scénario 8.

8.7.3 DYNAMIQUE DES SABLES

8.7.3.1 Transport résiduel

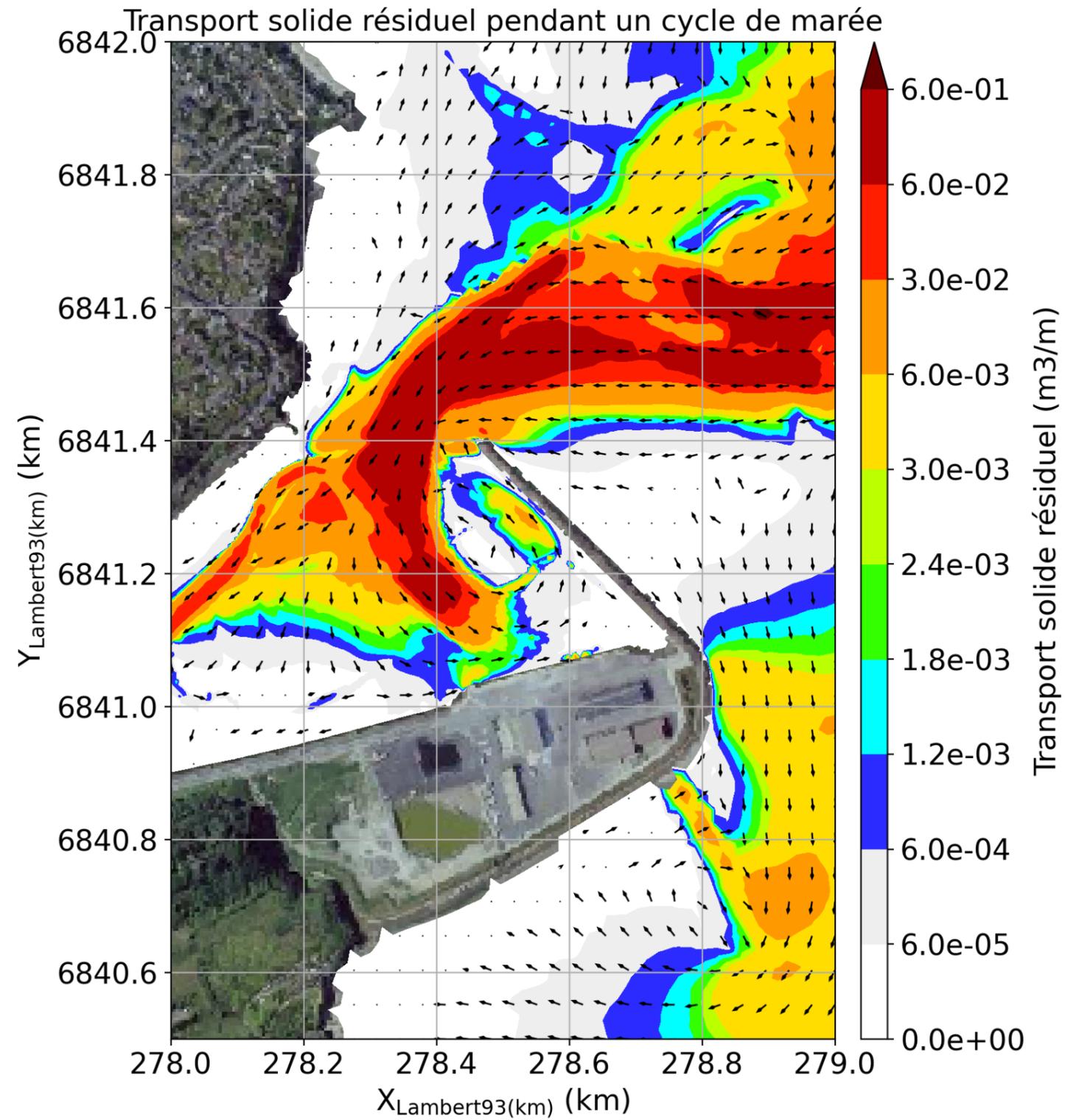


Figure 8-44: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 1 - Zoom sur l'avant-port.

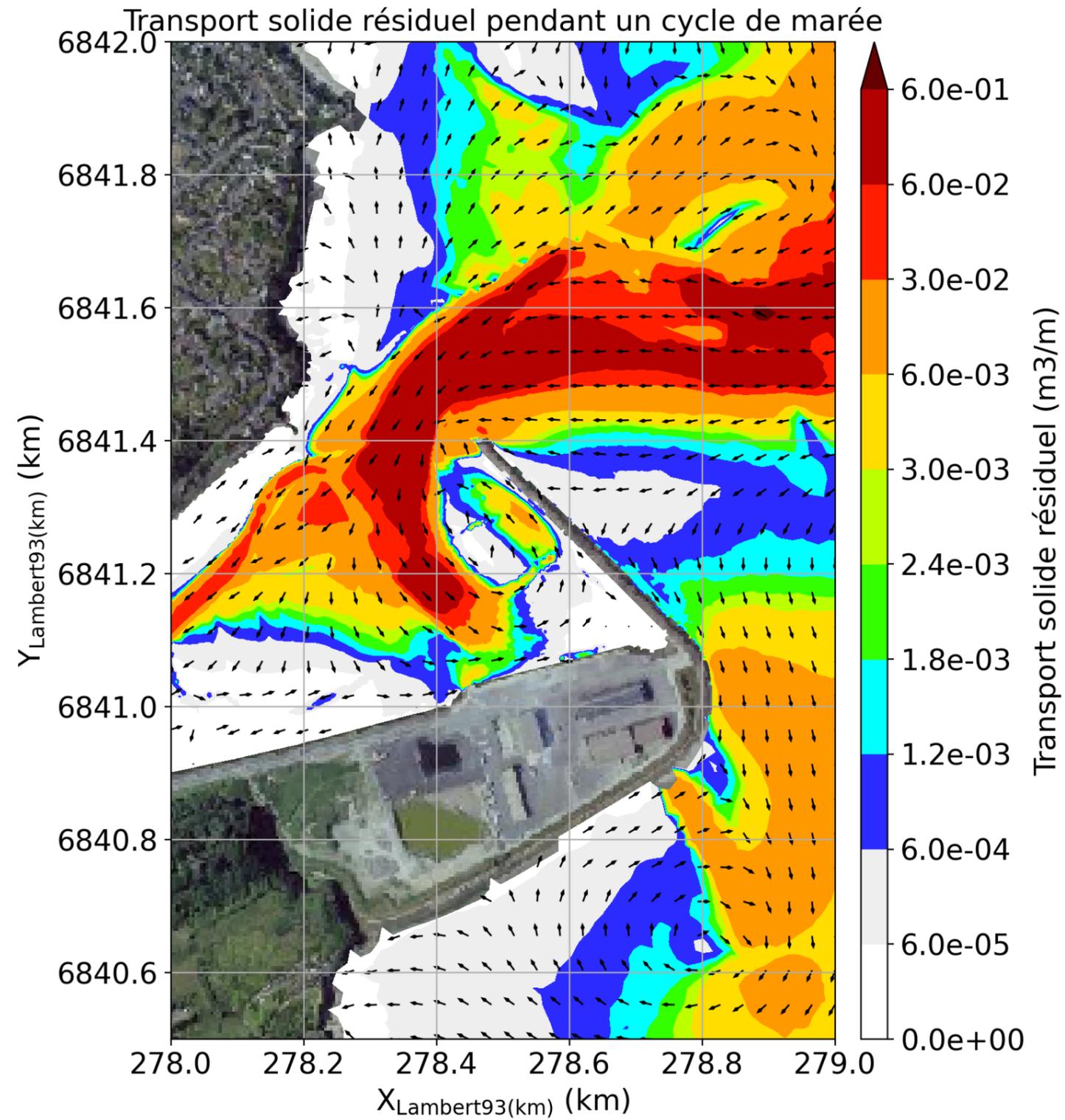


Figure 8-45: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 2 - Zoom sur l'avant-port.

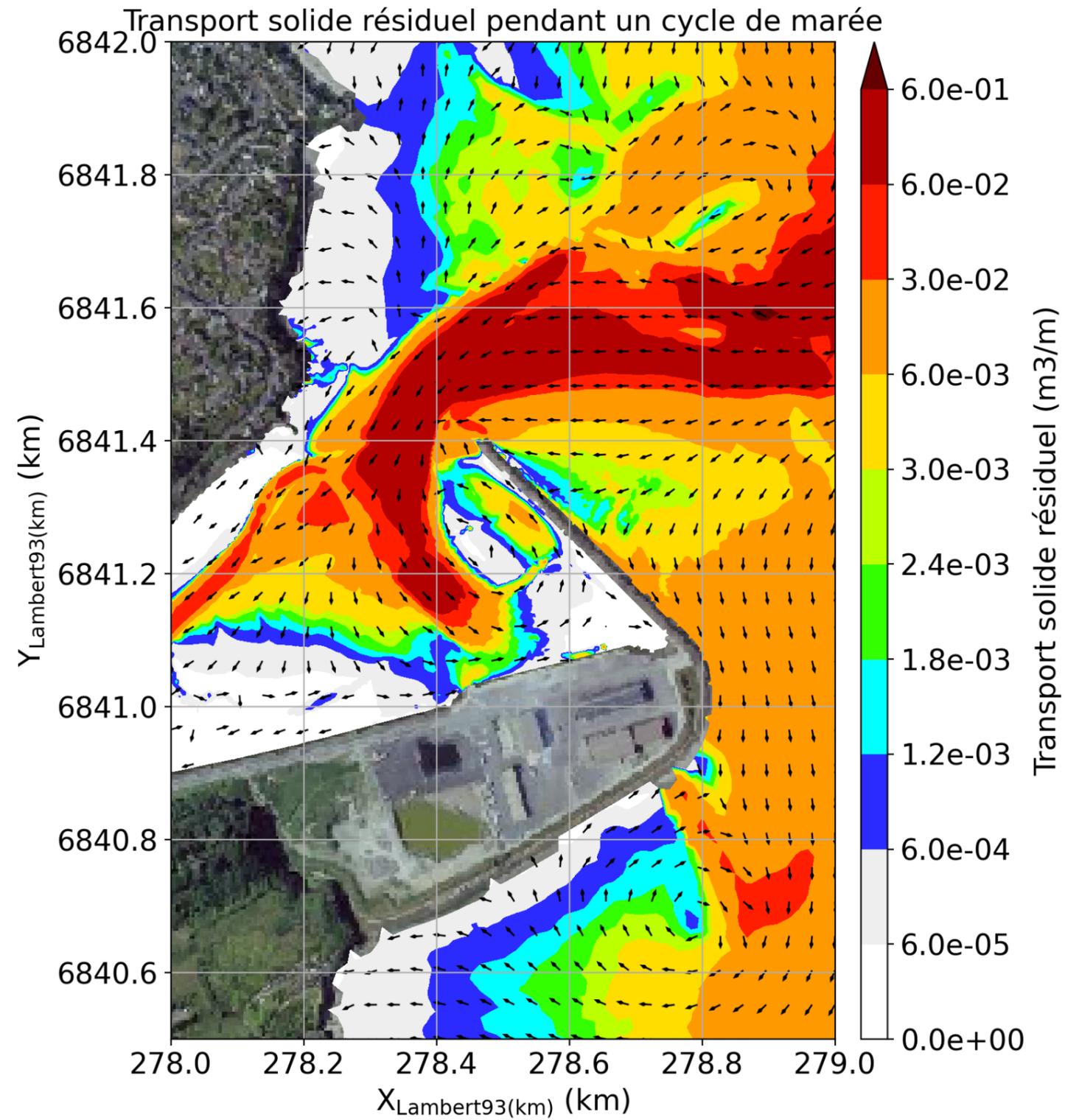


Figure 8-46: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 3 - Zoom sur l'avant-port.

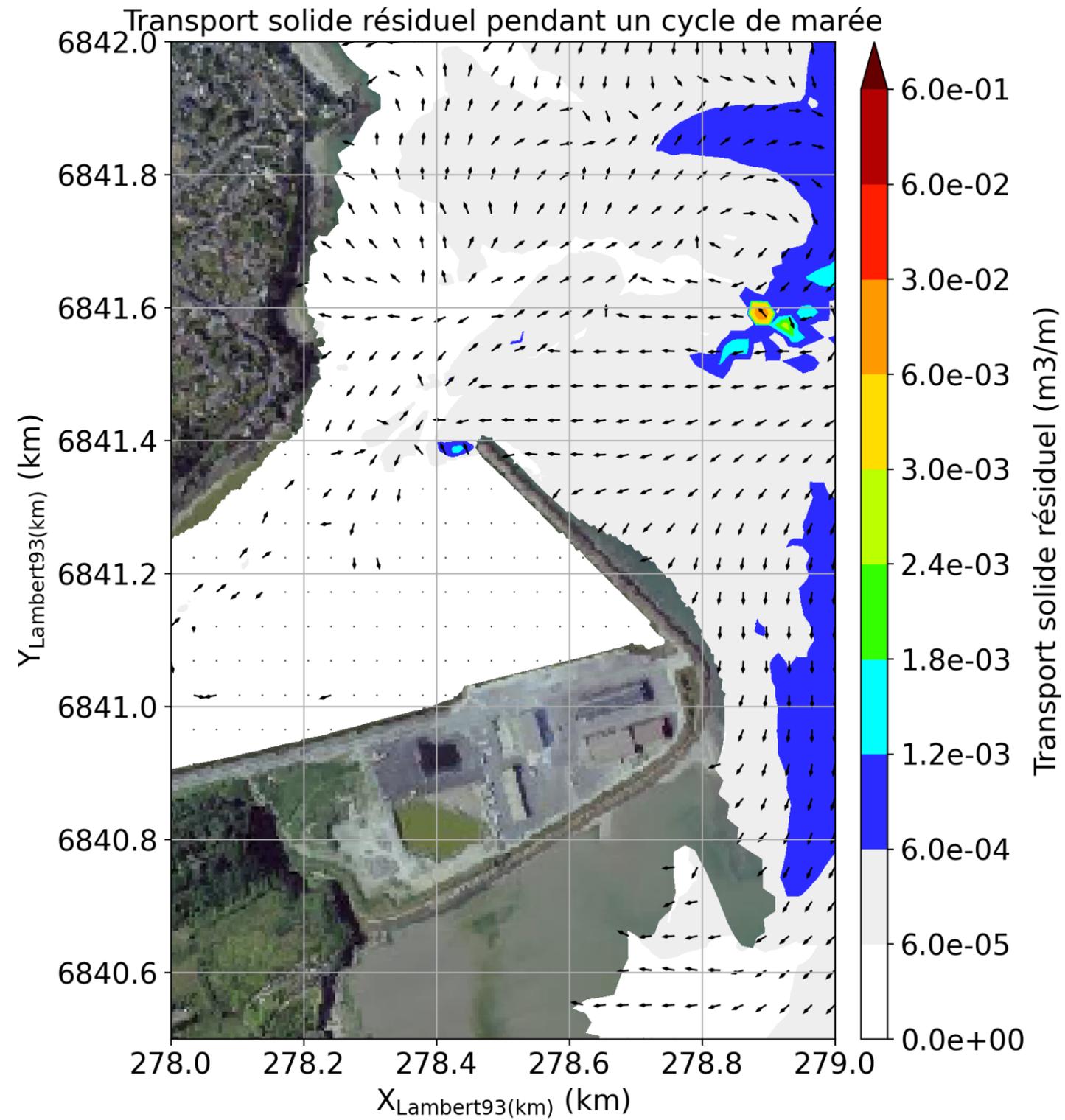


Figure 8-47: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 4 - Zoom sur l'avant-port.

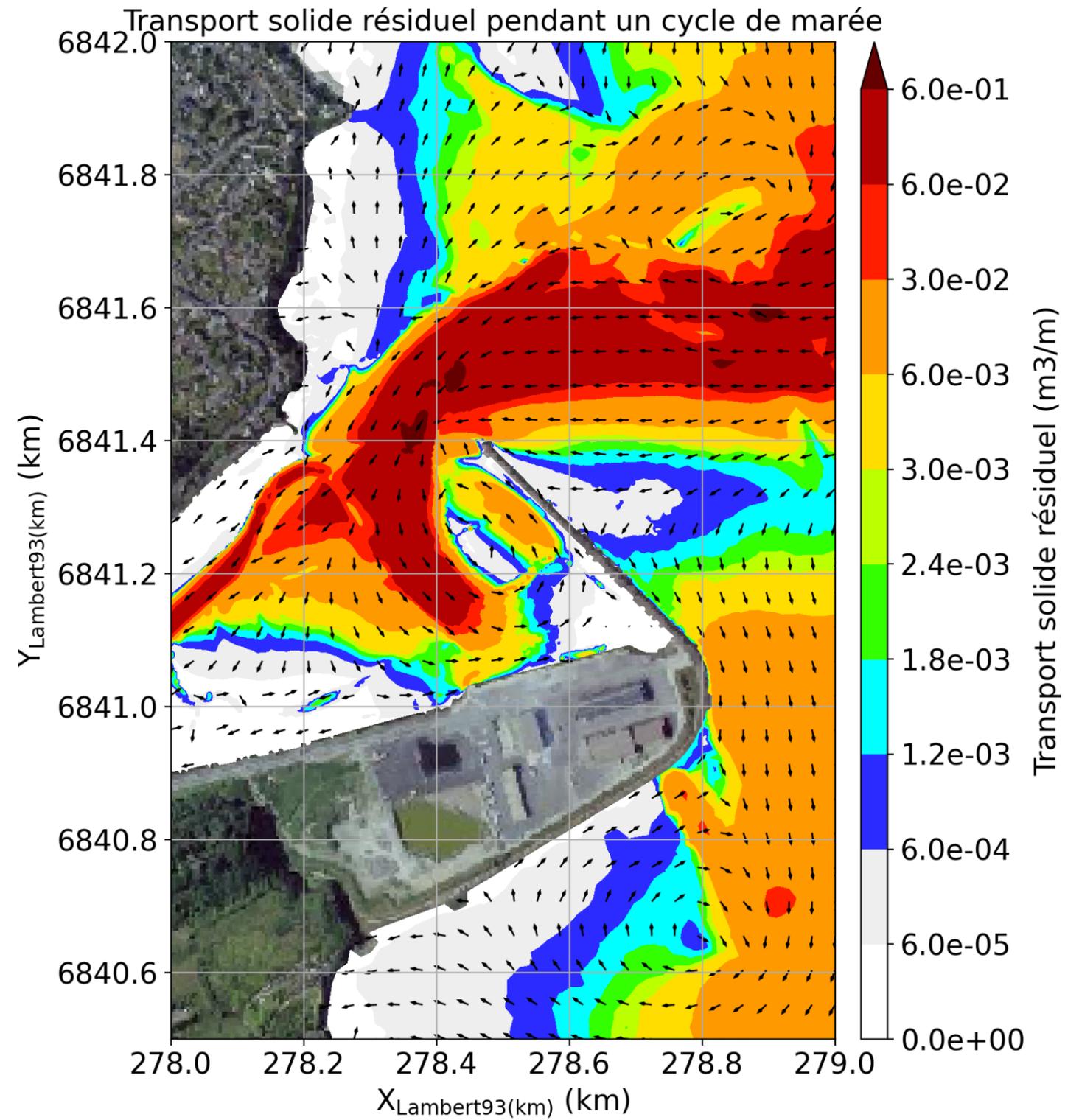


Figure 8-48: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 5 - Zoom sur l'avant-port.

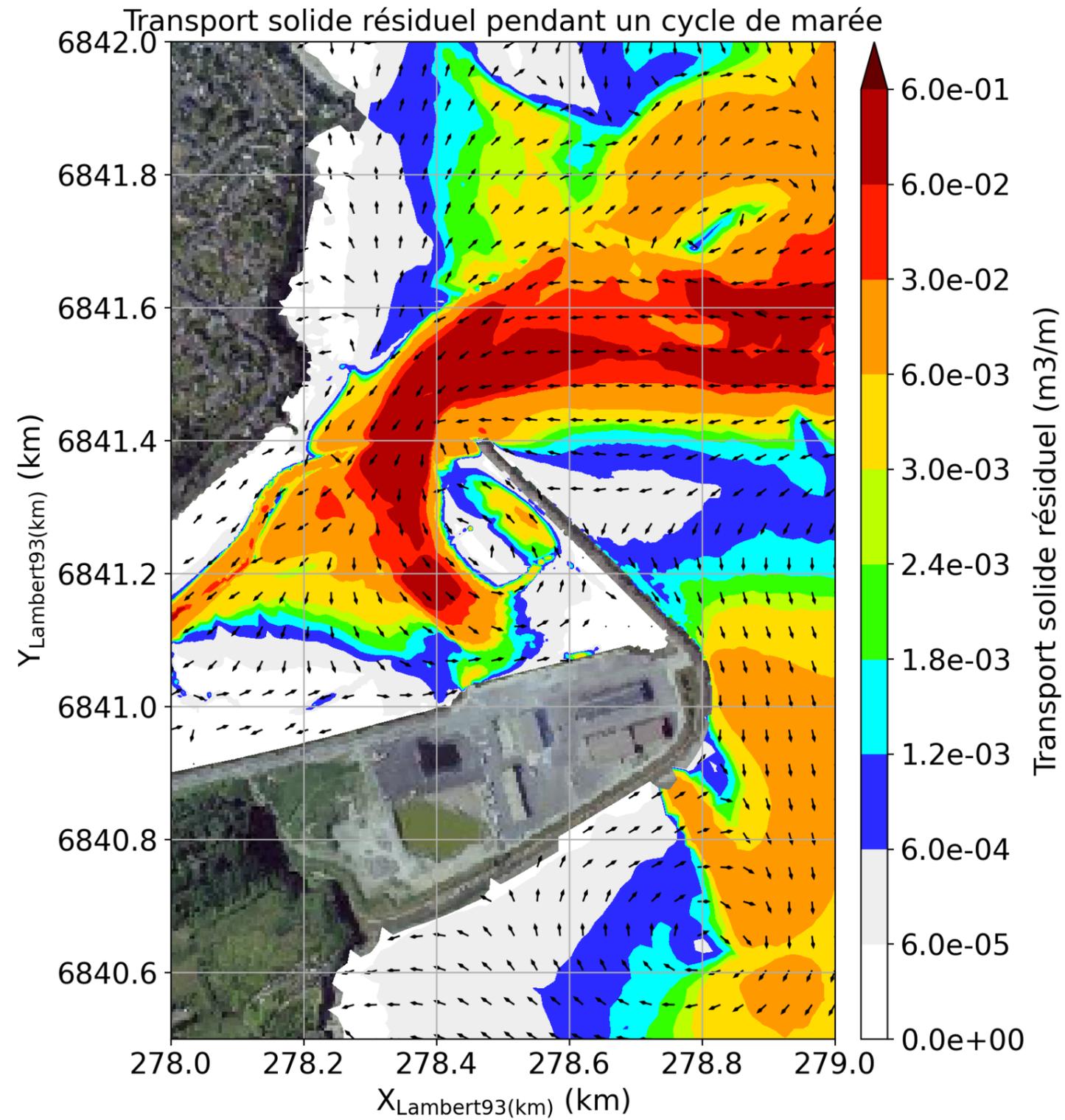


Figure 8-49: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 6 - Zoom sur l'avant-port.

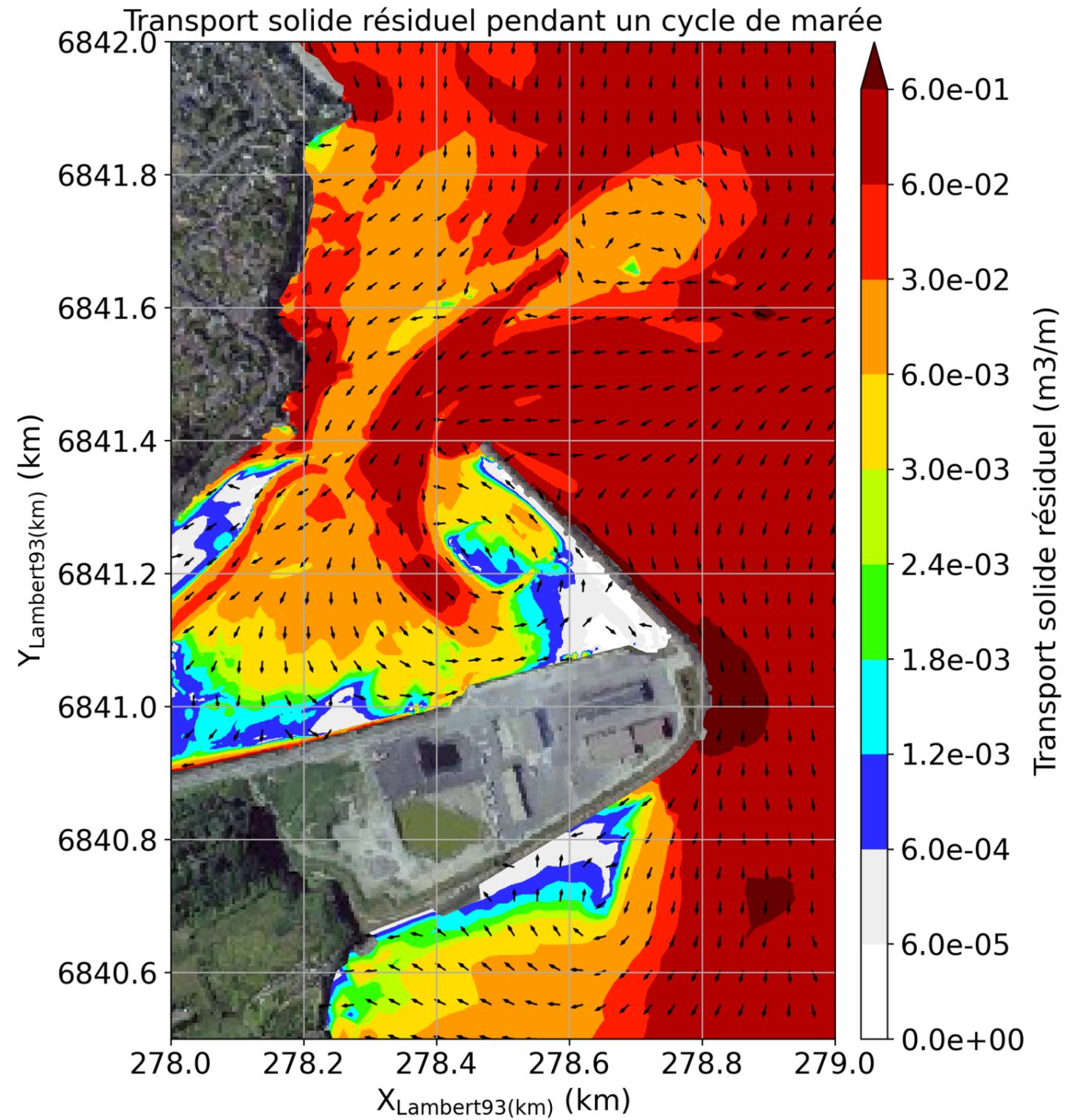


Figure 8-50: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 7 - Zoom sur l'avant-port.

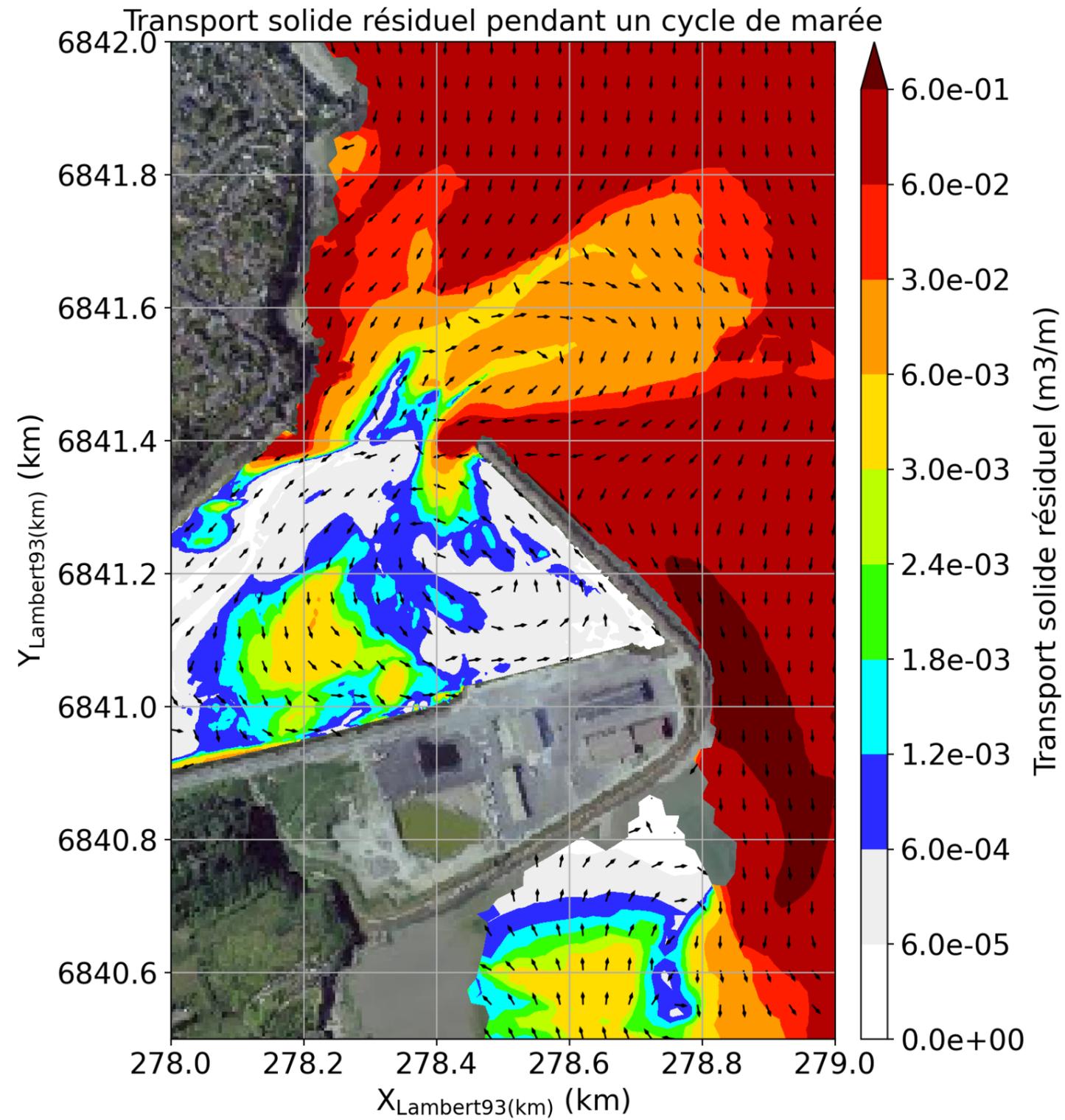


Figure 8-51: Transport solide résiduel au cours d'une marée pour le scénario 8 - Zoom sur l'avant-port.

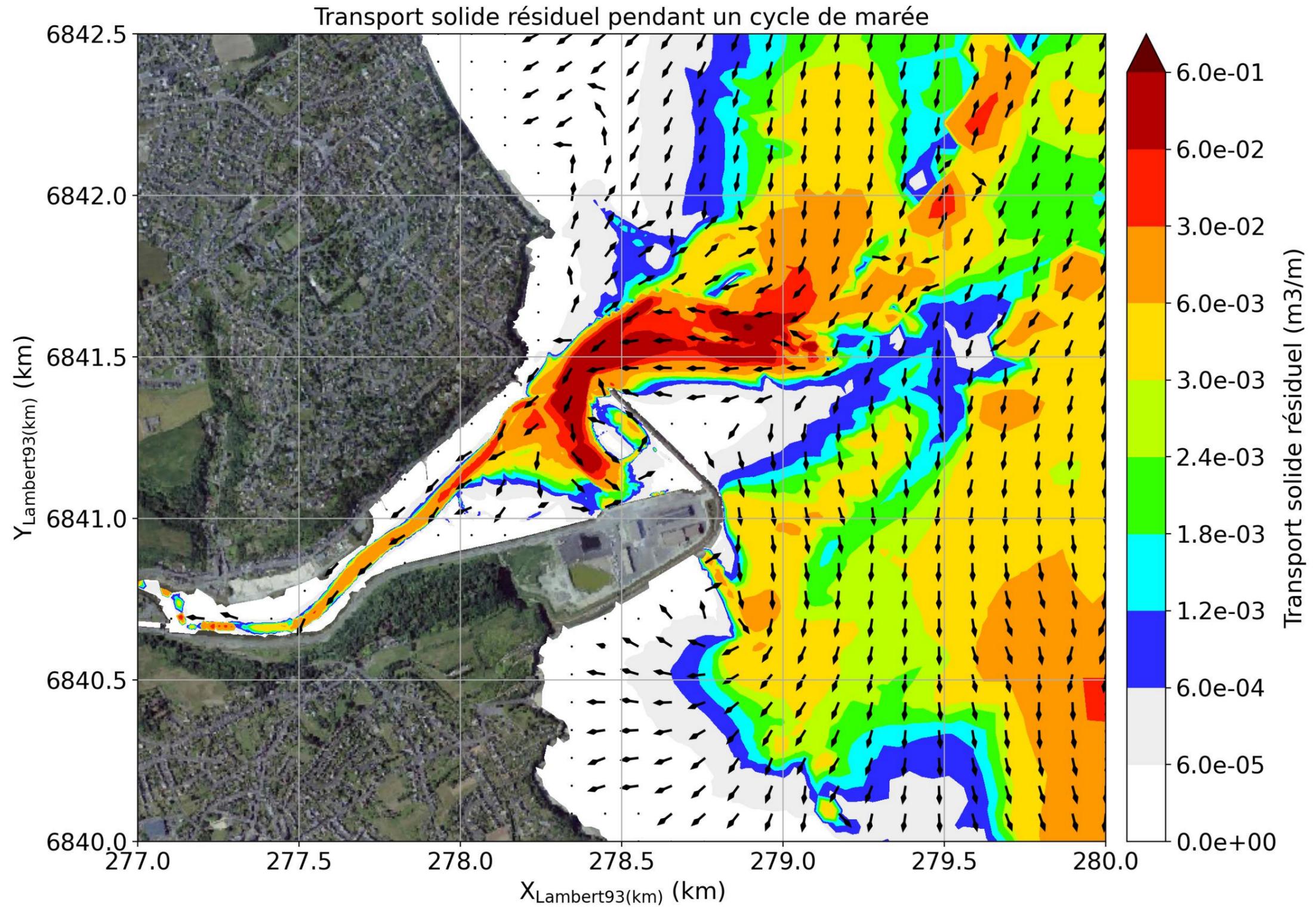


Figure 8-52: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 1 - Zoom sur le site d'étude.

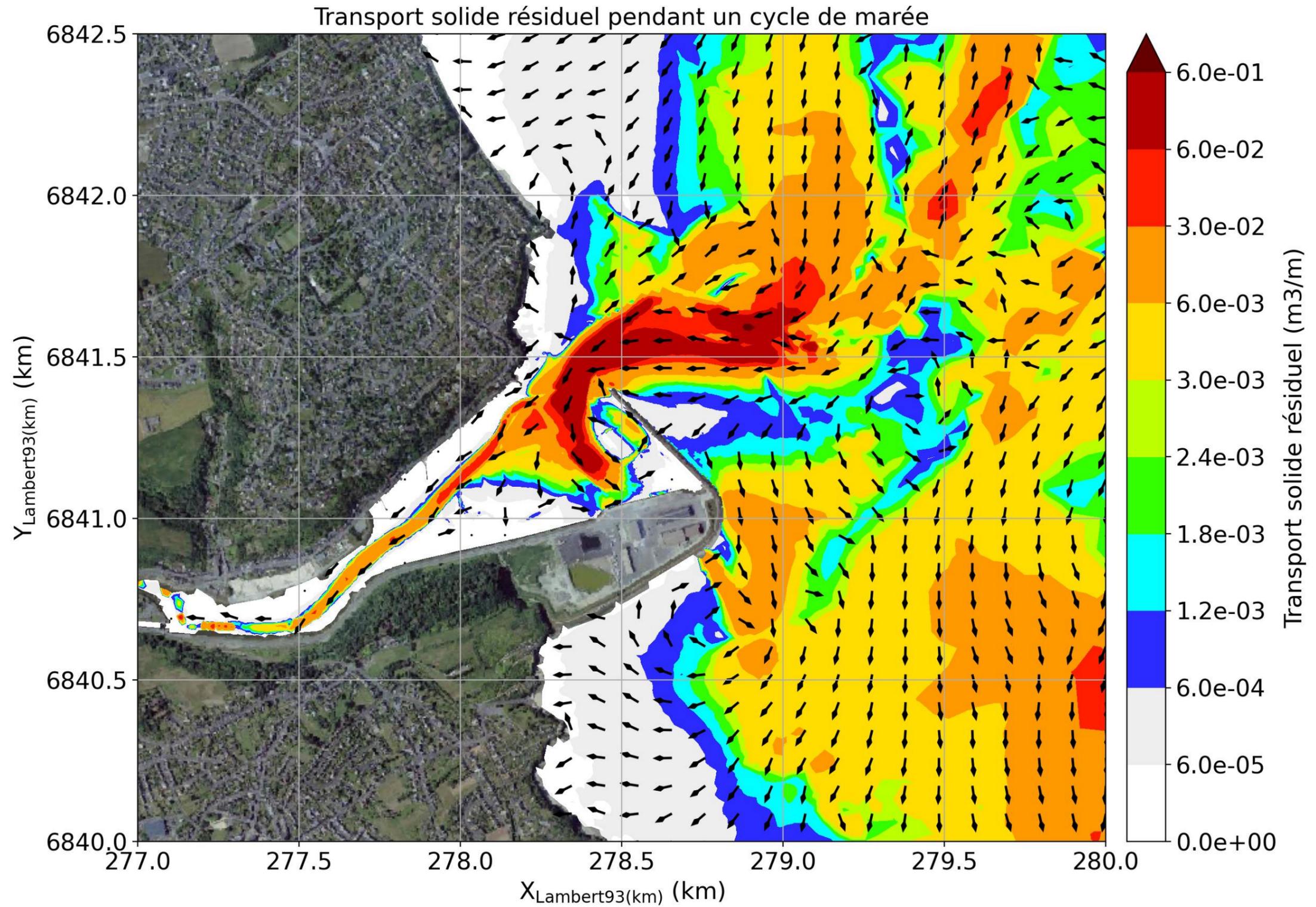


Figure 8-53: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom sur le site d'étude.

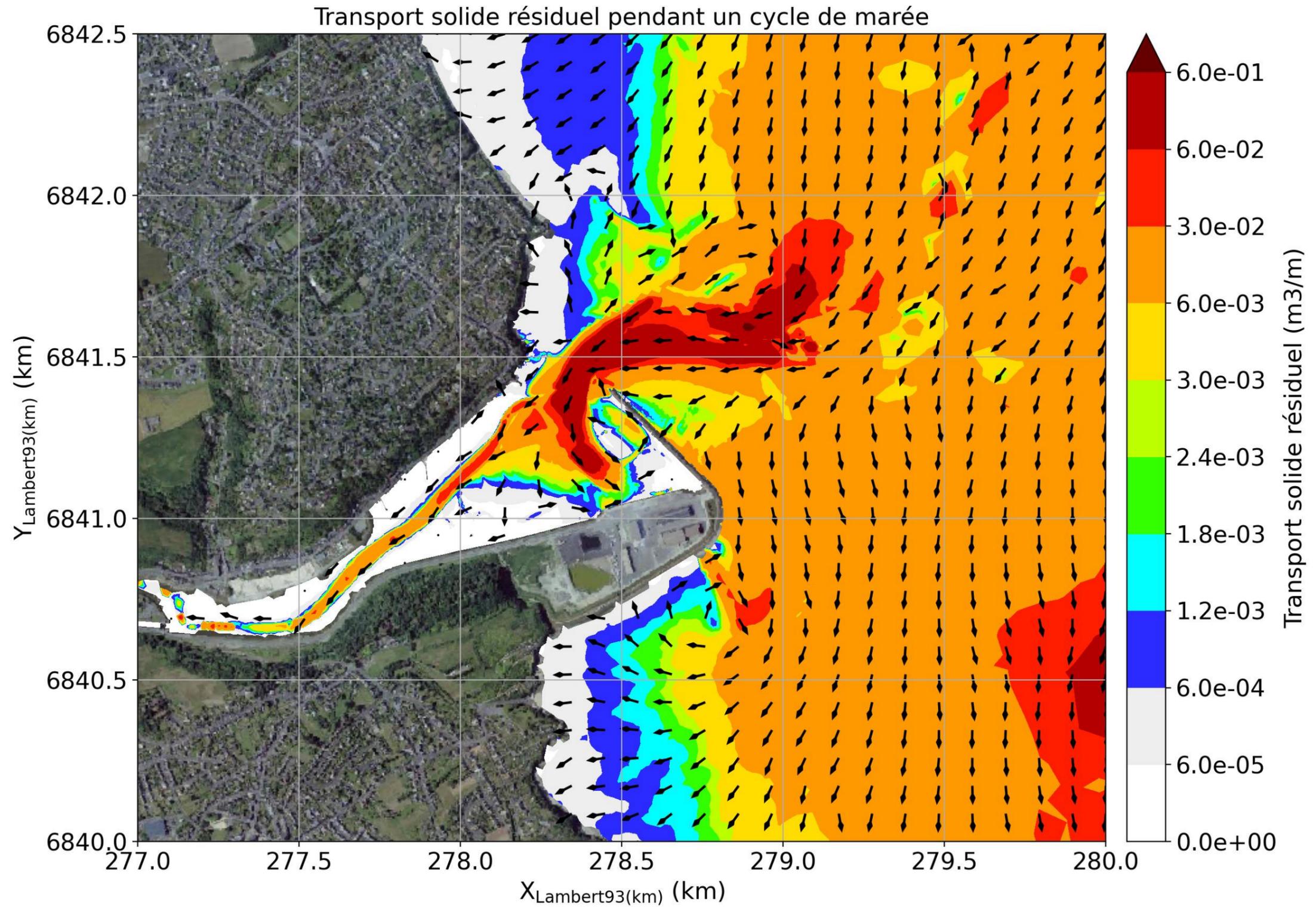


Figure 8-54: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 3 - Zoom sur le site d'étude.

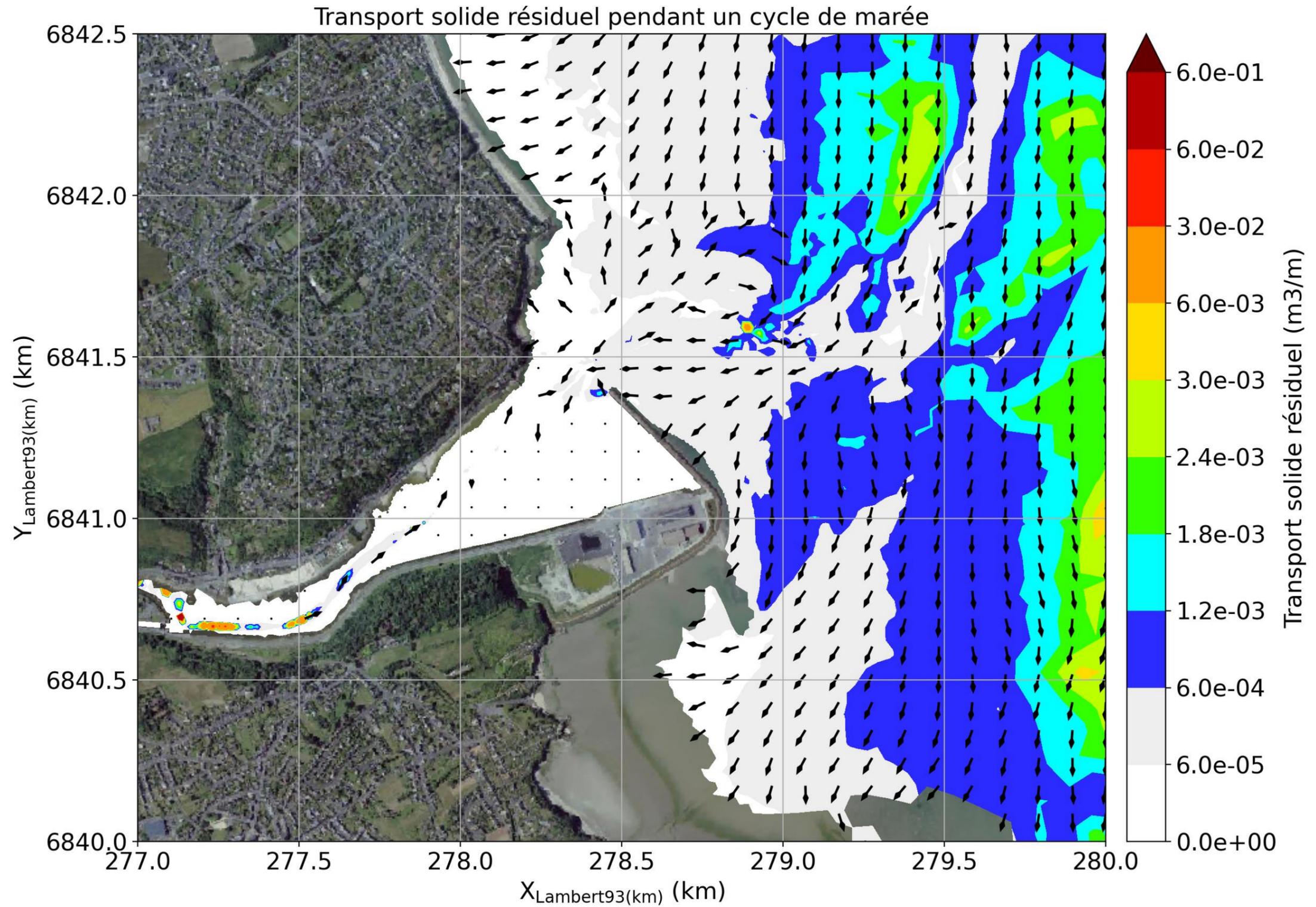


Figure 8-55: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 4 - Zoom sur le site d'étude.

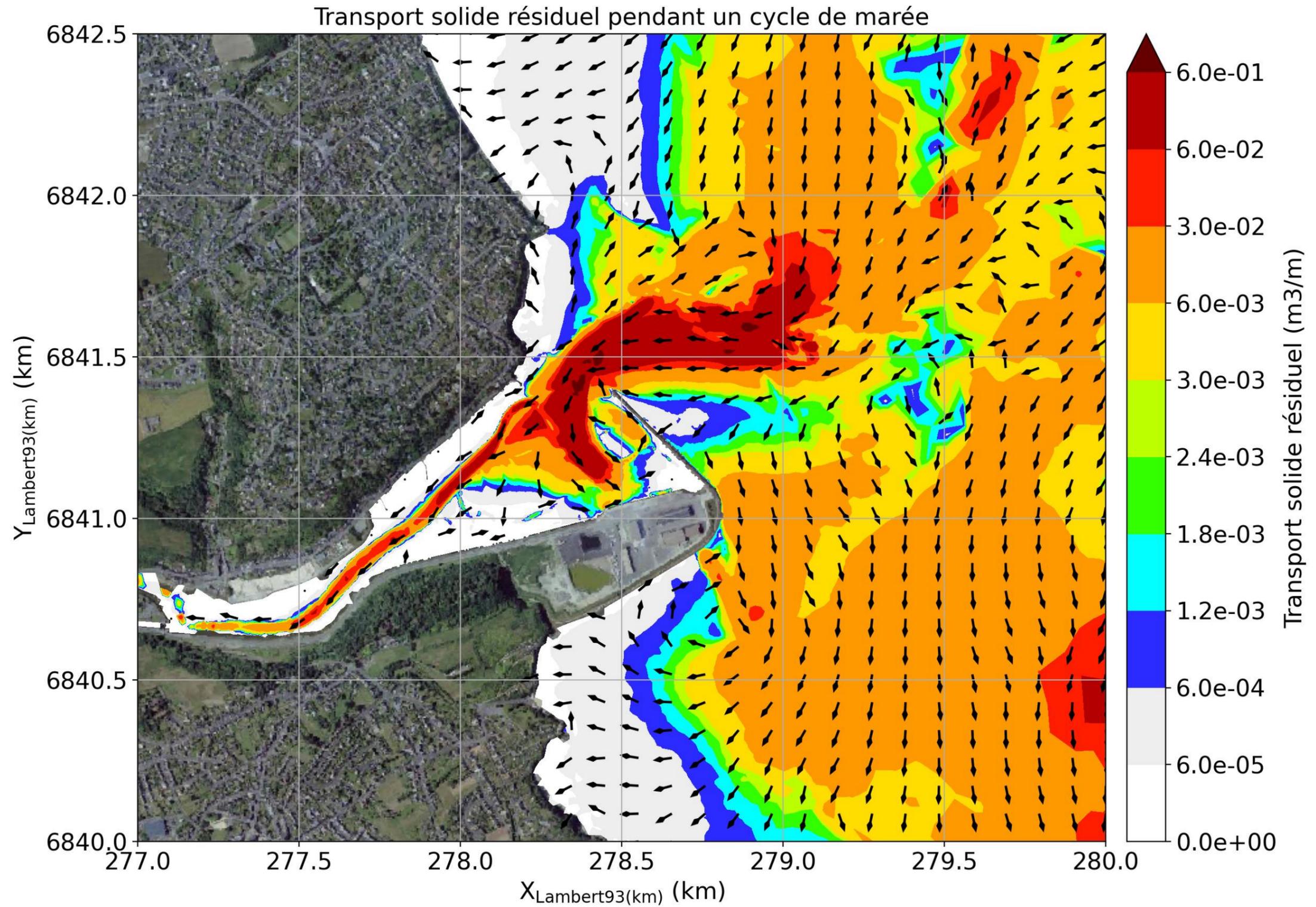


Figure 8-56: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 5 - Zoom sur le site d'étude.

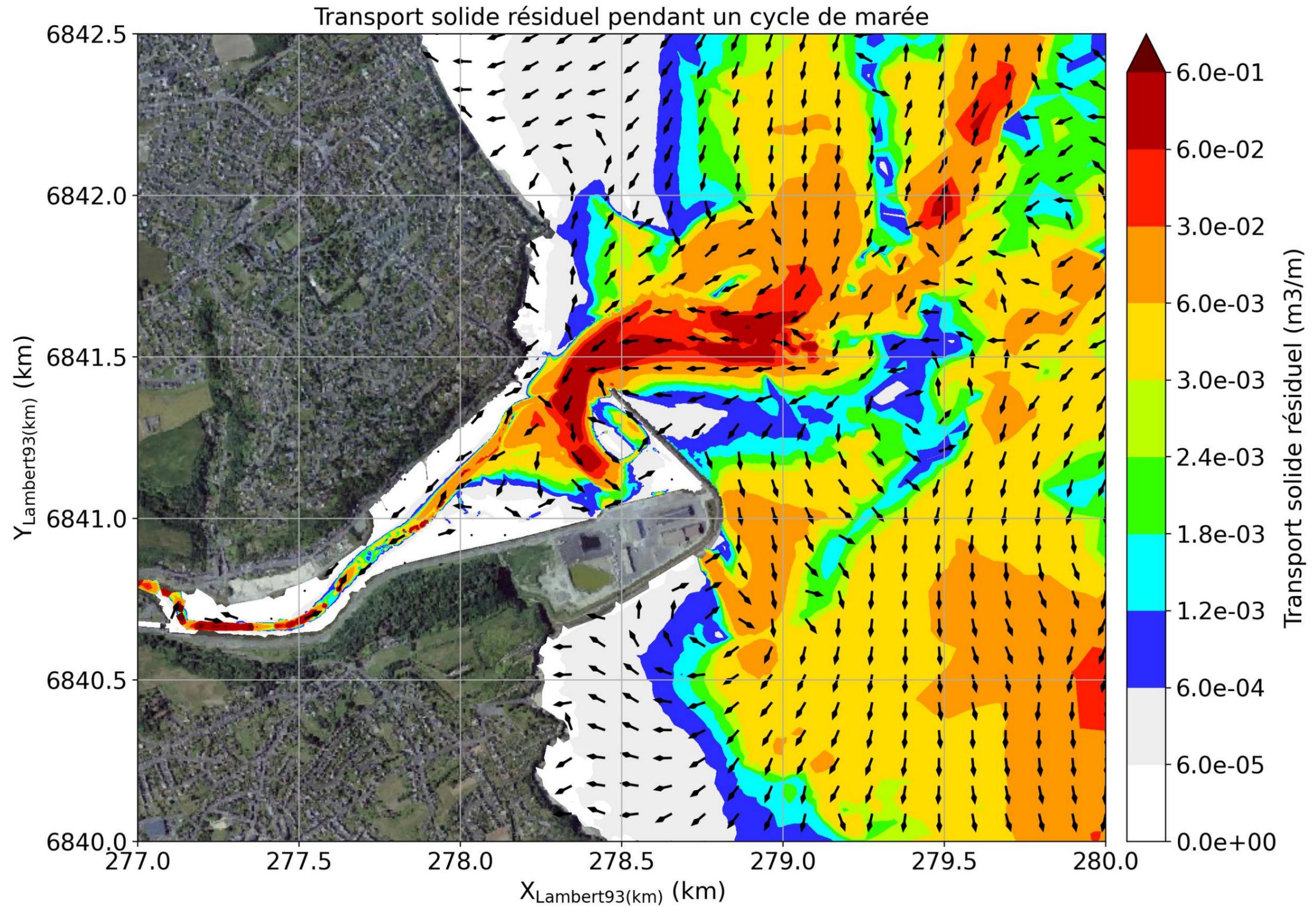


Figure 8-57: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom sur le site d'étude.

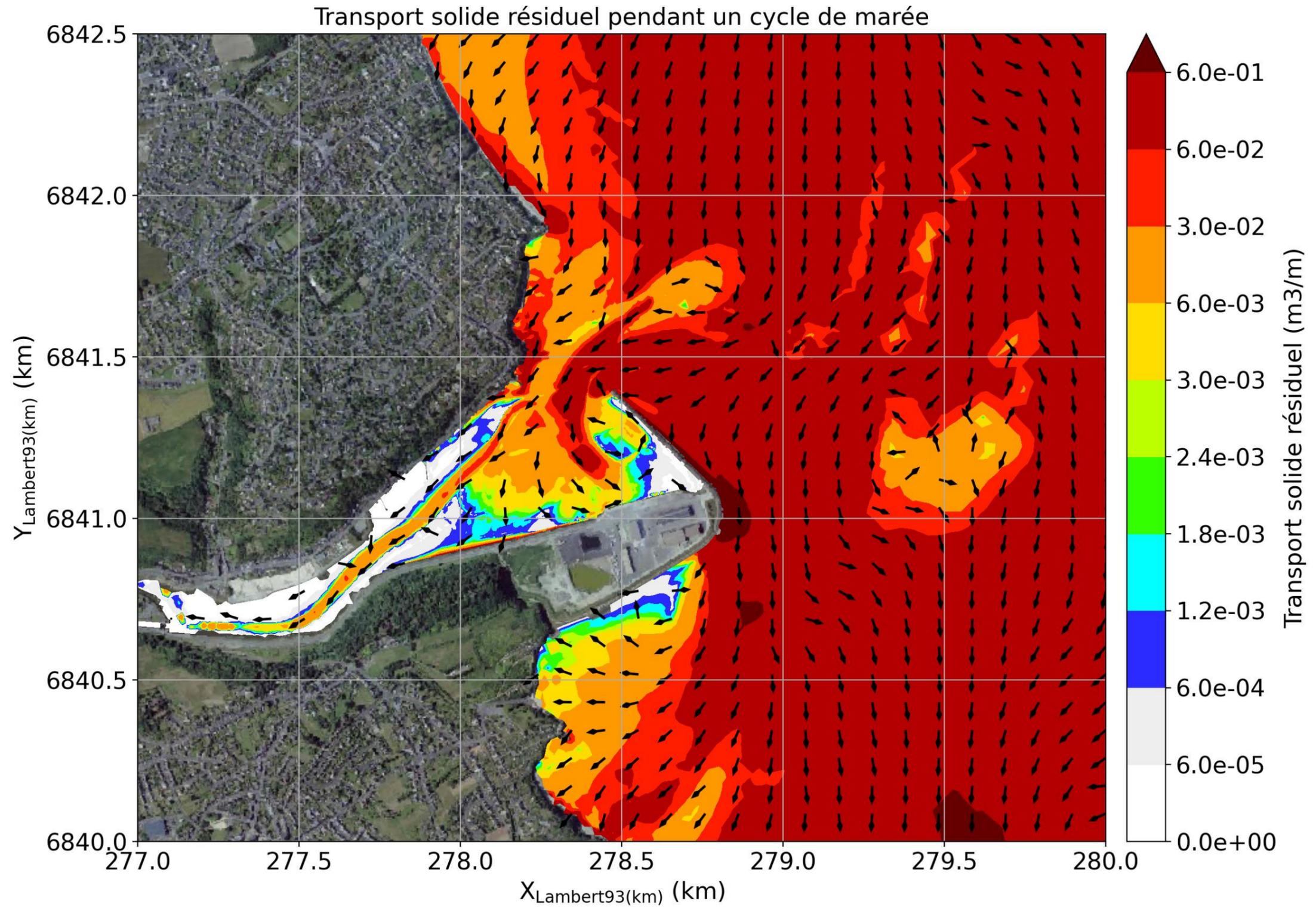


Figure 8-58: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 7 - Zoom sur le site d'étude.

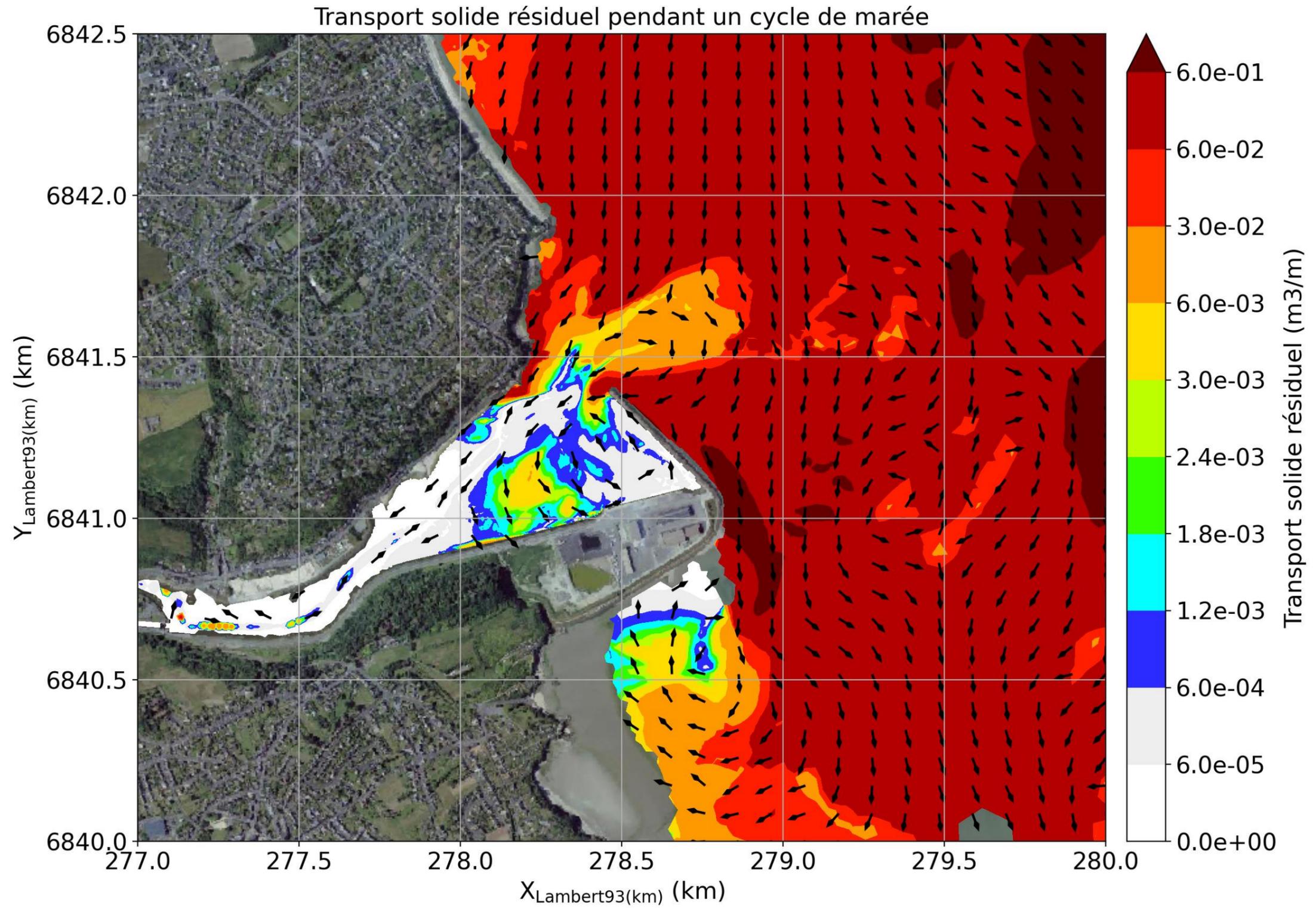


Figure 8-59: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 8 - Zoom sur le site d'étude.

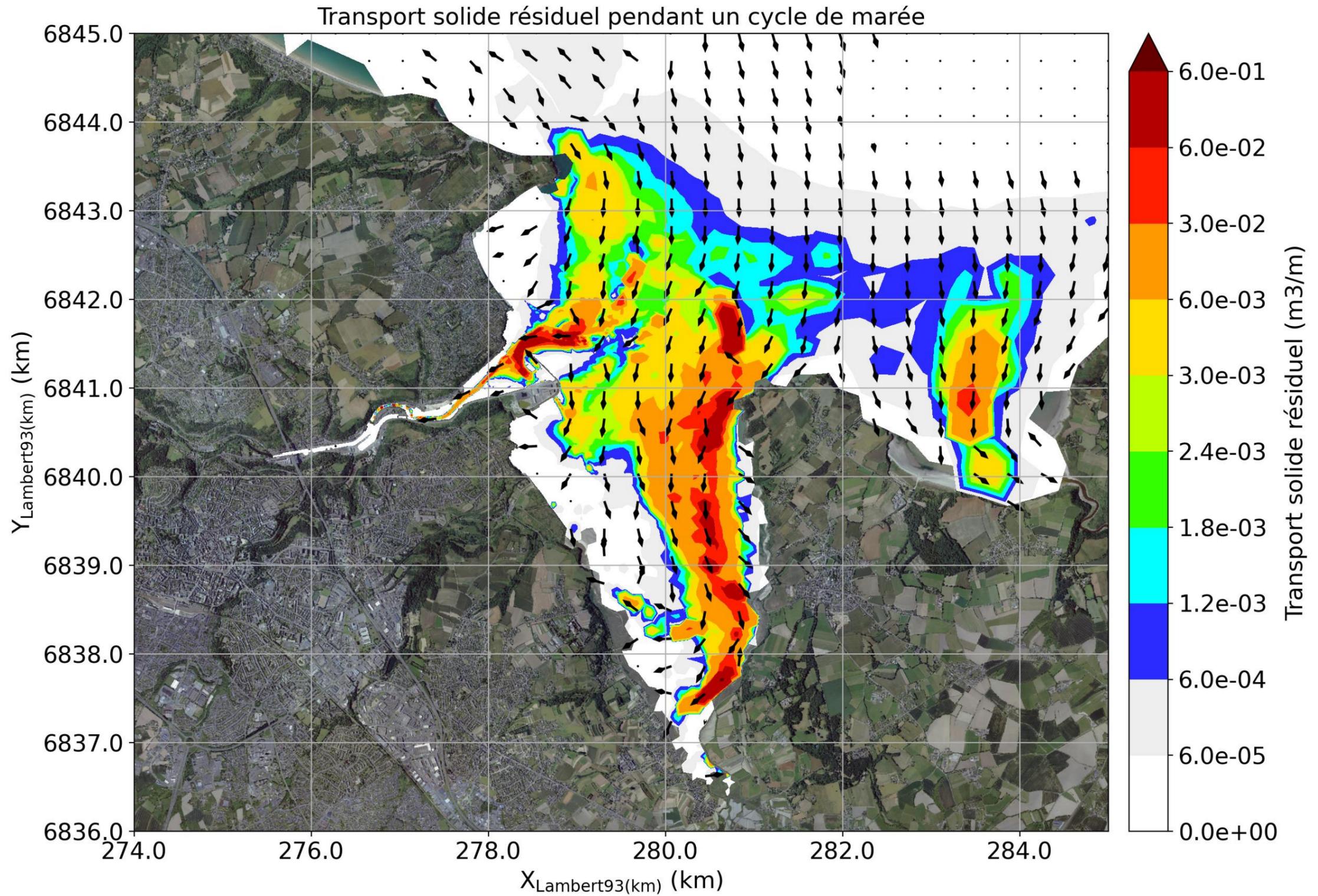


Figure 8-60: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 1 - Baie de Saint-Brieuc.

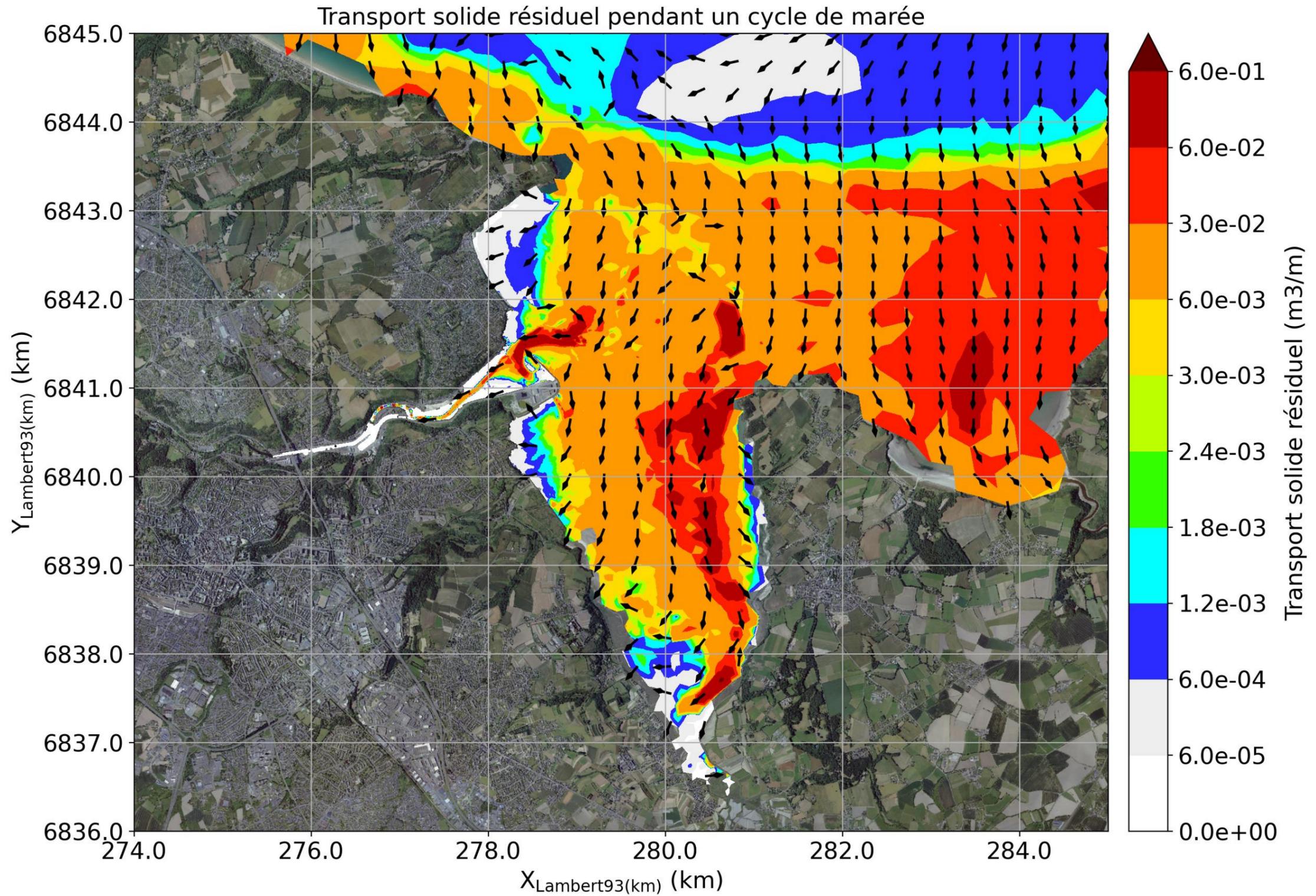


Figure 8-61: Transport solide résiduel pendant un cycle de marée pour le scénario 3 - Baie de Saint-Brieuc.

8.7.3.2 Evolution des fonds

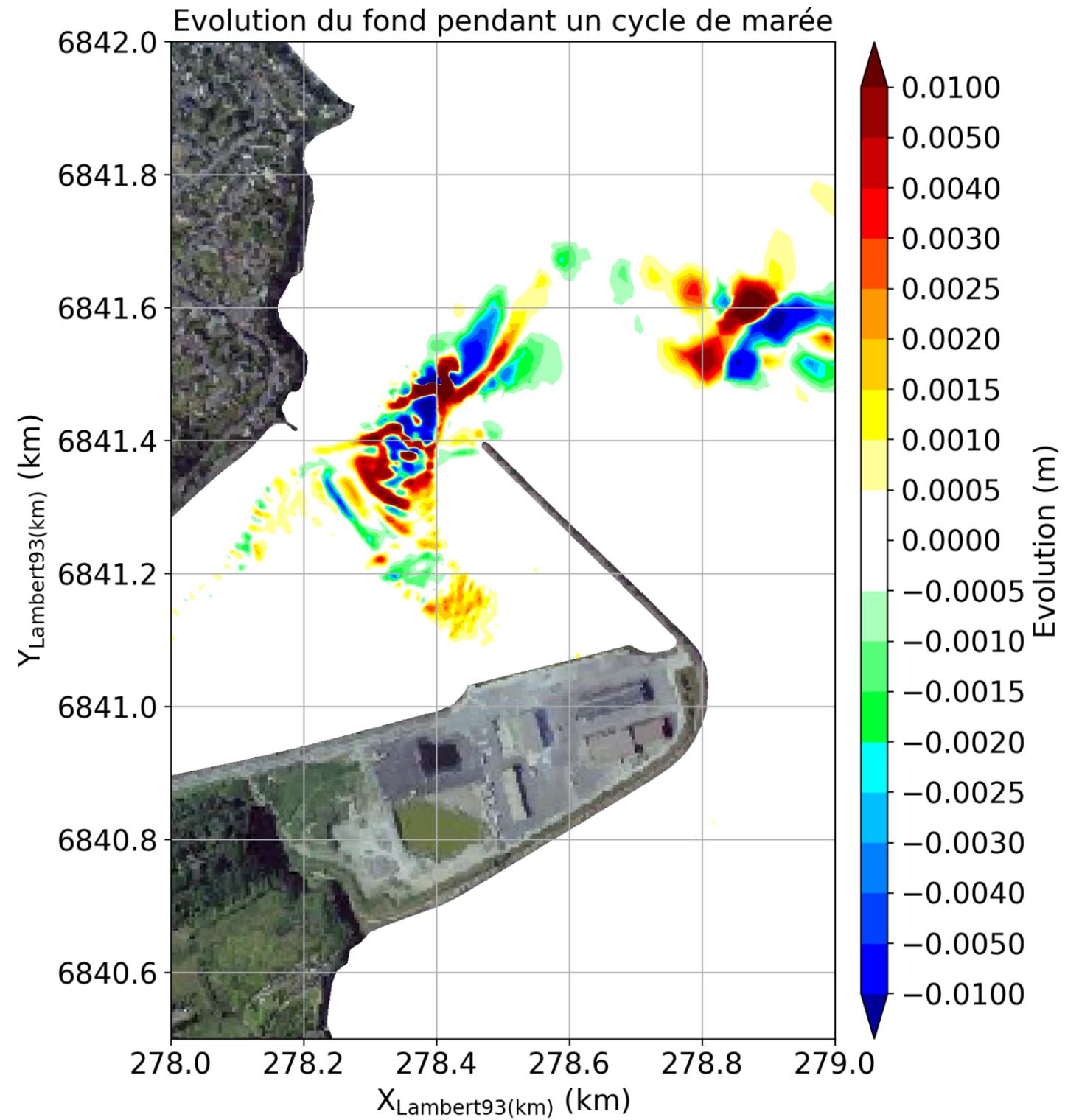


Figure 8-62: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 1 - Zoom sur l'avant-port.

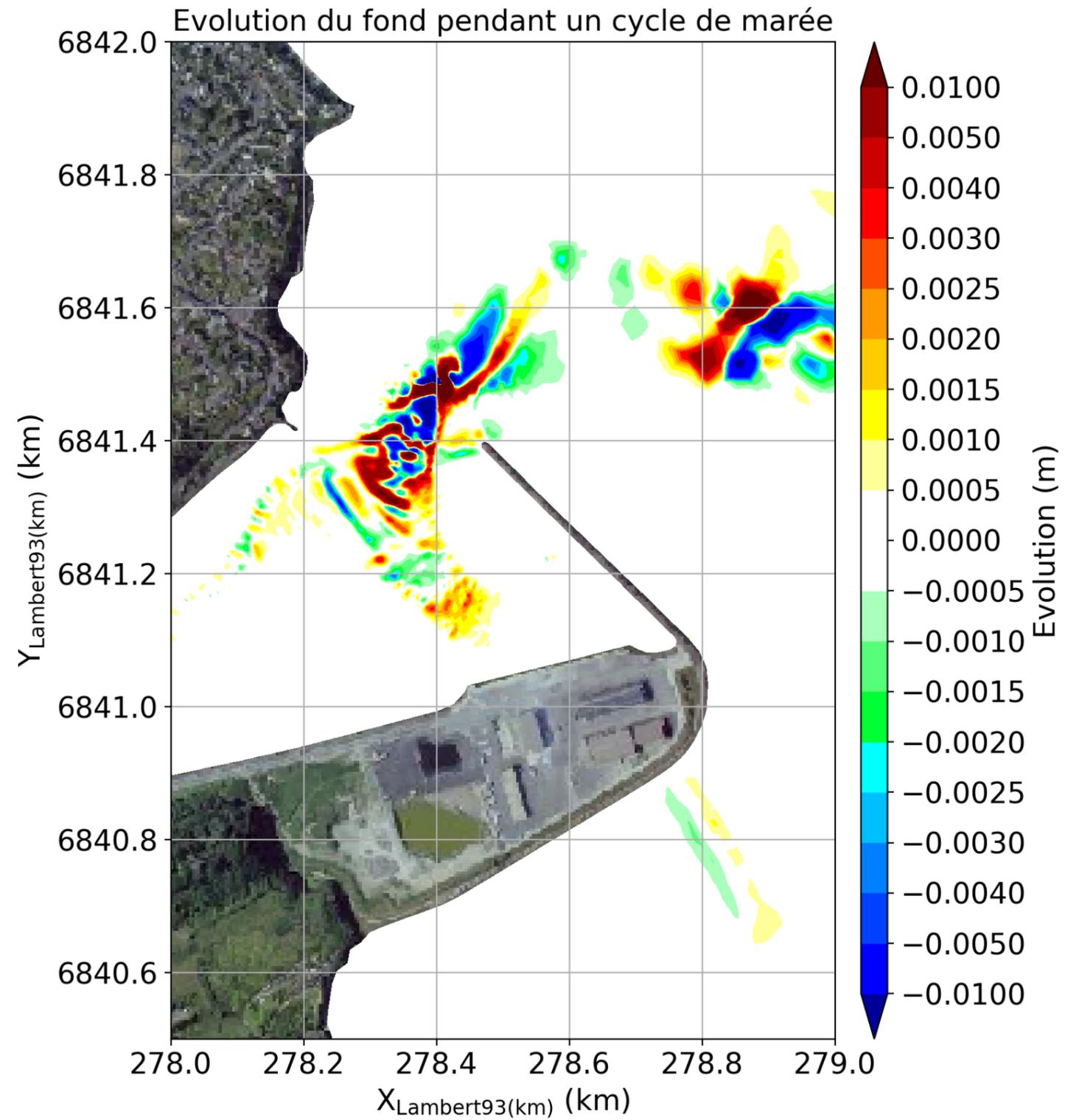


Figure 8-63: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom sur l'avant-port.

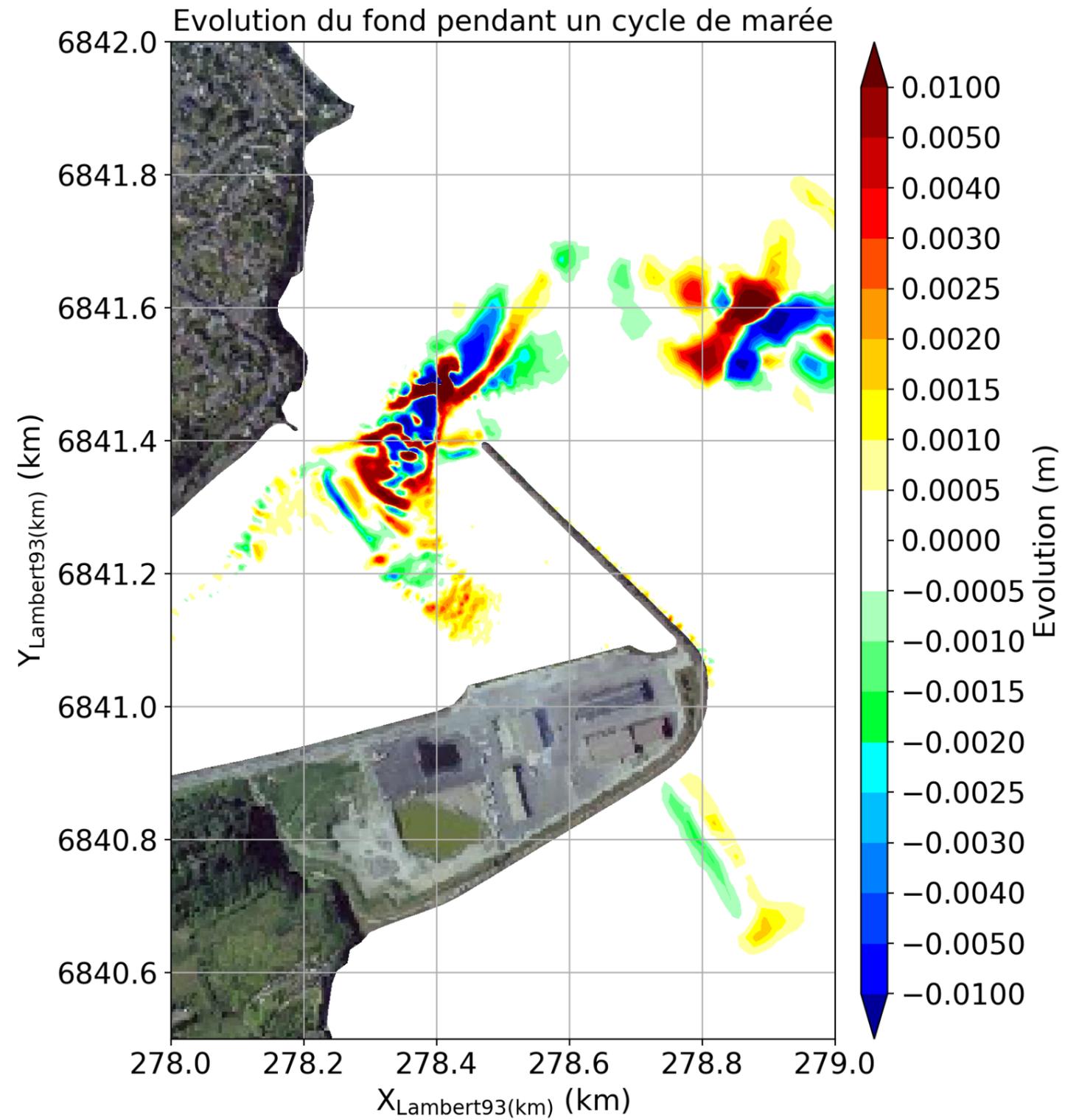


Figure 8-64: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 3 - Zoom sur l'avant-port.

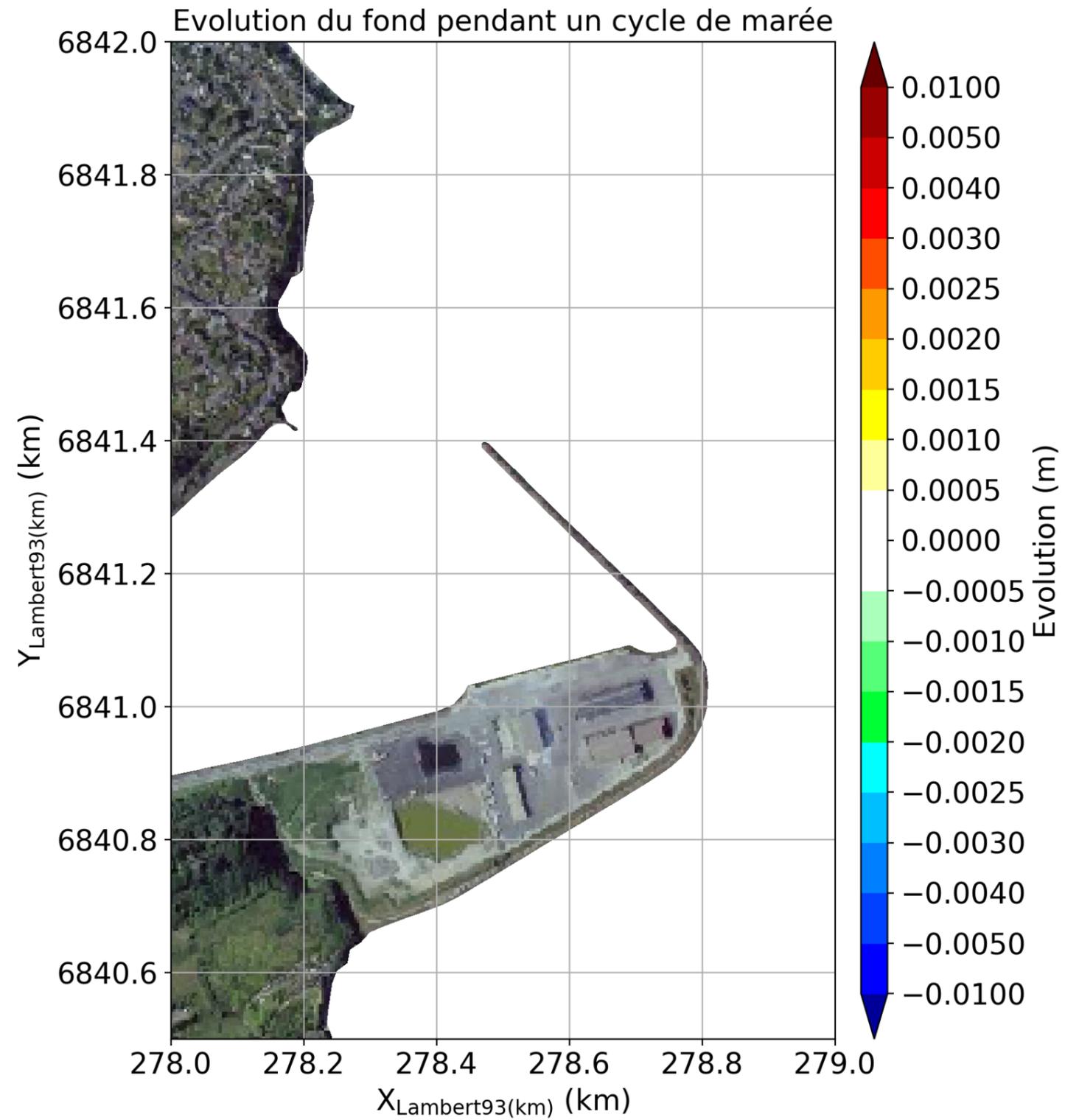


Figure 8-65: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 4 - Zoom sur l'avant-port.

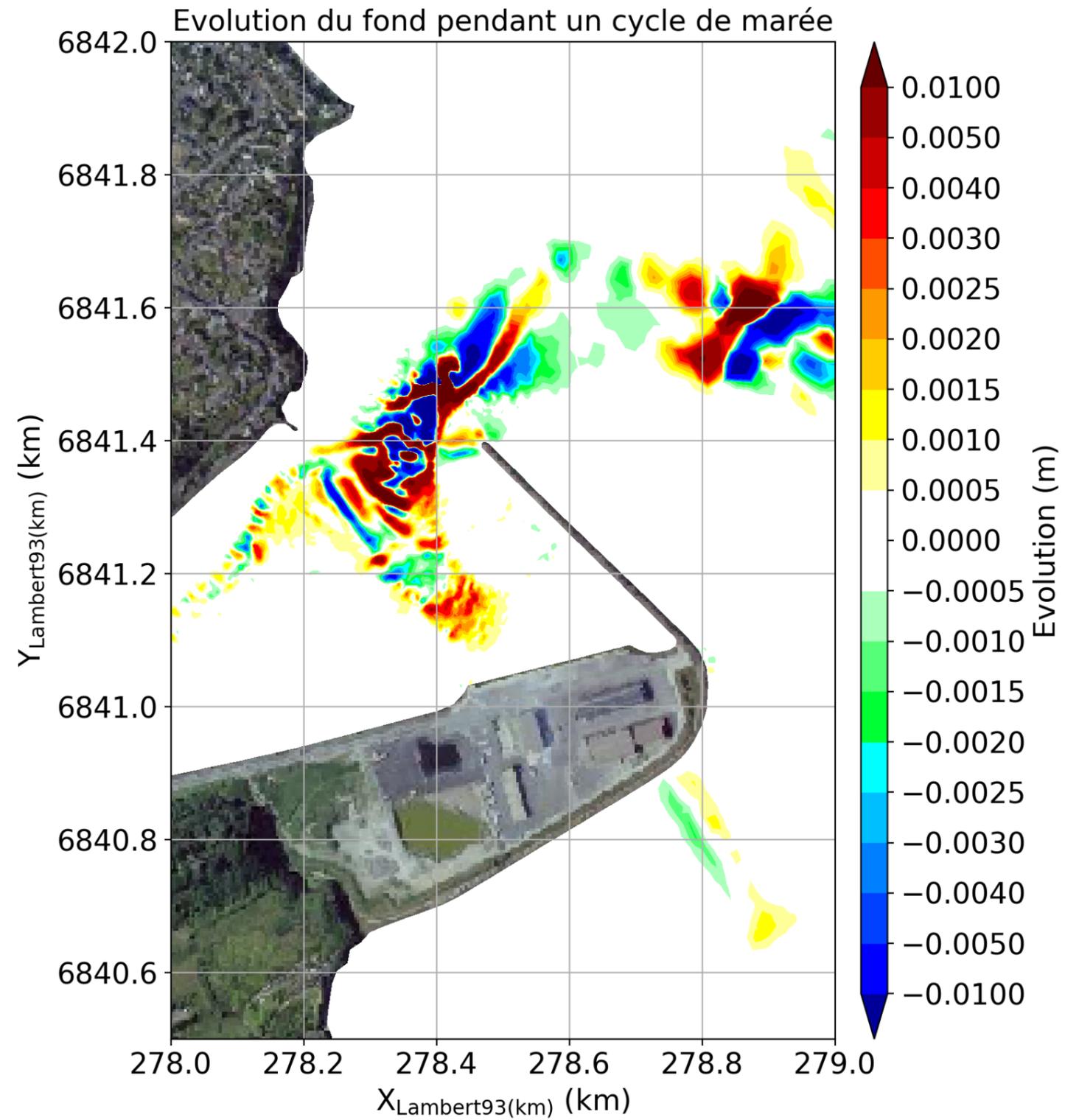


Figure 8-66: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 5 - Zoom sur l'avant-port.

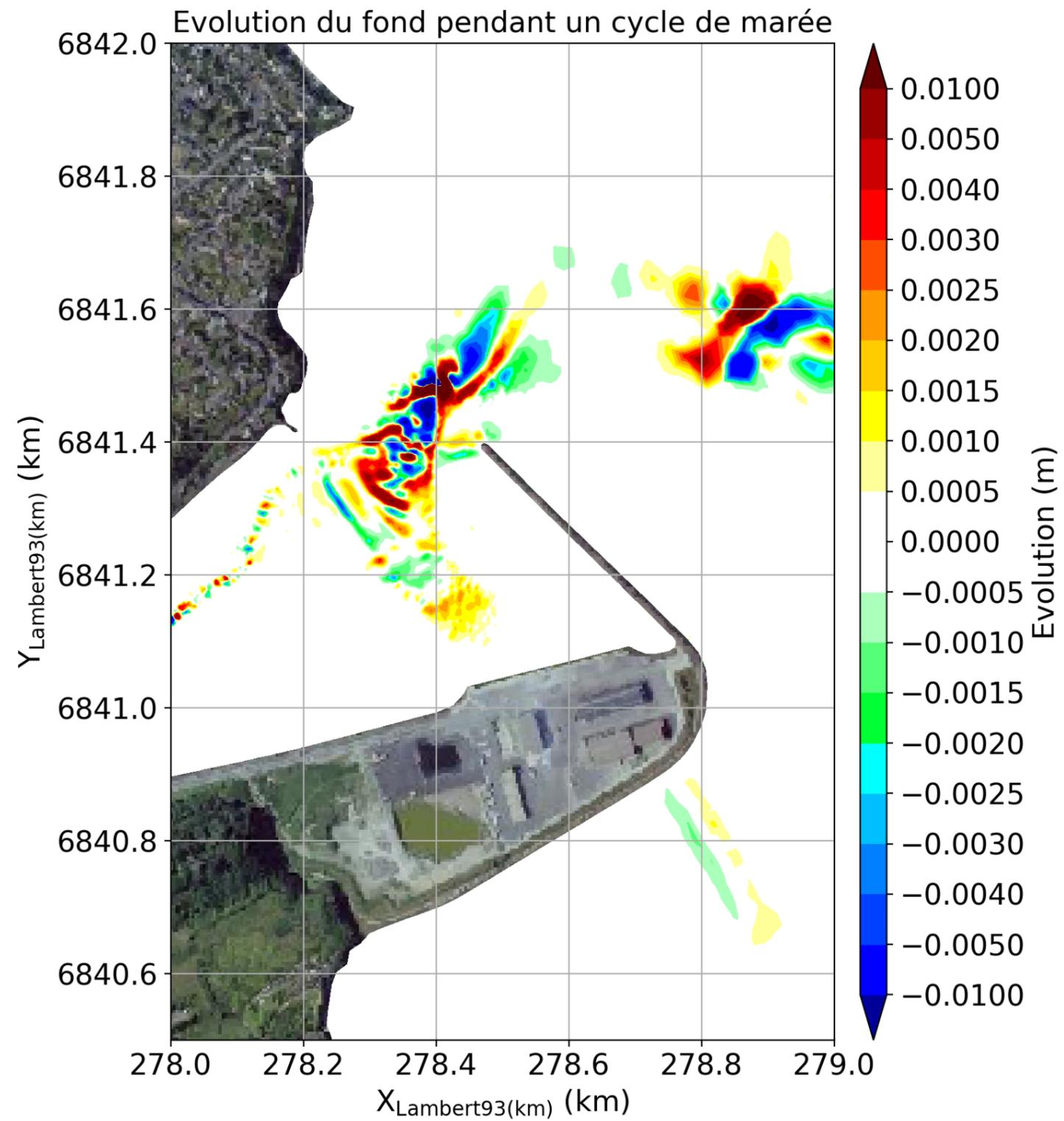


Figure 8-67: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom sur l'avant-port.

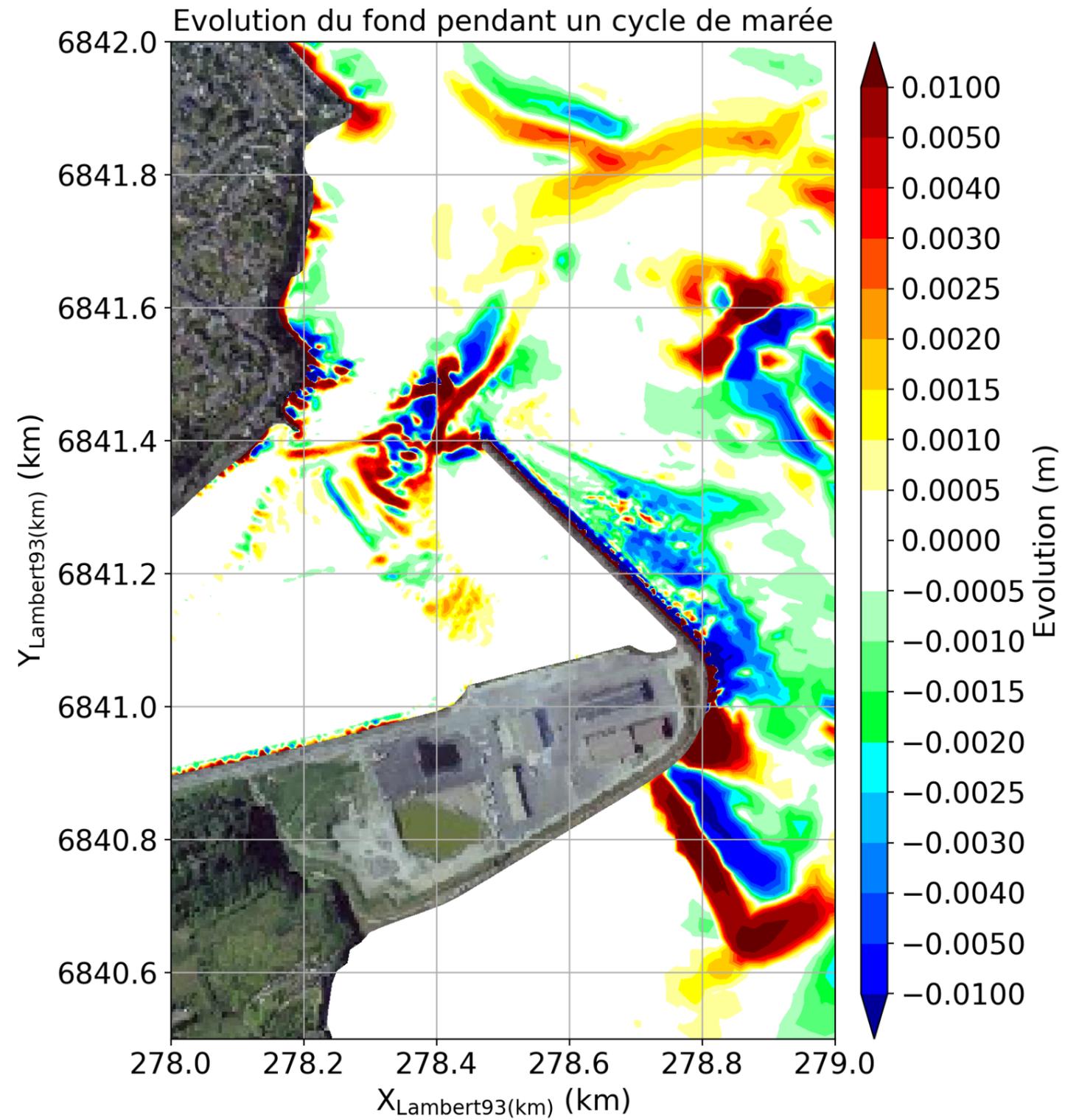


Figure 8-68: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 7 - Zoom sur l'avant-port.

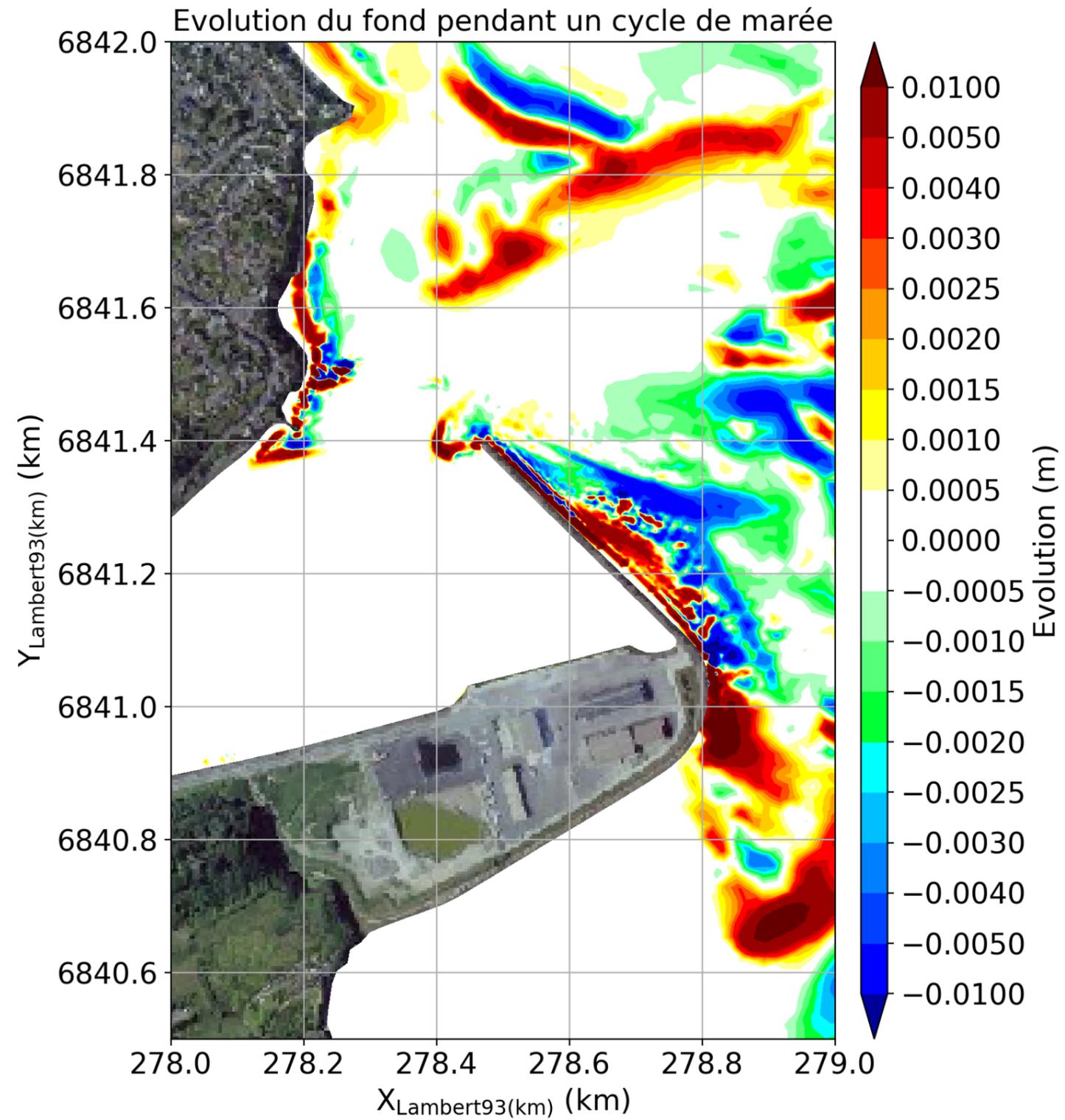


Figure 8-69: Evolution des fonds au cours d'un cycle de marée pour le scénario 8 - Zoom sur l'avant-port.

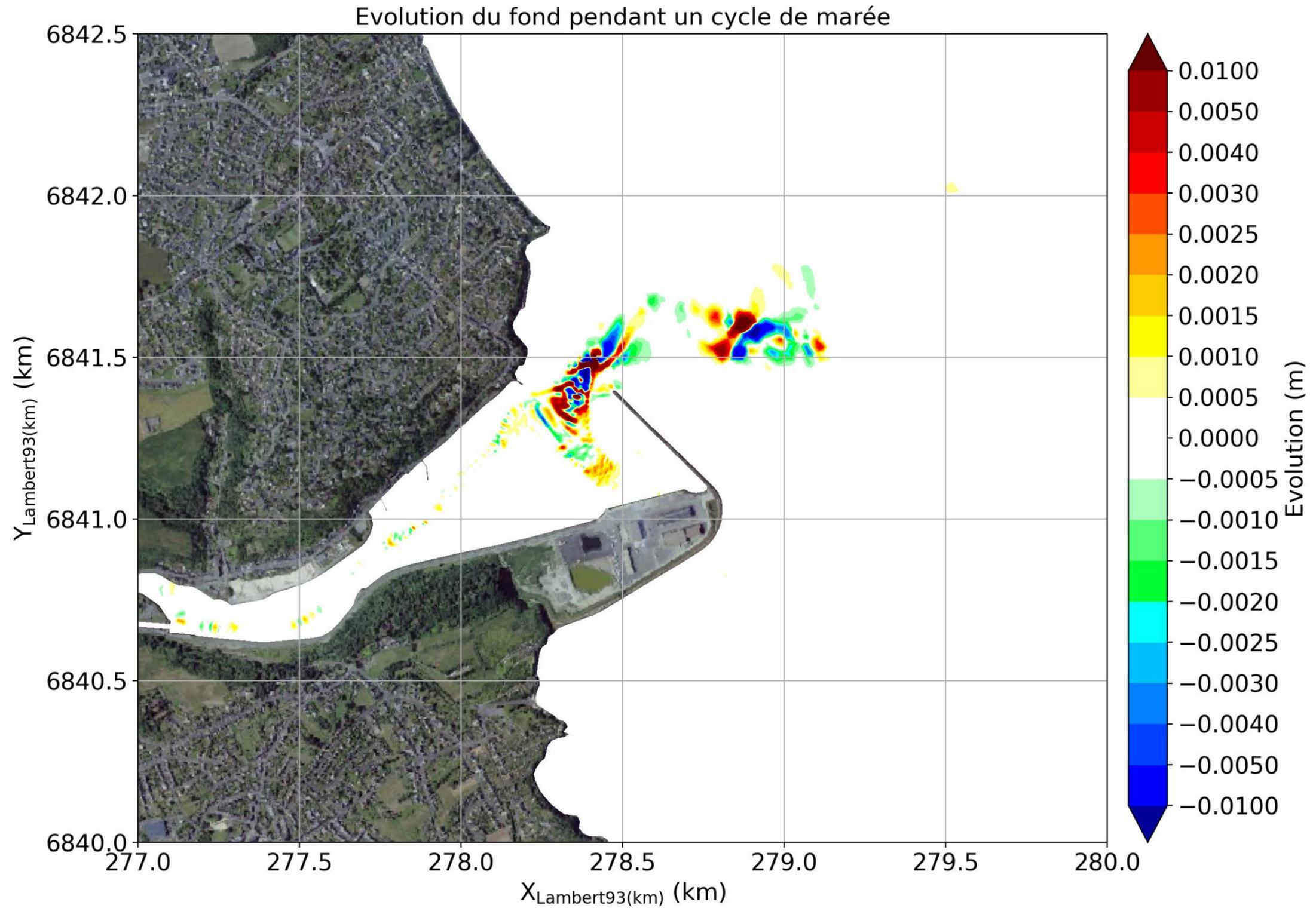


Figure 8-70: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 1 - Zoom sur le site d'étude.

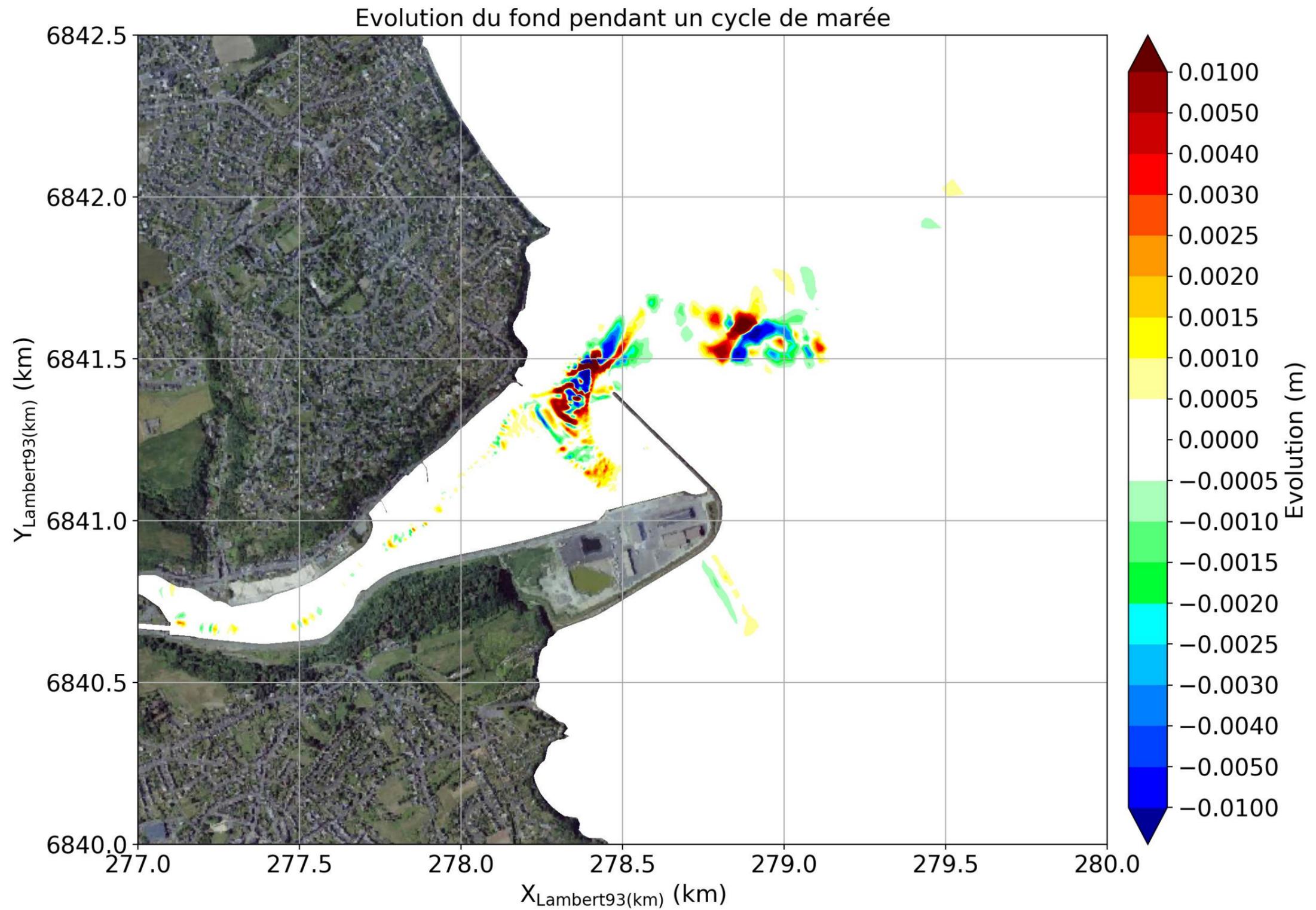


Figure 8-71: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom sur le site d'étude.

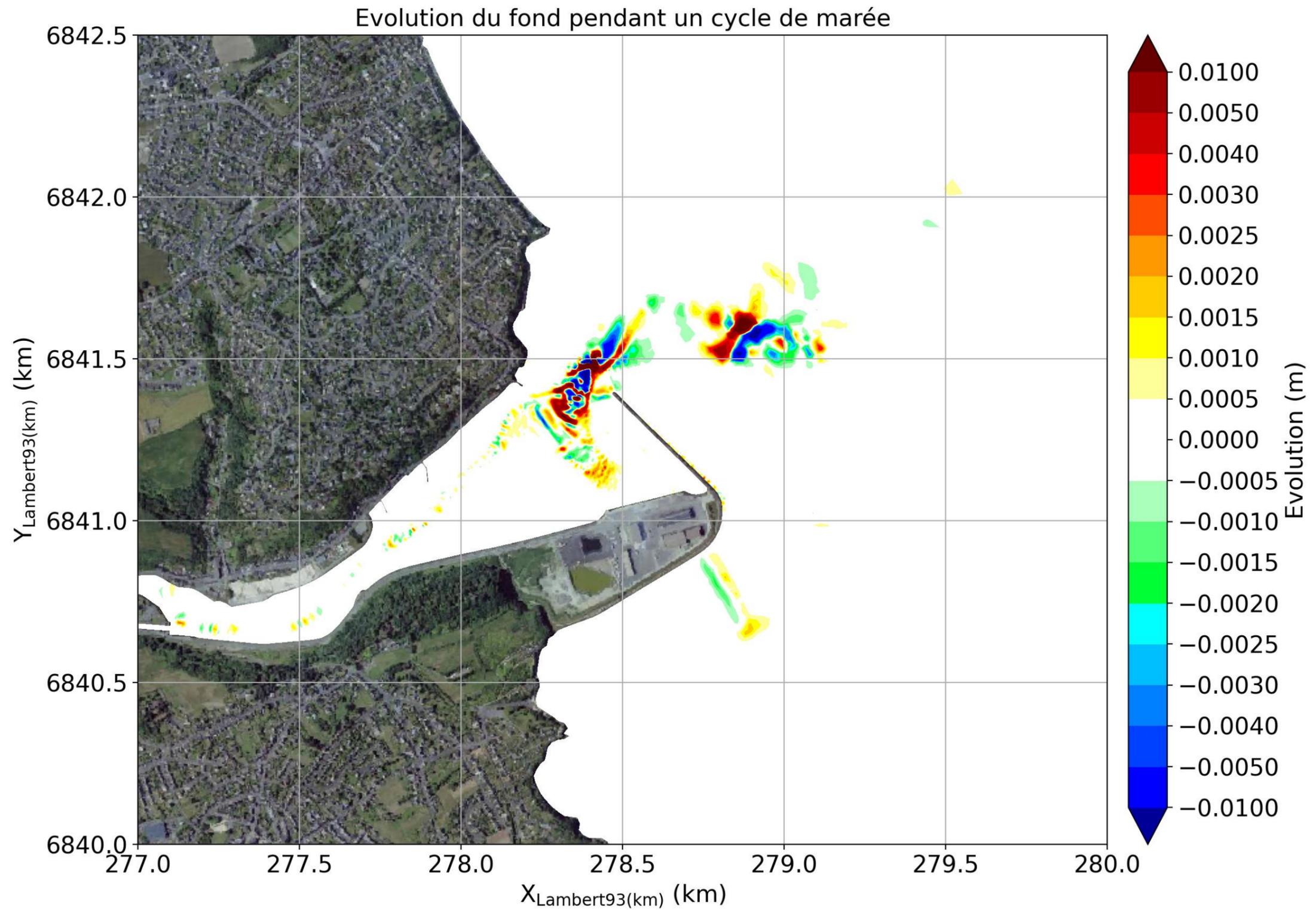


Figure 8-72: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 3 - Zoom sur le site d'étude.

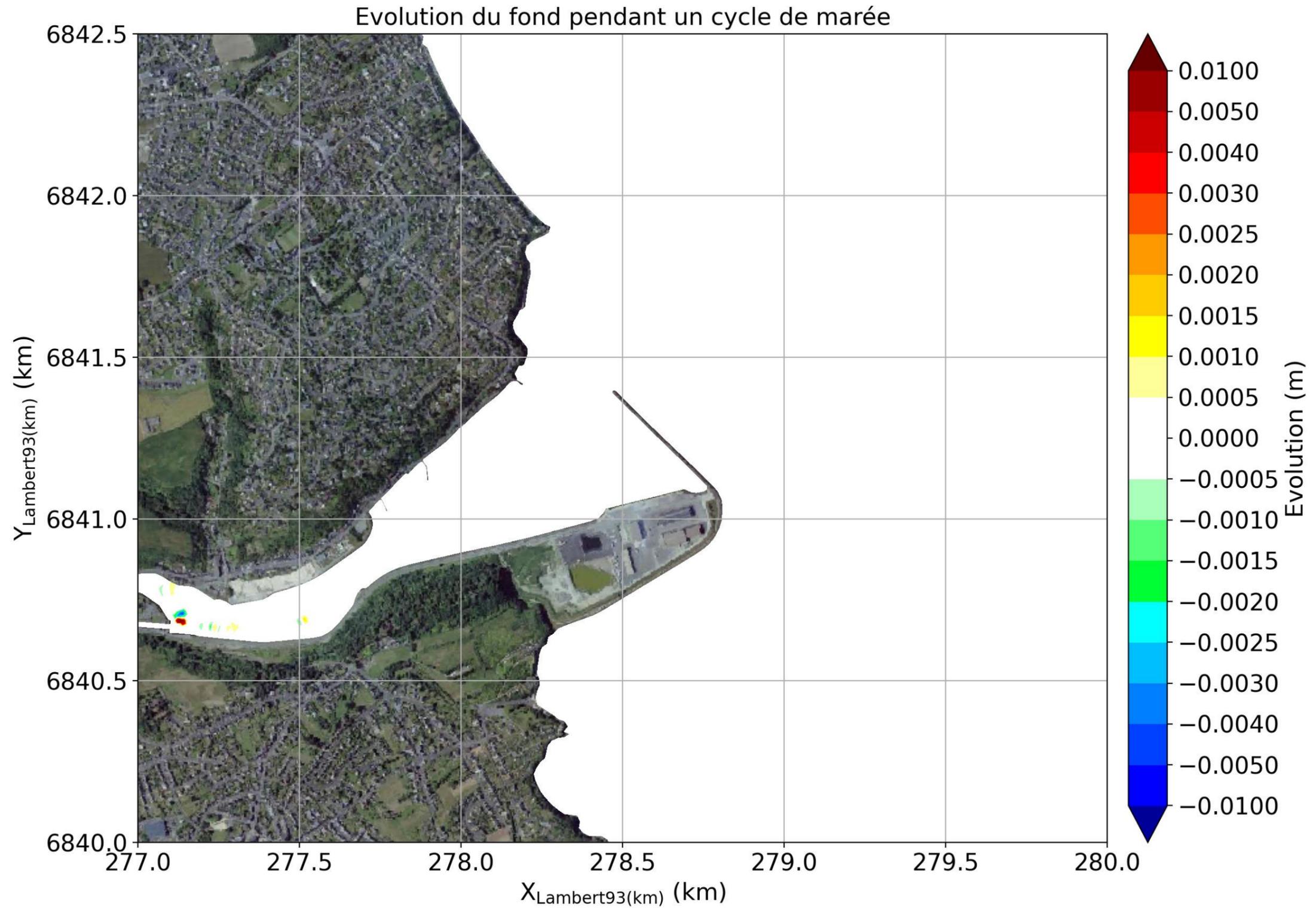


Figure 8-73: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 4 - Zoom sur le site d'étude.

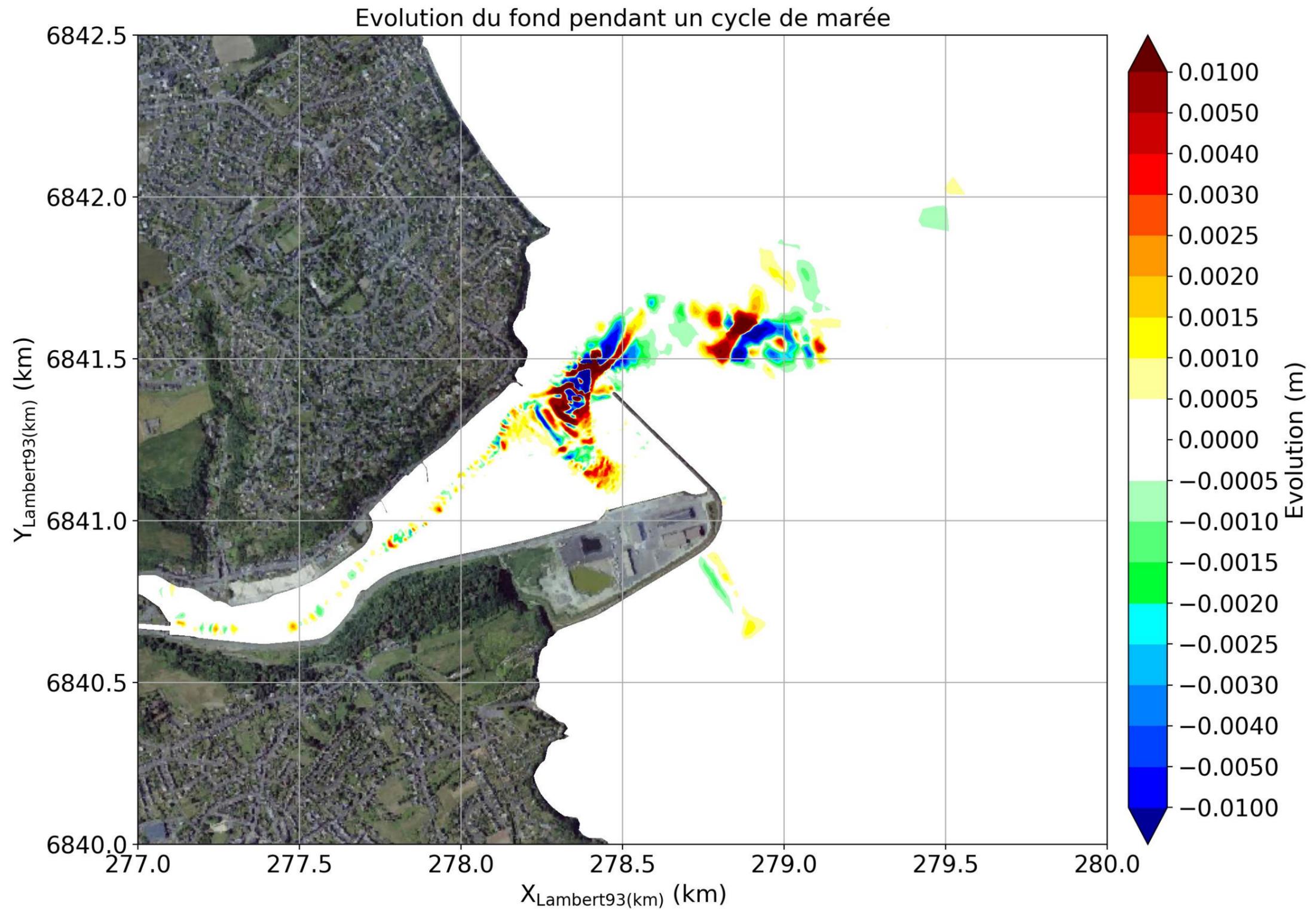


Figure 8-74: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 5 - Zoom sur le site d'étude.

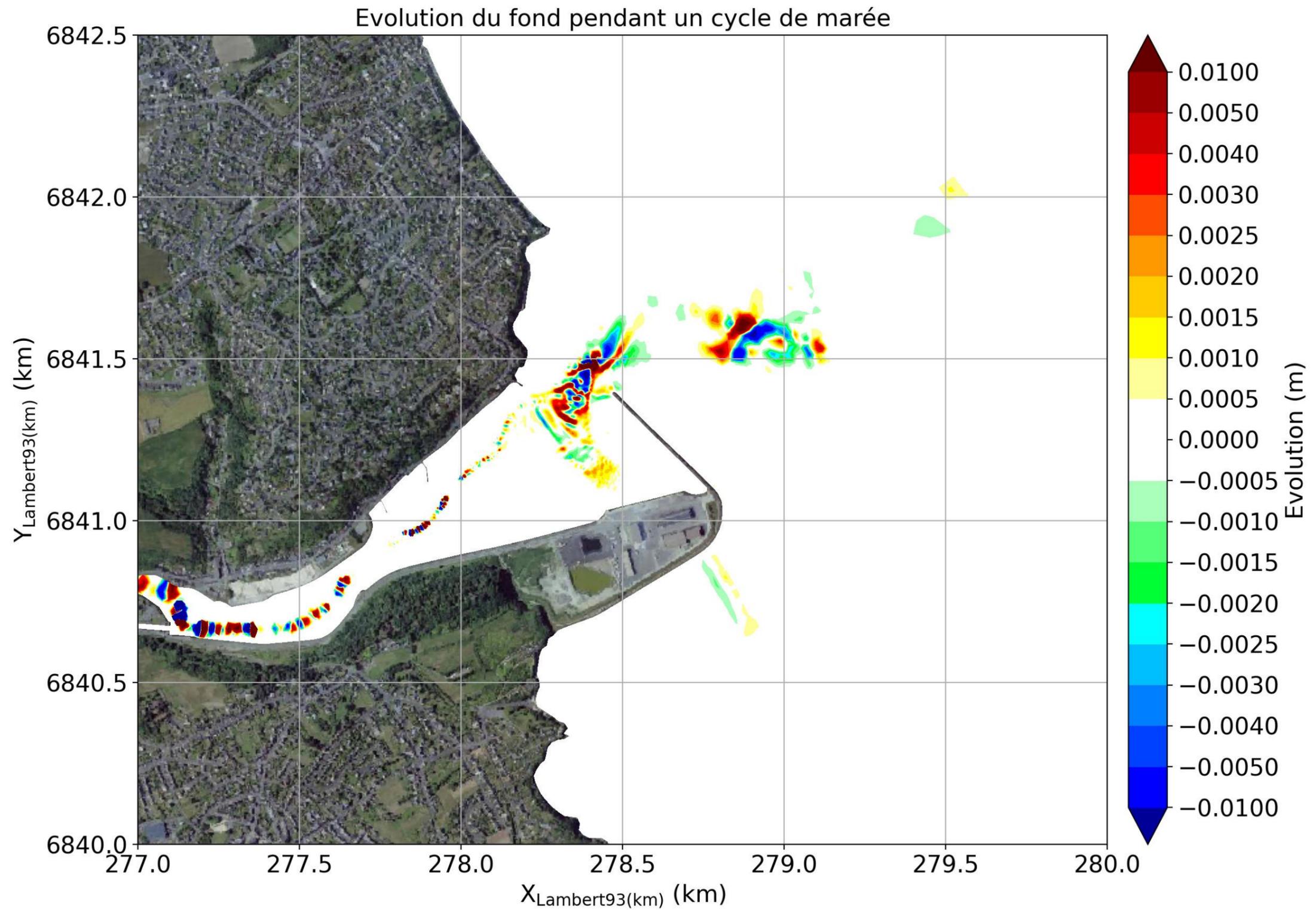


Figure 8-75: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom sur le site d'étude.

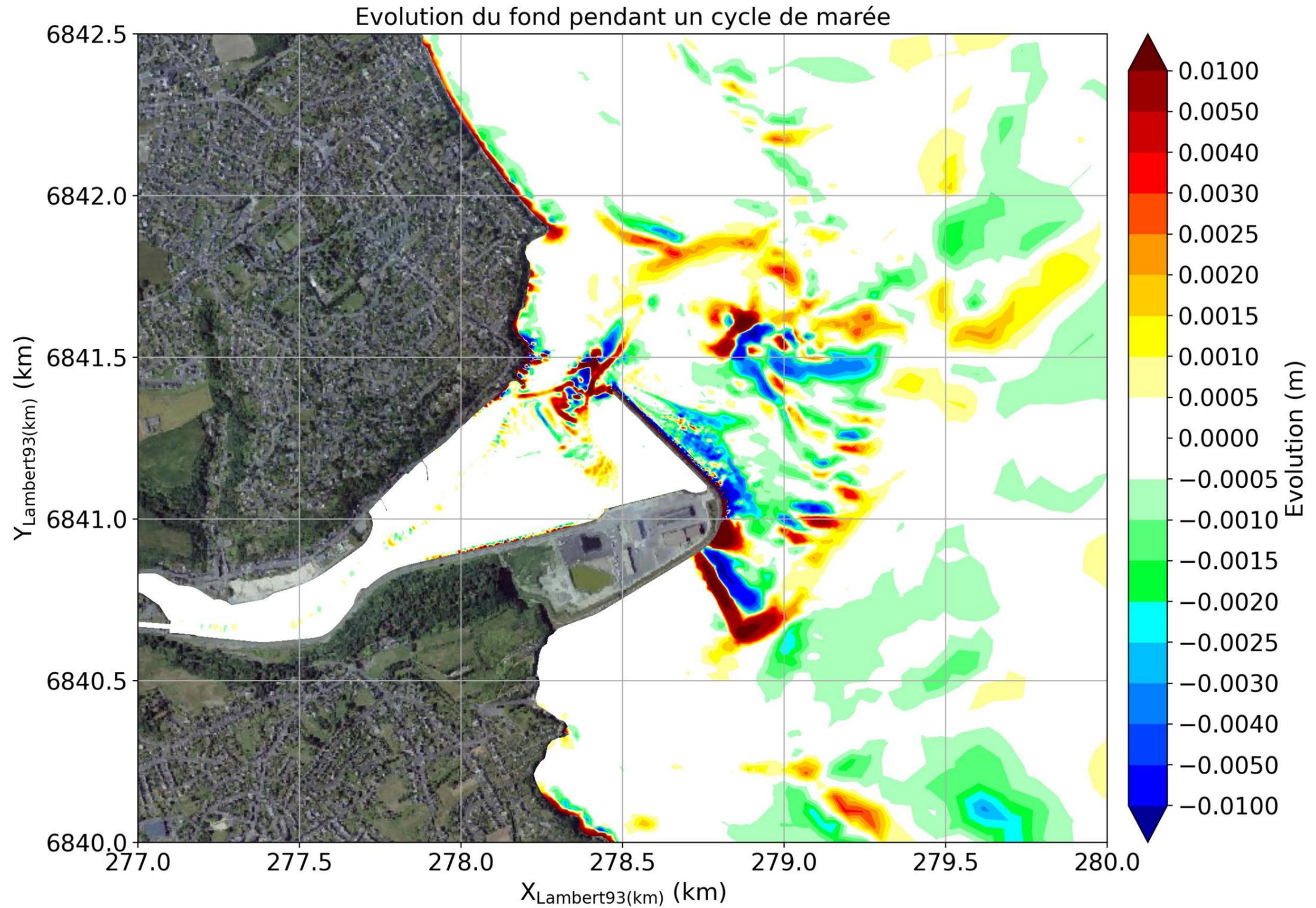


Figure 8-76: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 7 - Zoom sur le site d'étude.

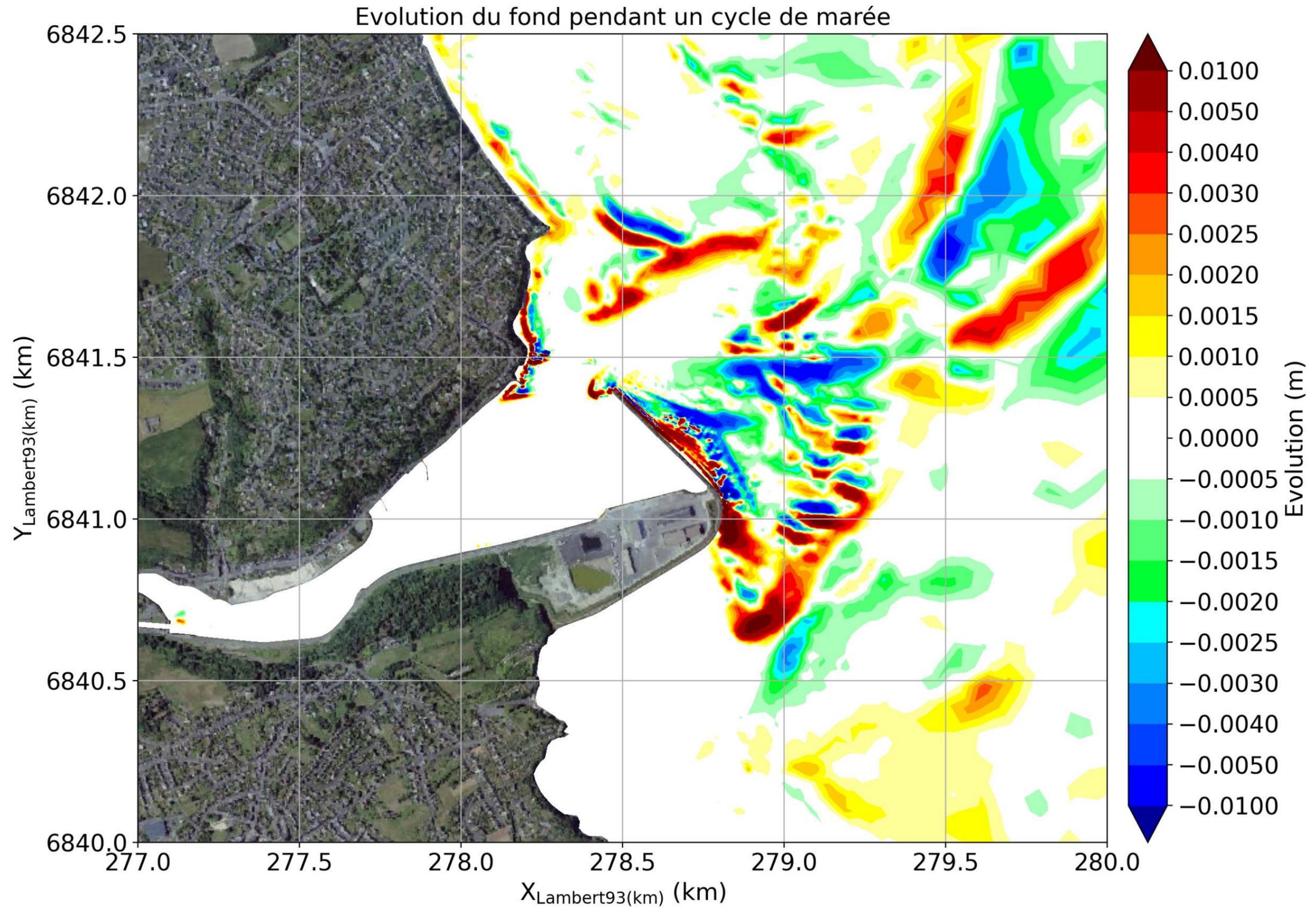


Figure 8-77: Evolution des fonds pendant un cycle de marée pour le scénario 8 - Zoom sur le site d'étude.

8.7.3.3 Transport maximal

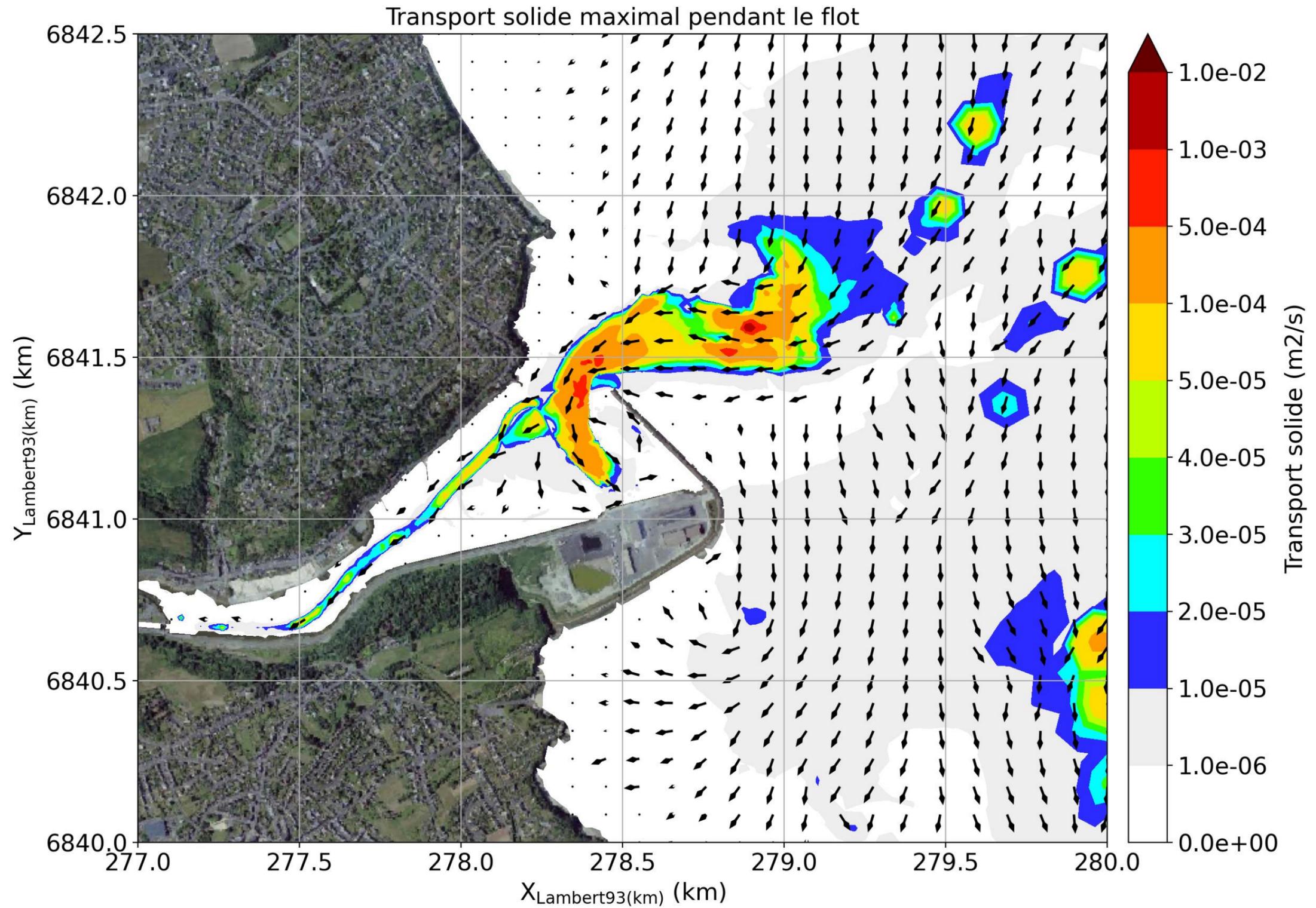


Figure 8-78: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 1.

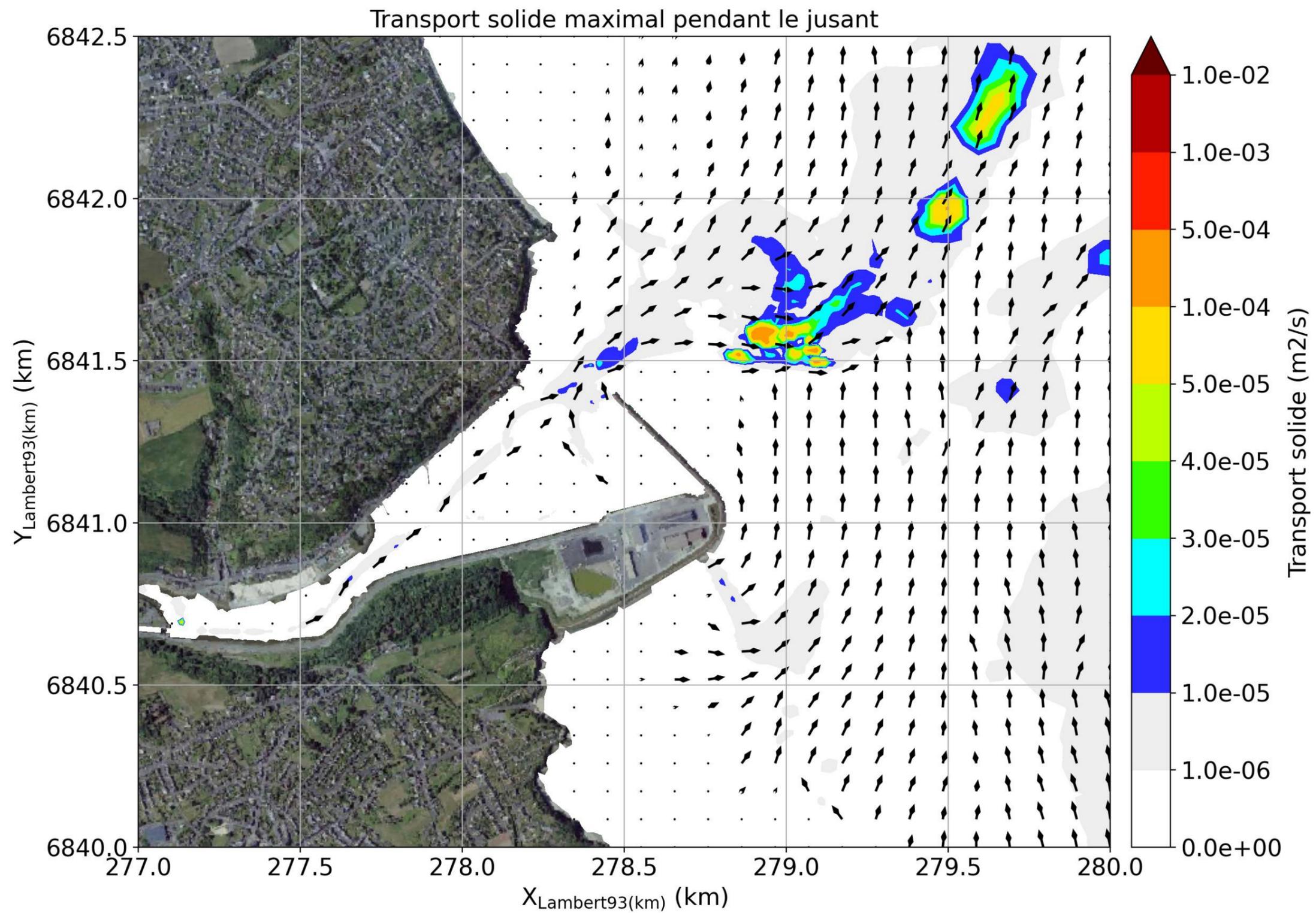


Figure 8-79: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 1.

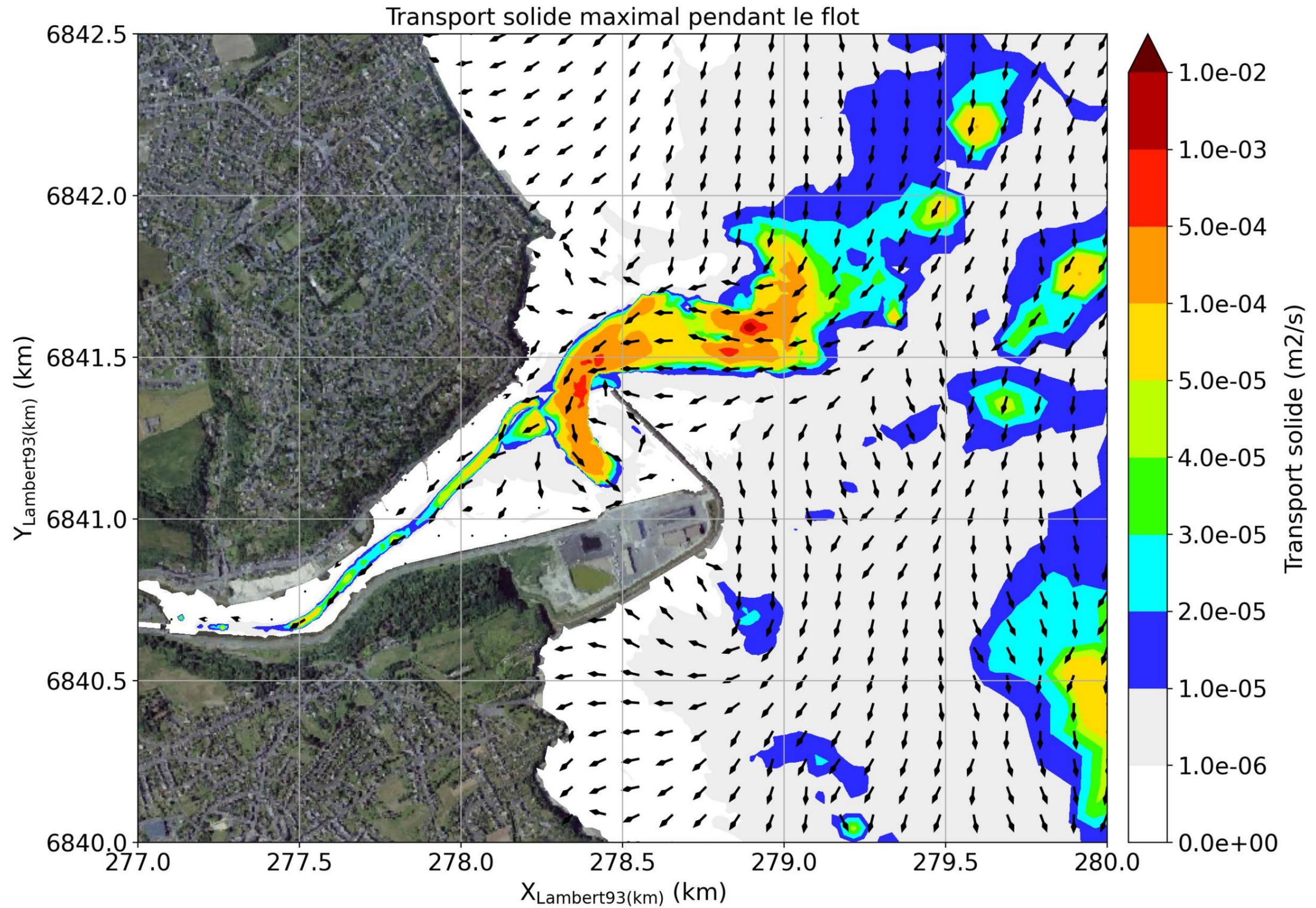


Figure 8-80: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 2.

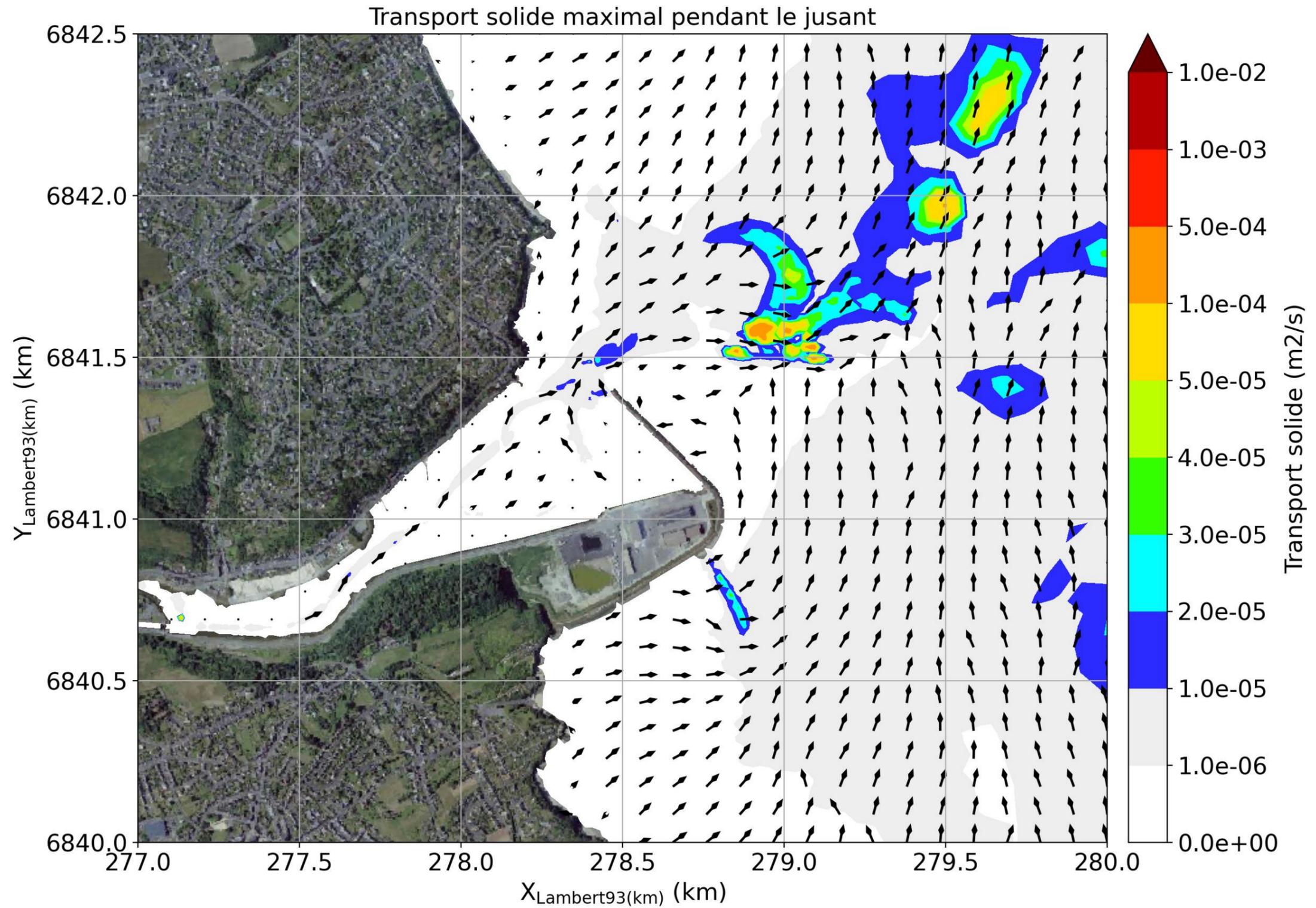


Figure 8-81: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 2.

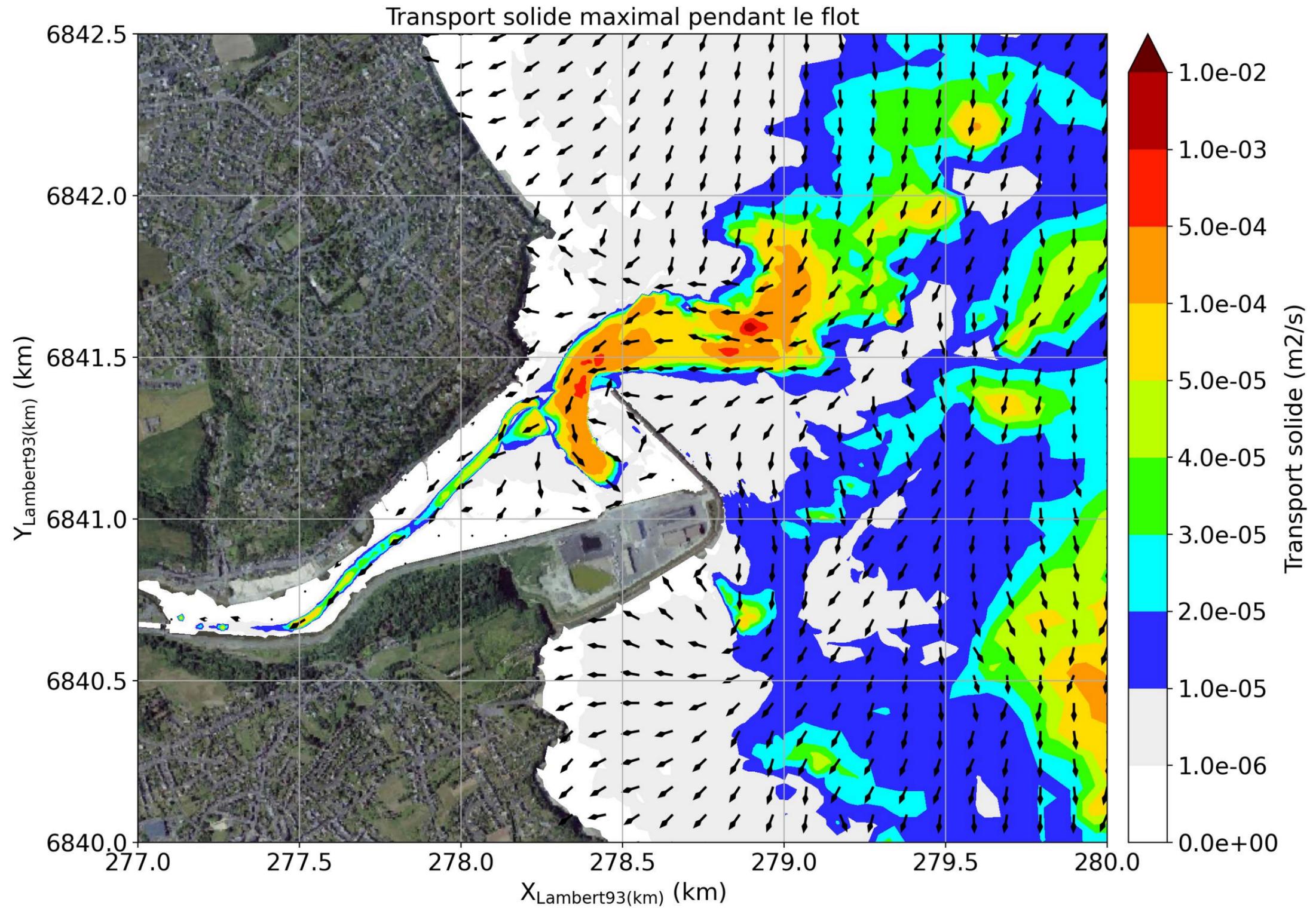


Figure 8-82: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 3.

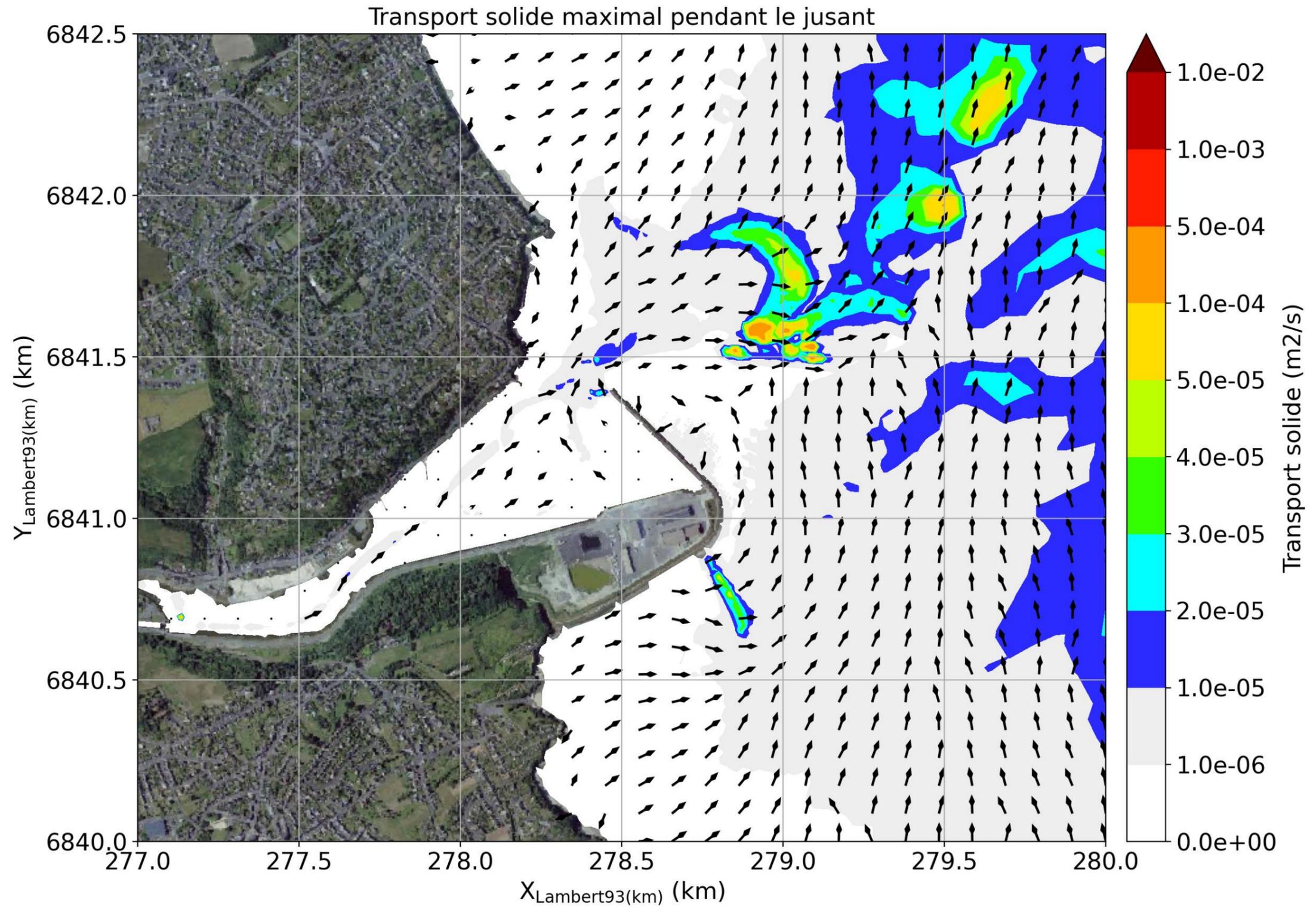


Figure 8-83: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 3.

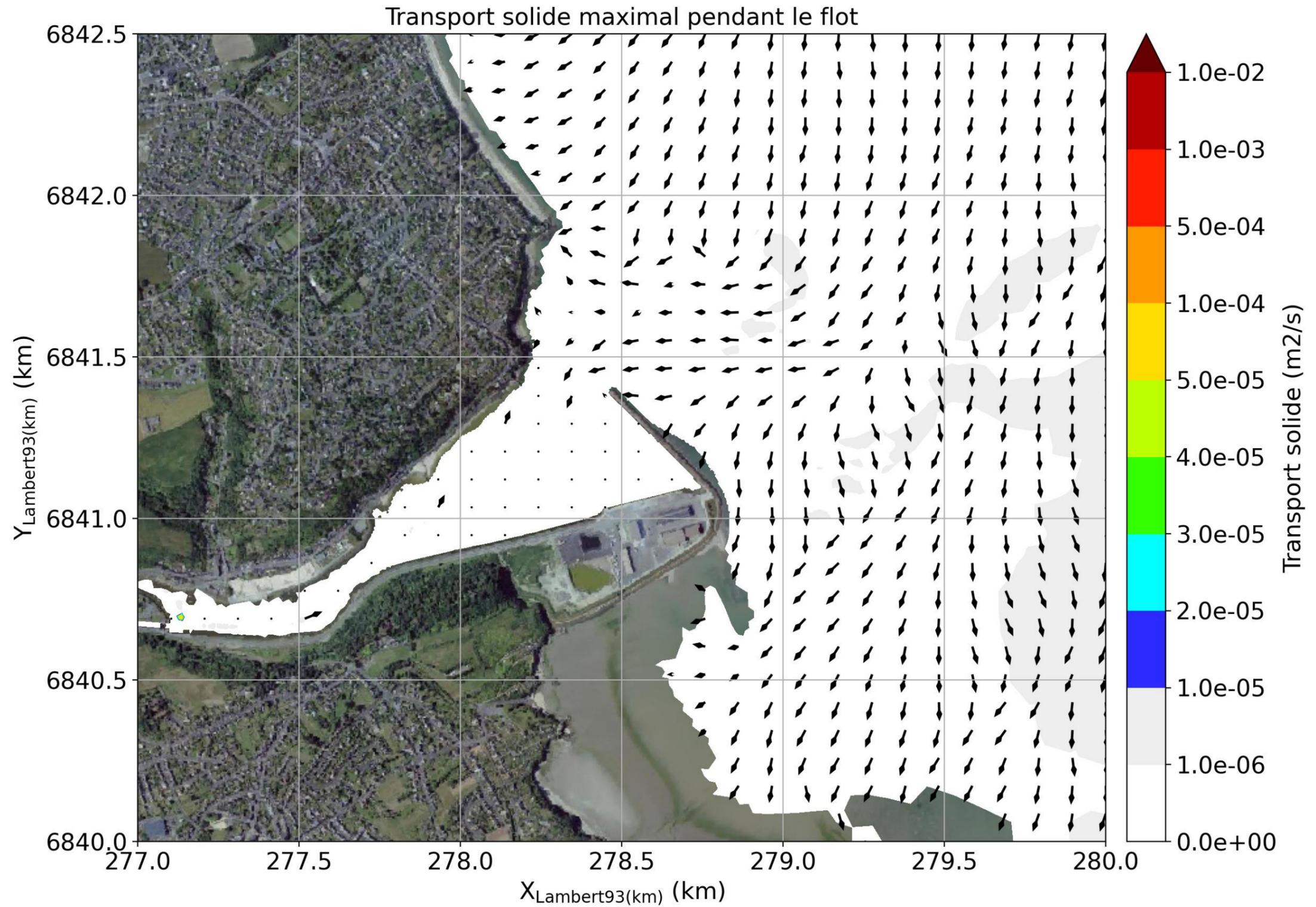


Figure 8-84: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 4.

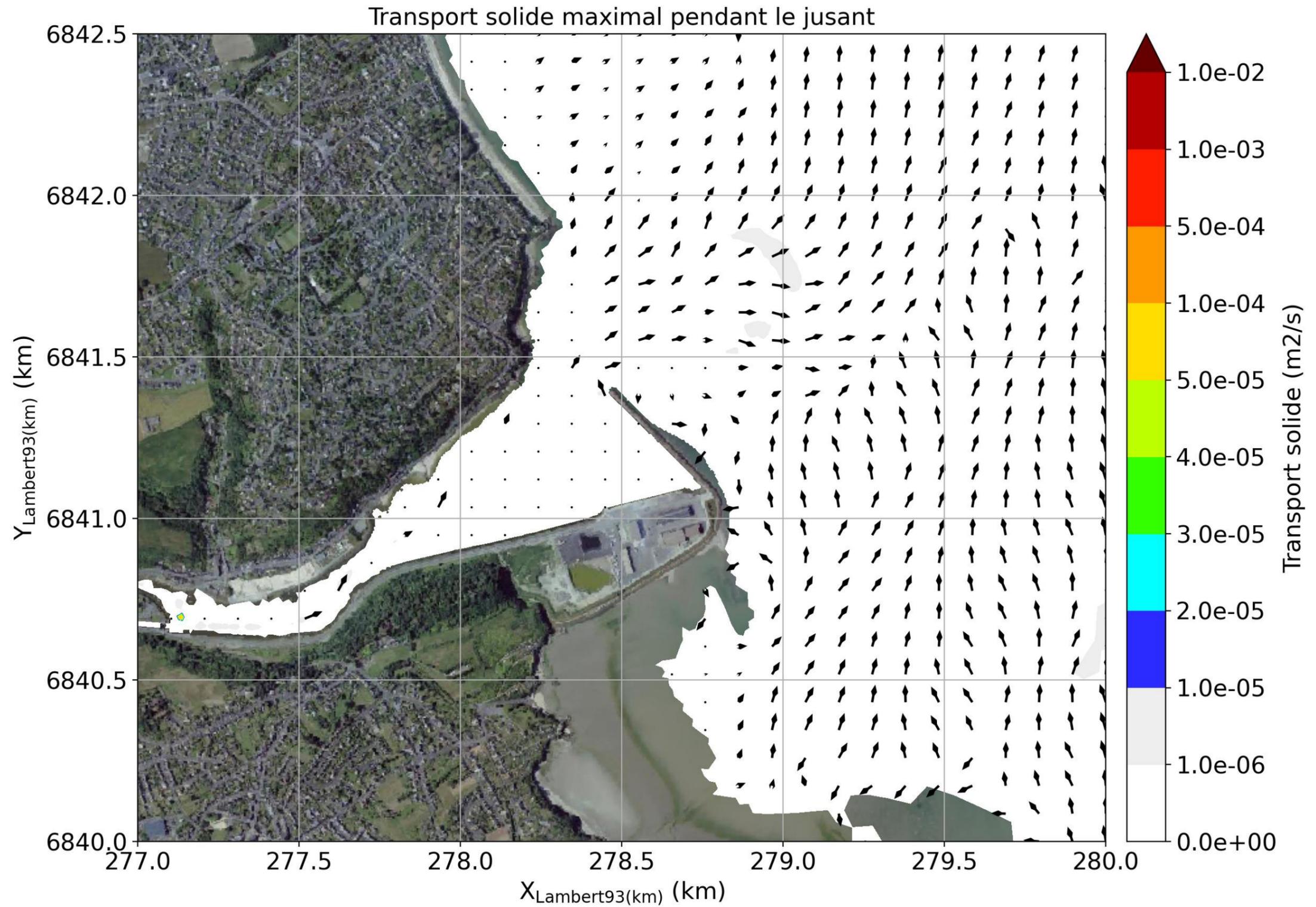


Figure 8-85: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 4.

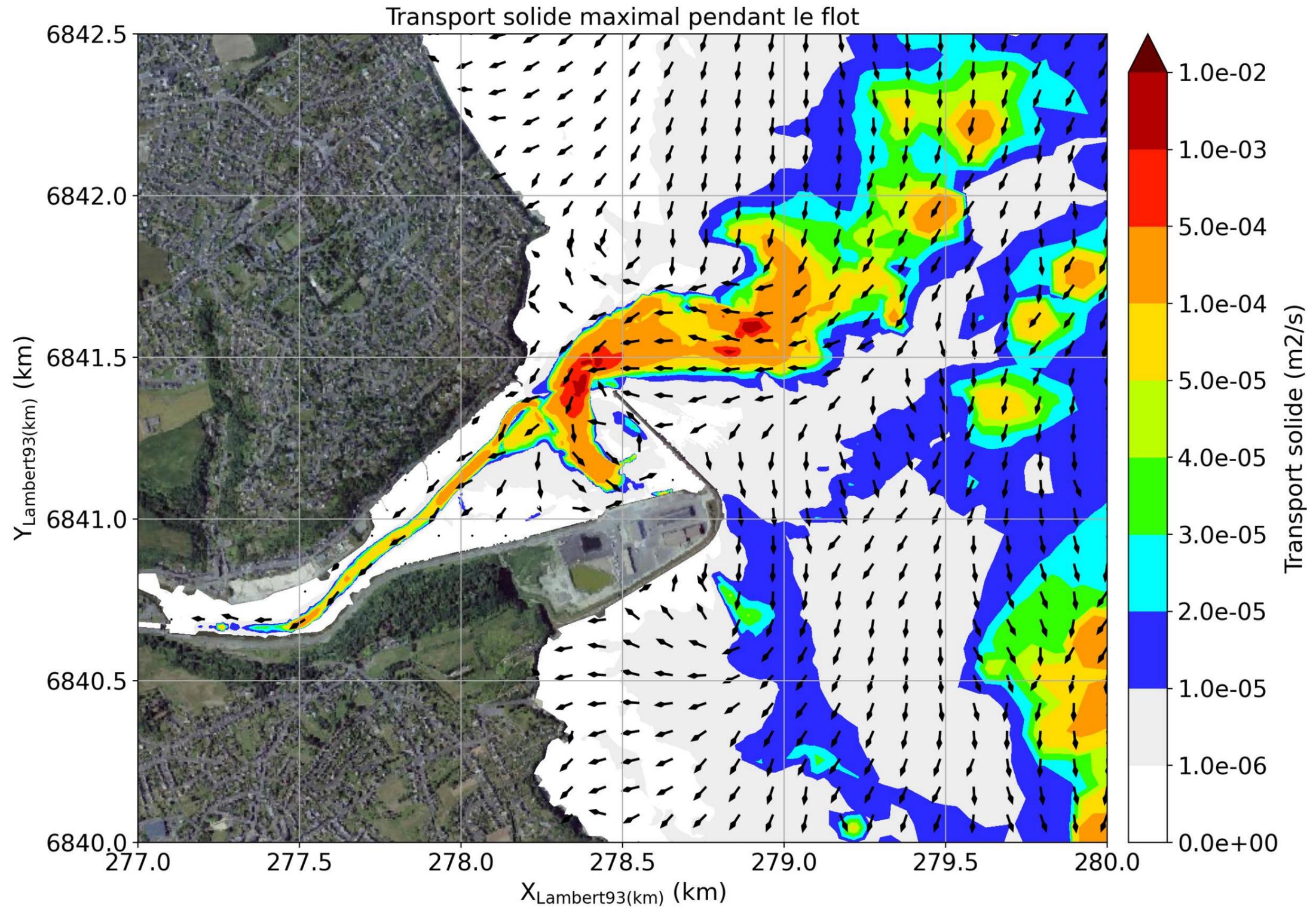


Figure 8-86: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 5.

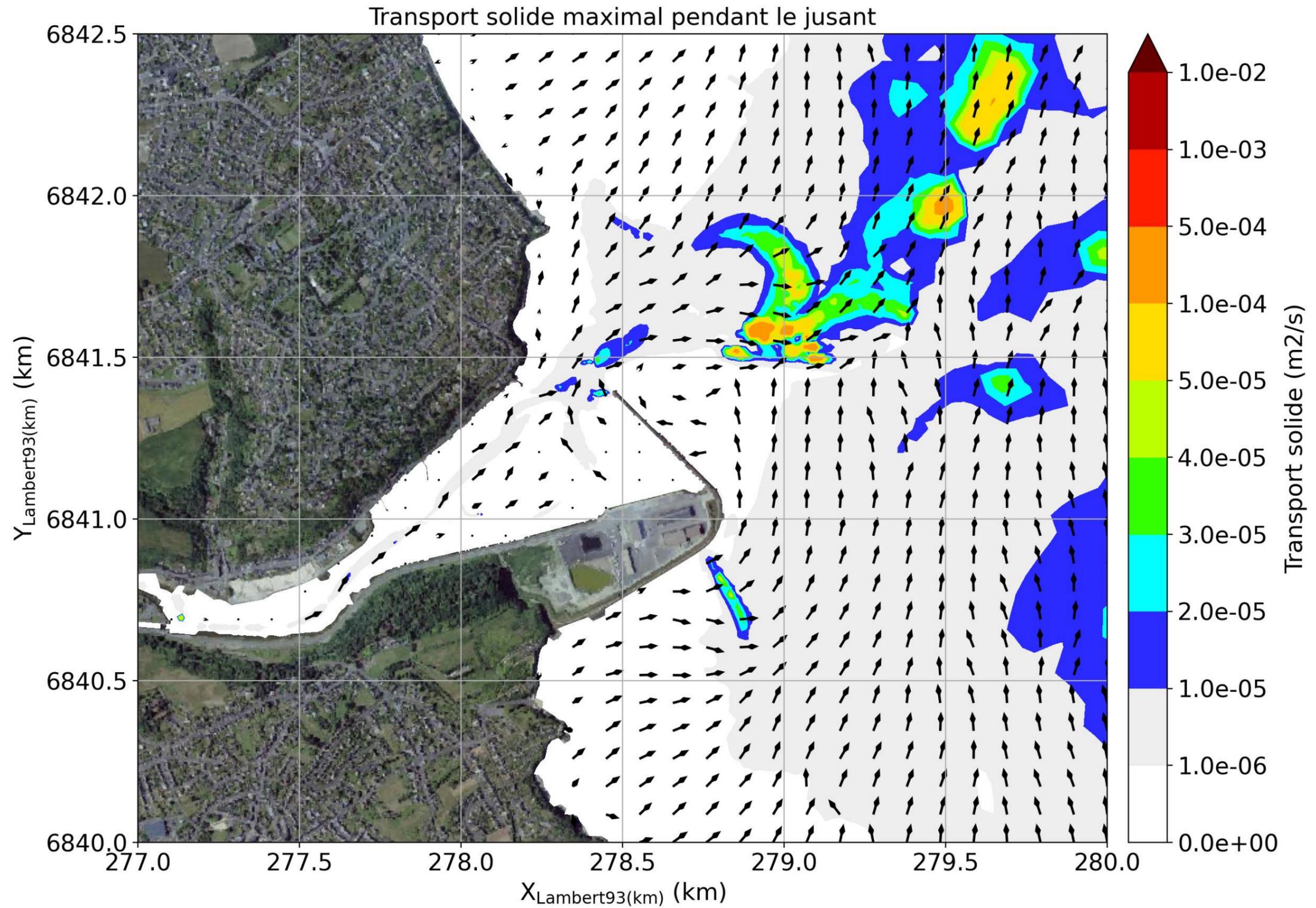


Figure 8-87: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 5.

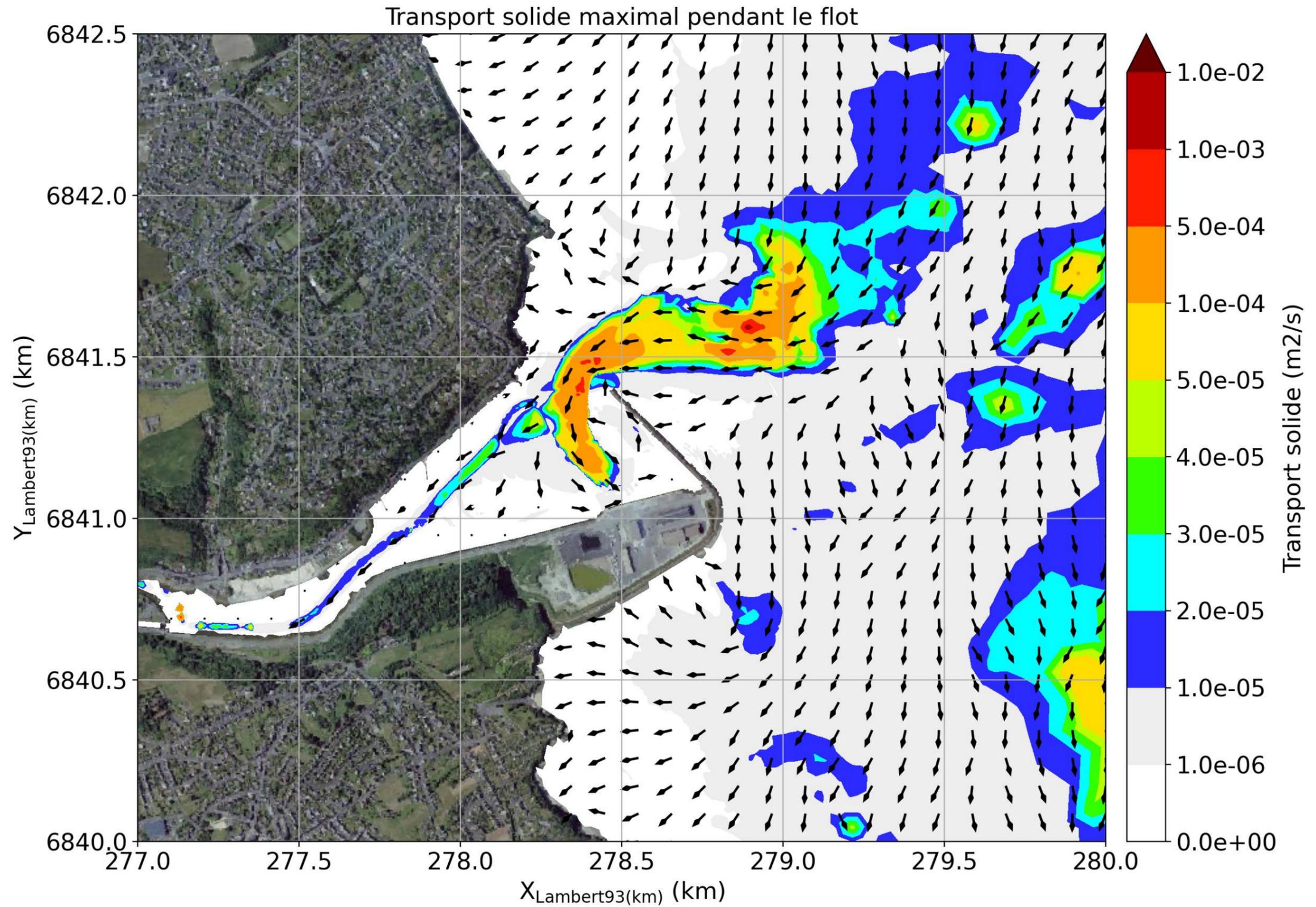


Figure 8-88: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 6.

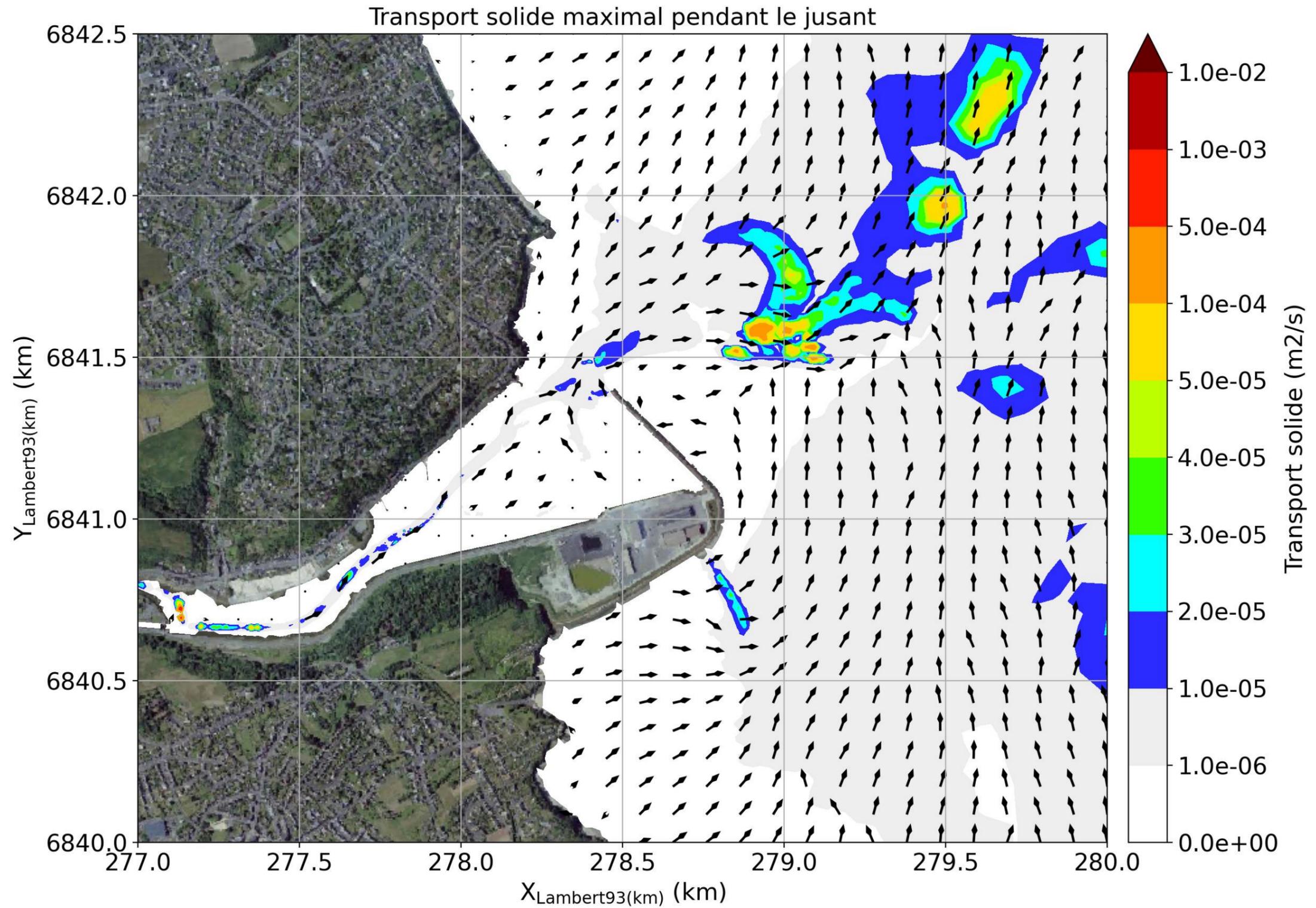


Figure 8-89: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 6.

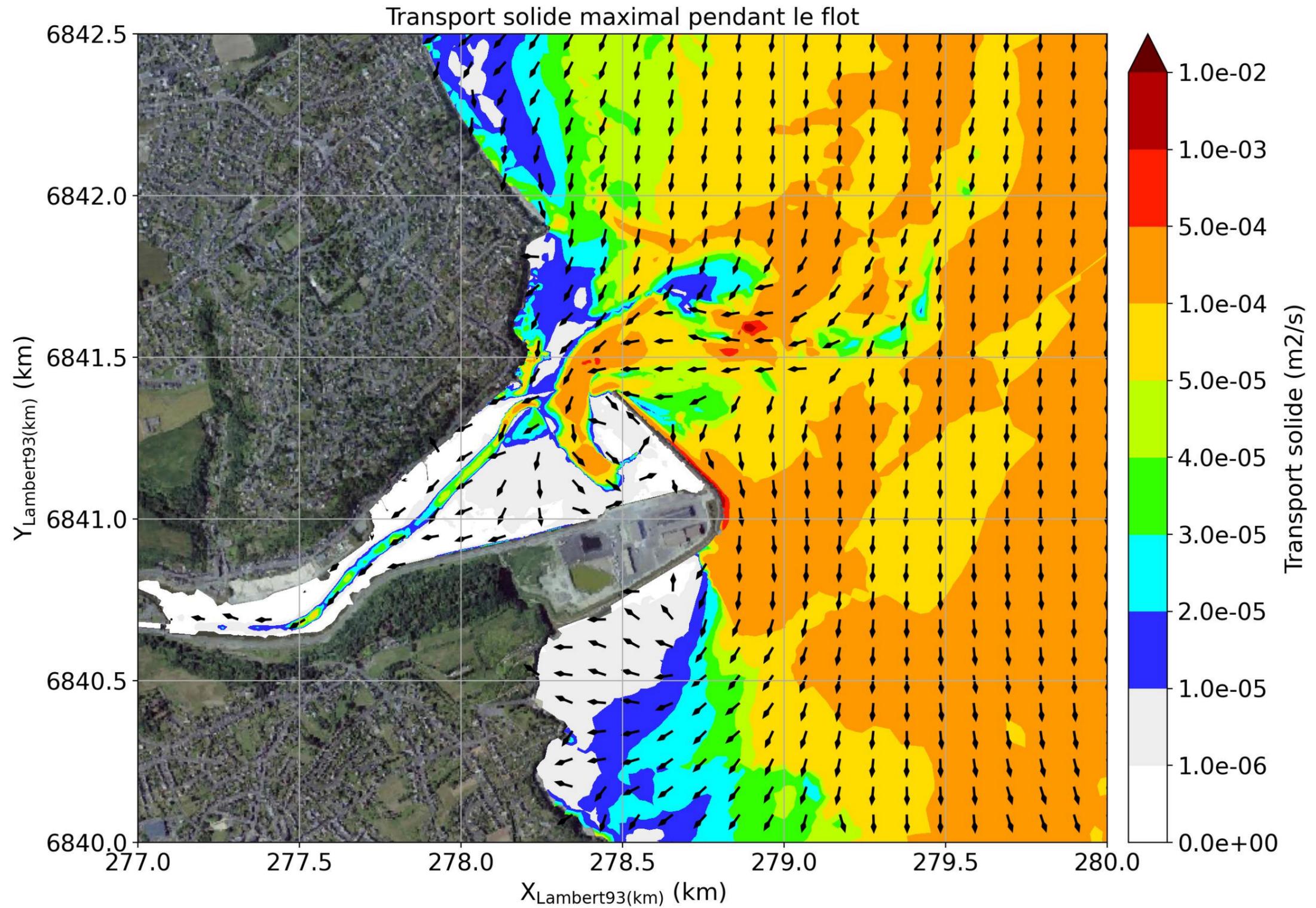


Figure 8-90: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 7.

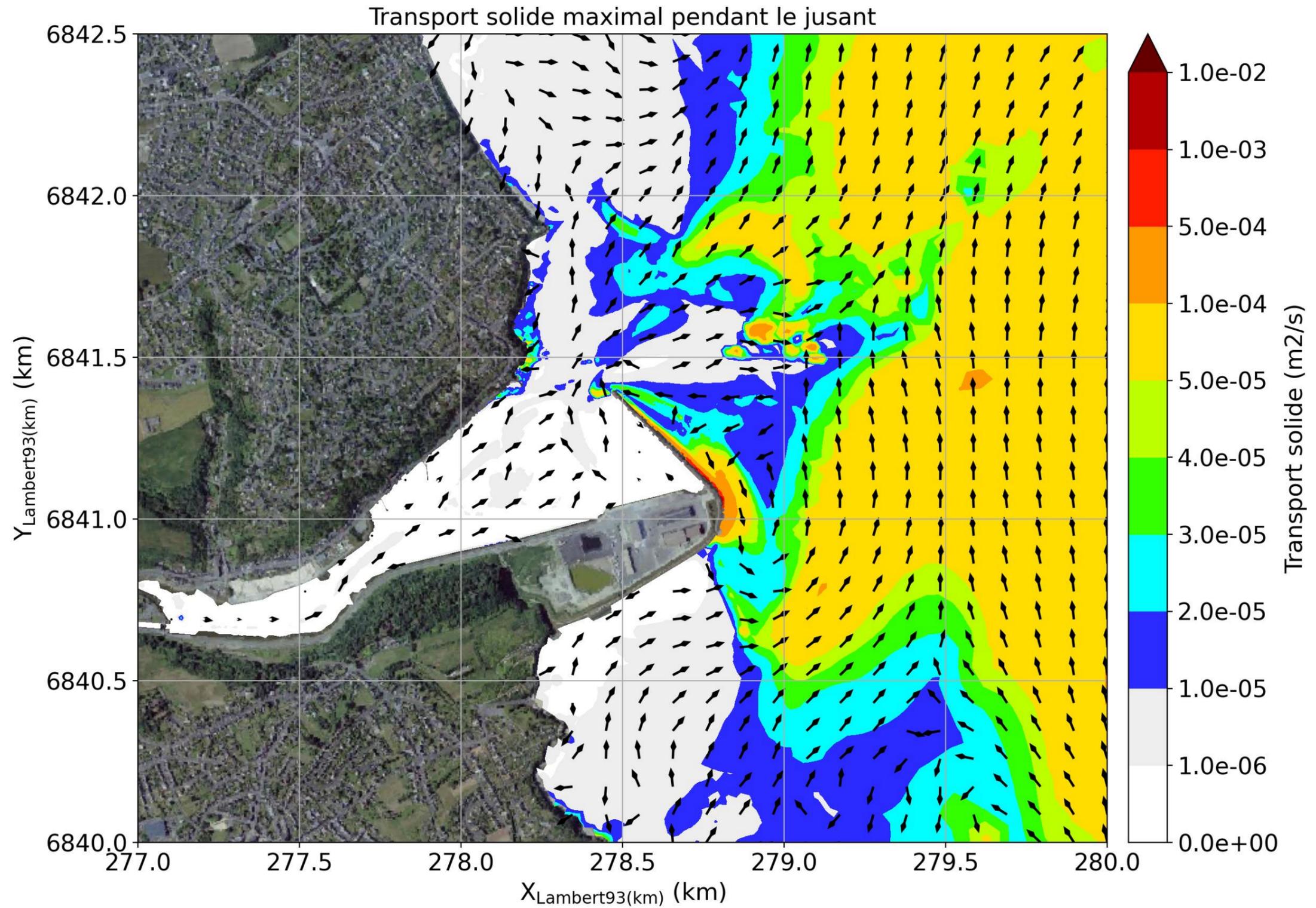


Figure 8-91: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 7.

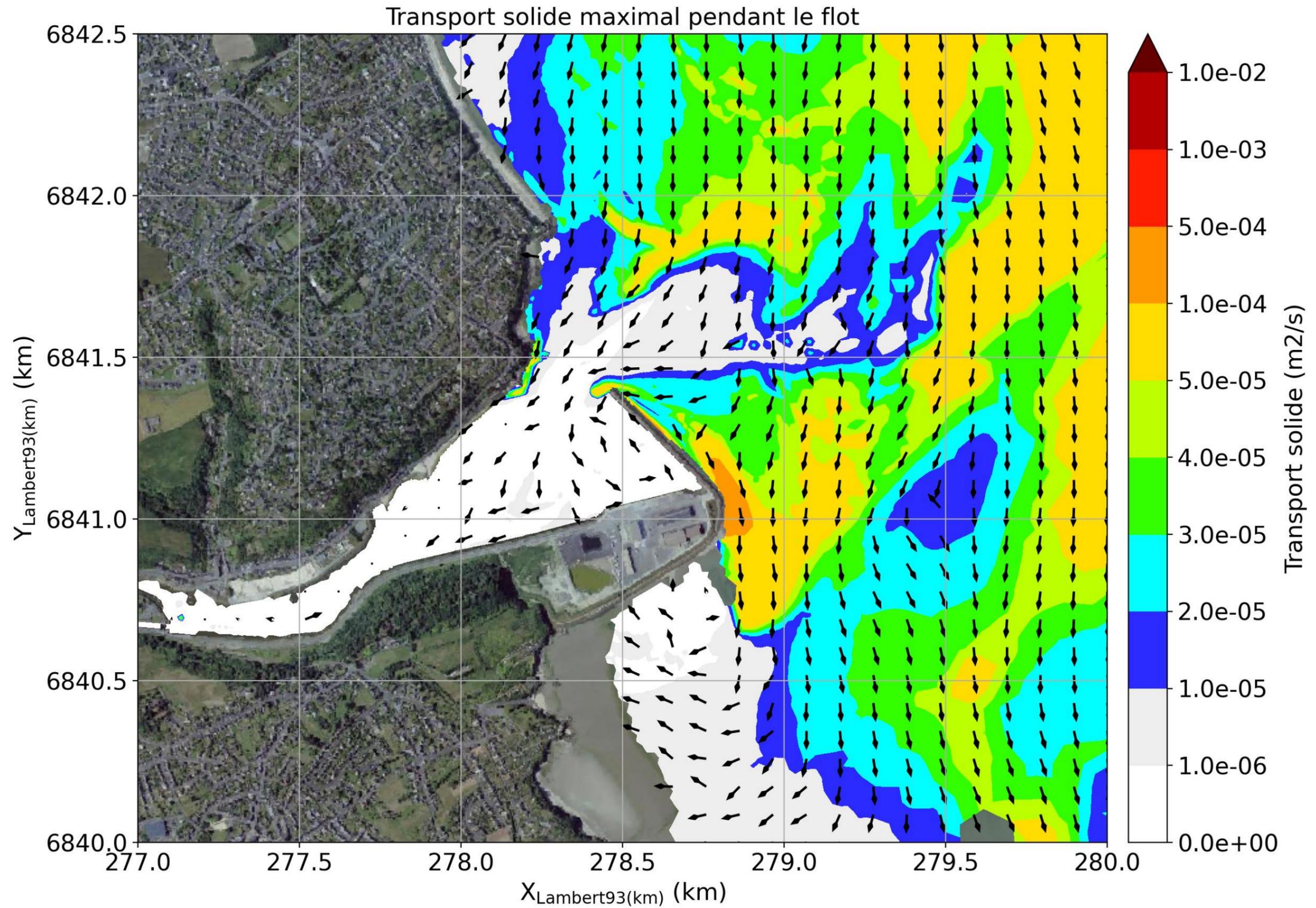


Figure 8-92: Transport solide maximal pendant le flot pour le scénario 8.

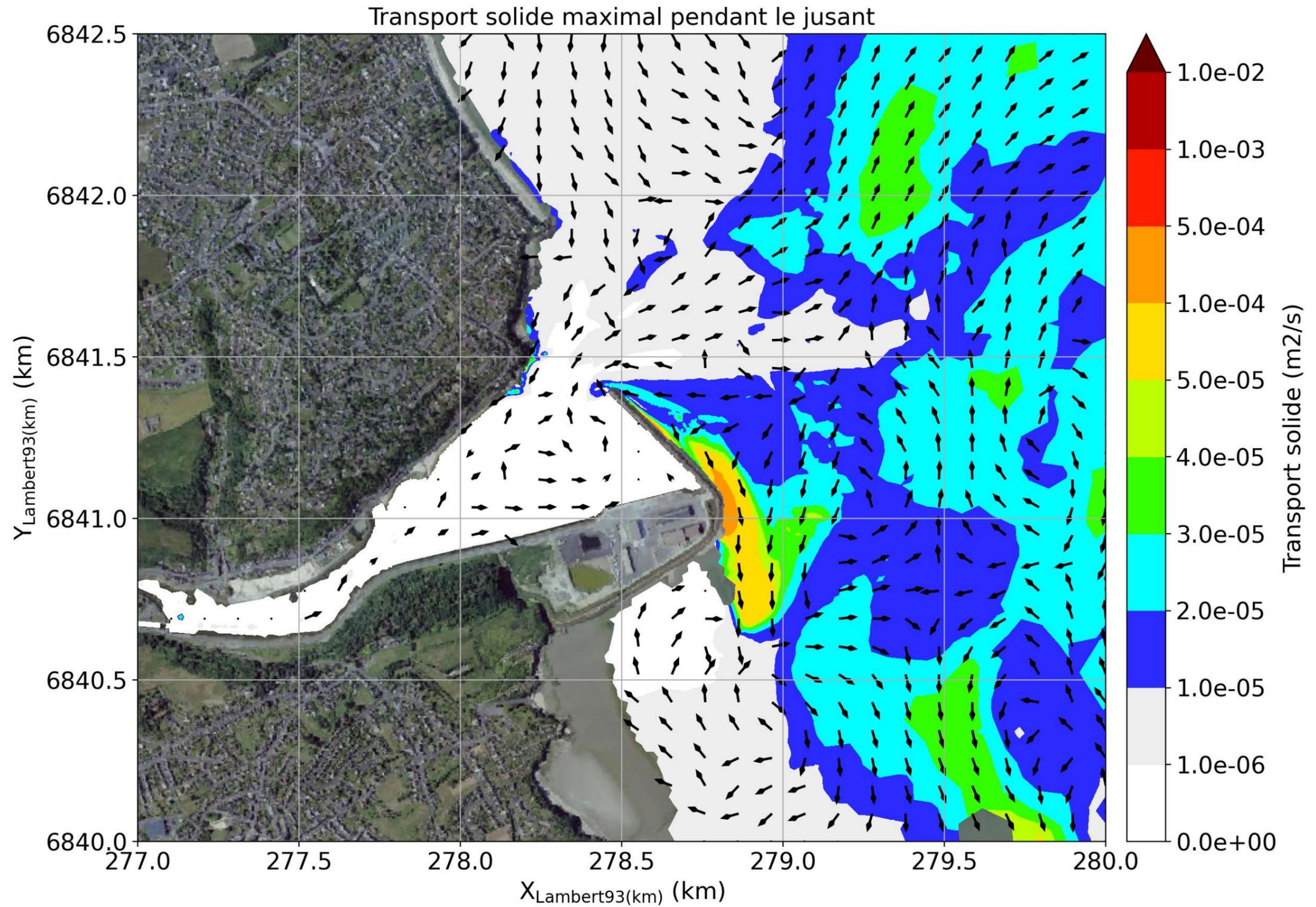


Figure 8-93: Transport solide maximal pendant le jusant pour le scénario 8.

8.7.4 DYNAMIQUE DES VASES

8.7.4.1 Contrainte maximale

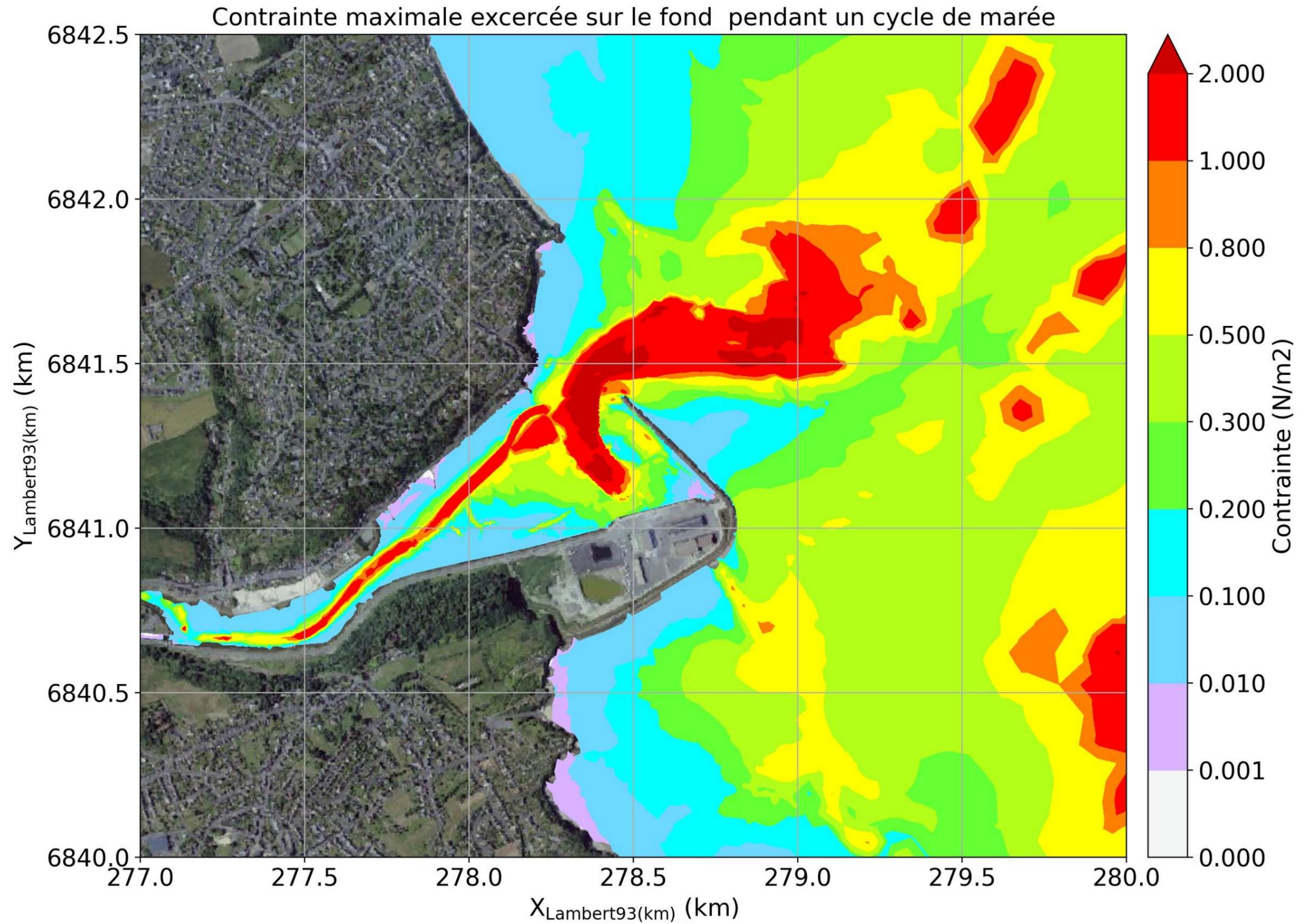


Figure 8-94: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 1.

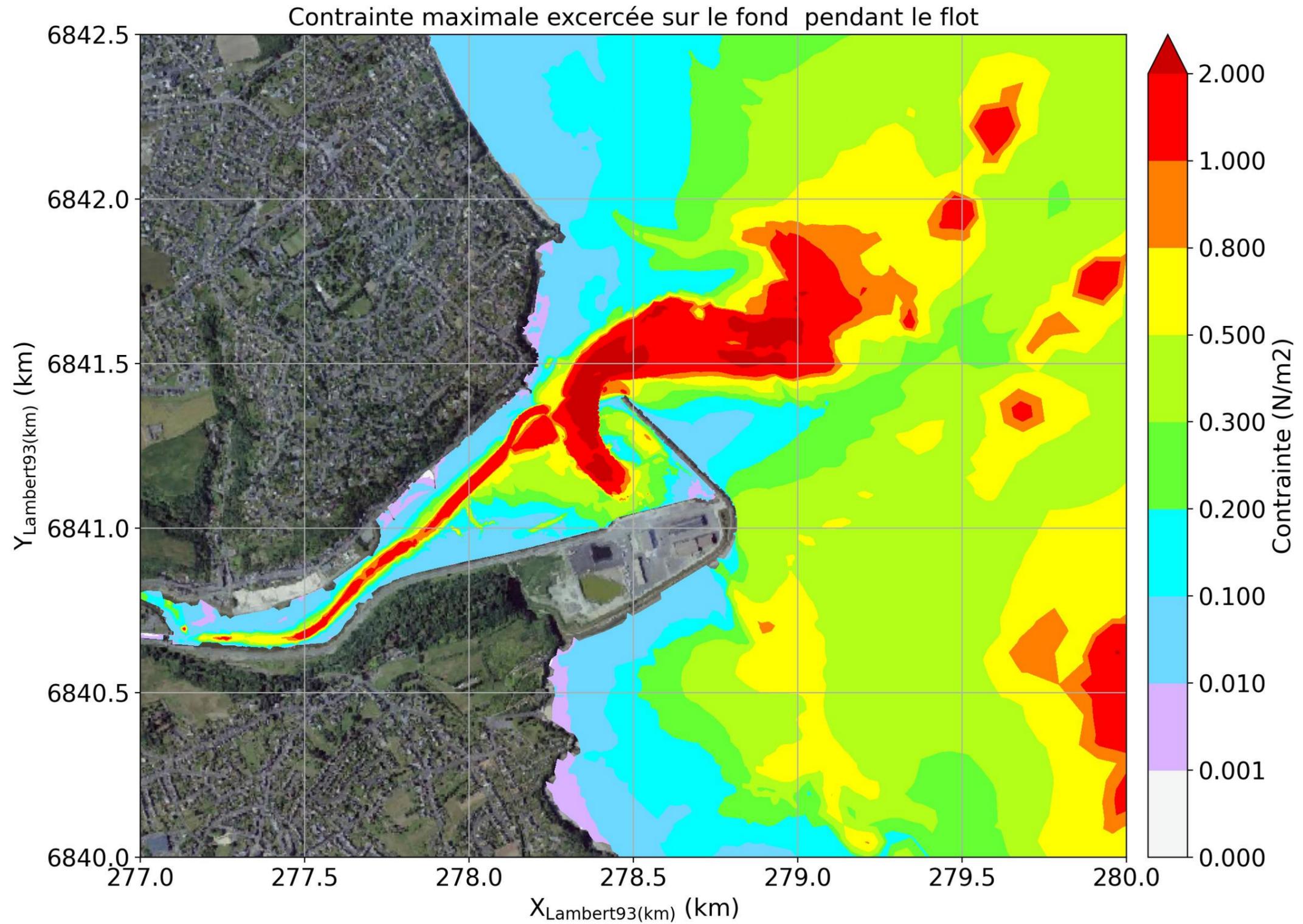


Figure 8-95: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 1.

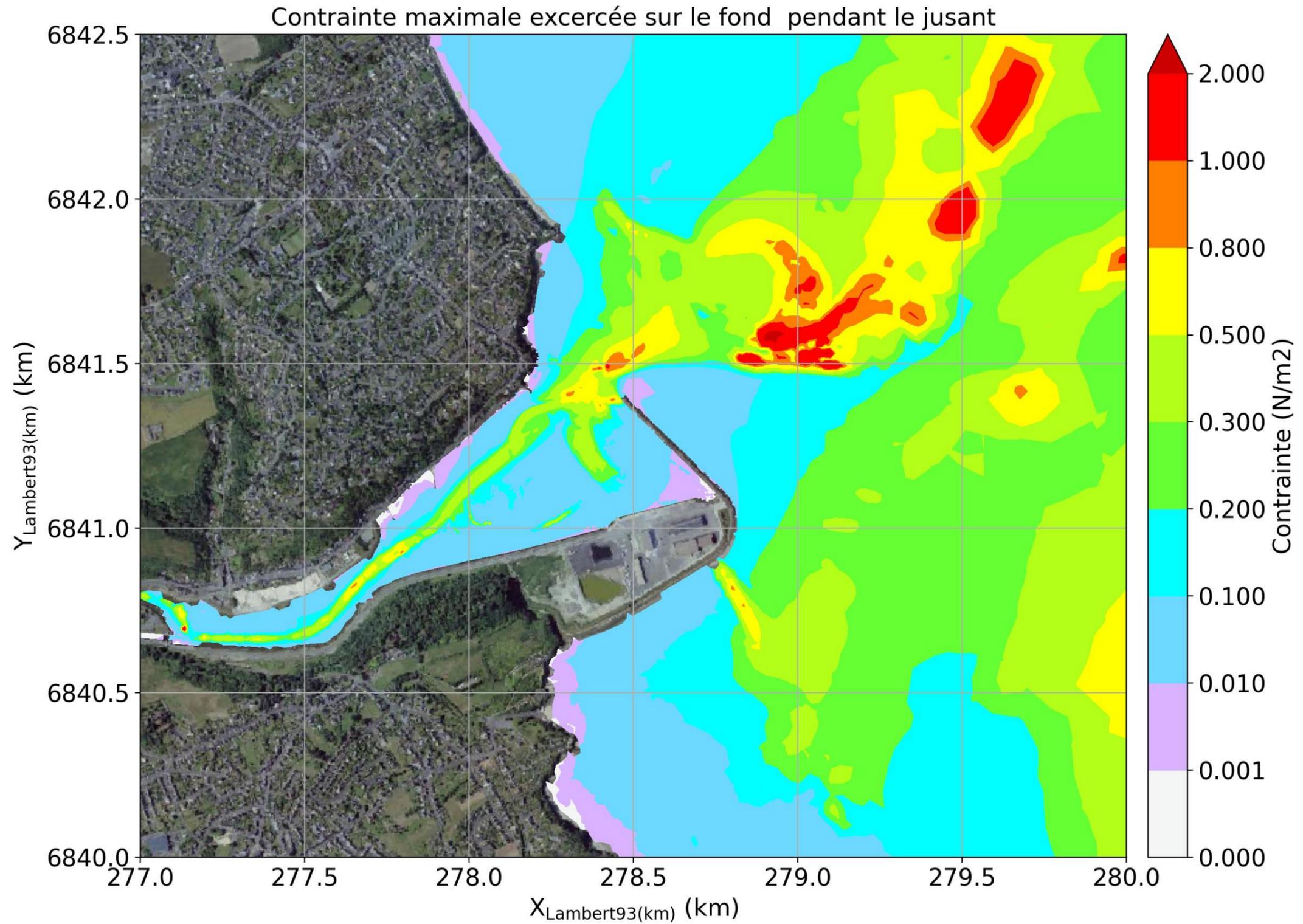


Figure 8-96: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 1.

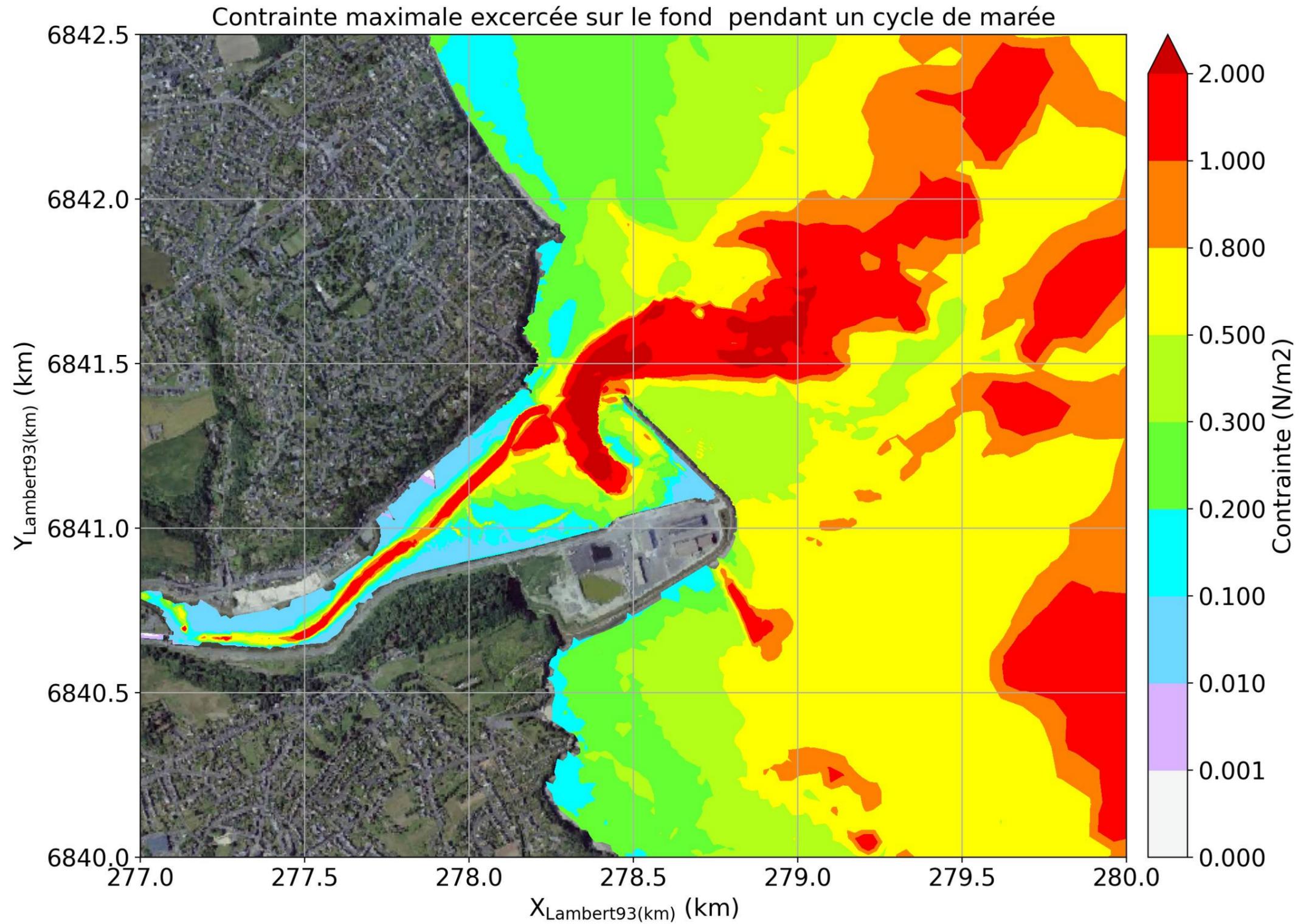


Figure 8-97: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 2.

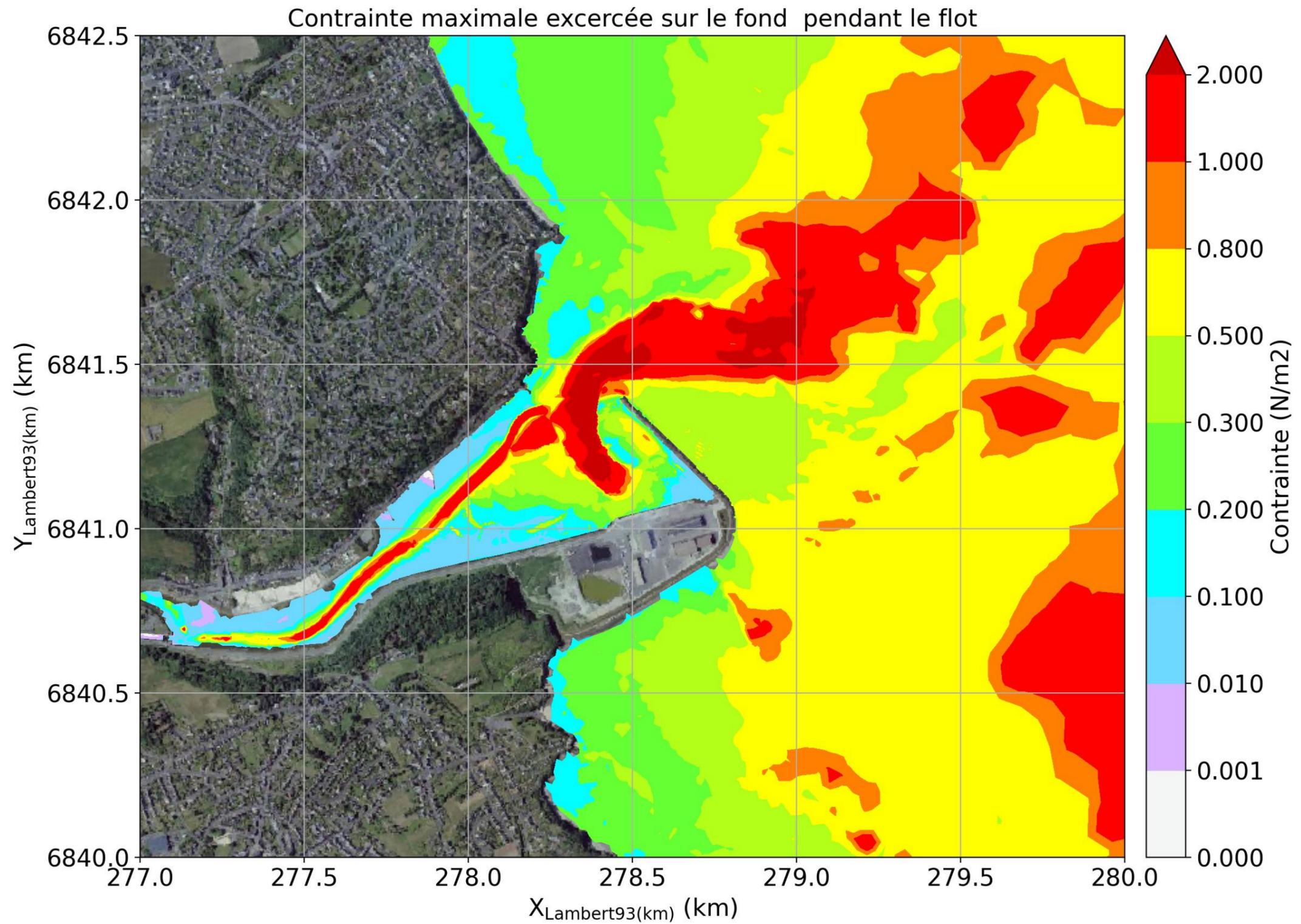


Figure 8-98: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 2.

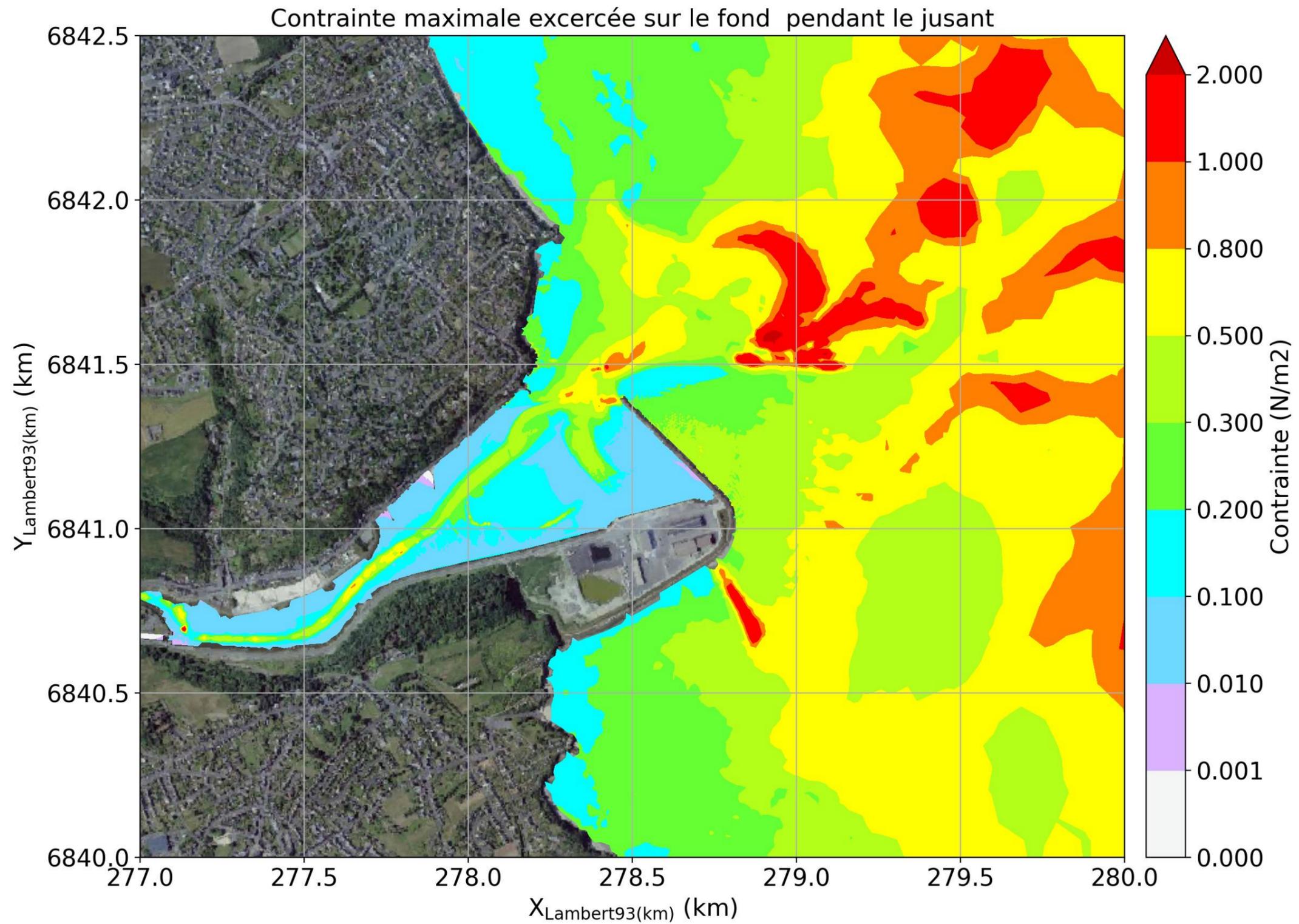


Figure 8-99: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 2.

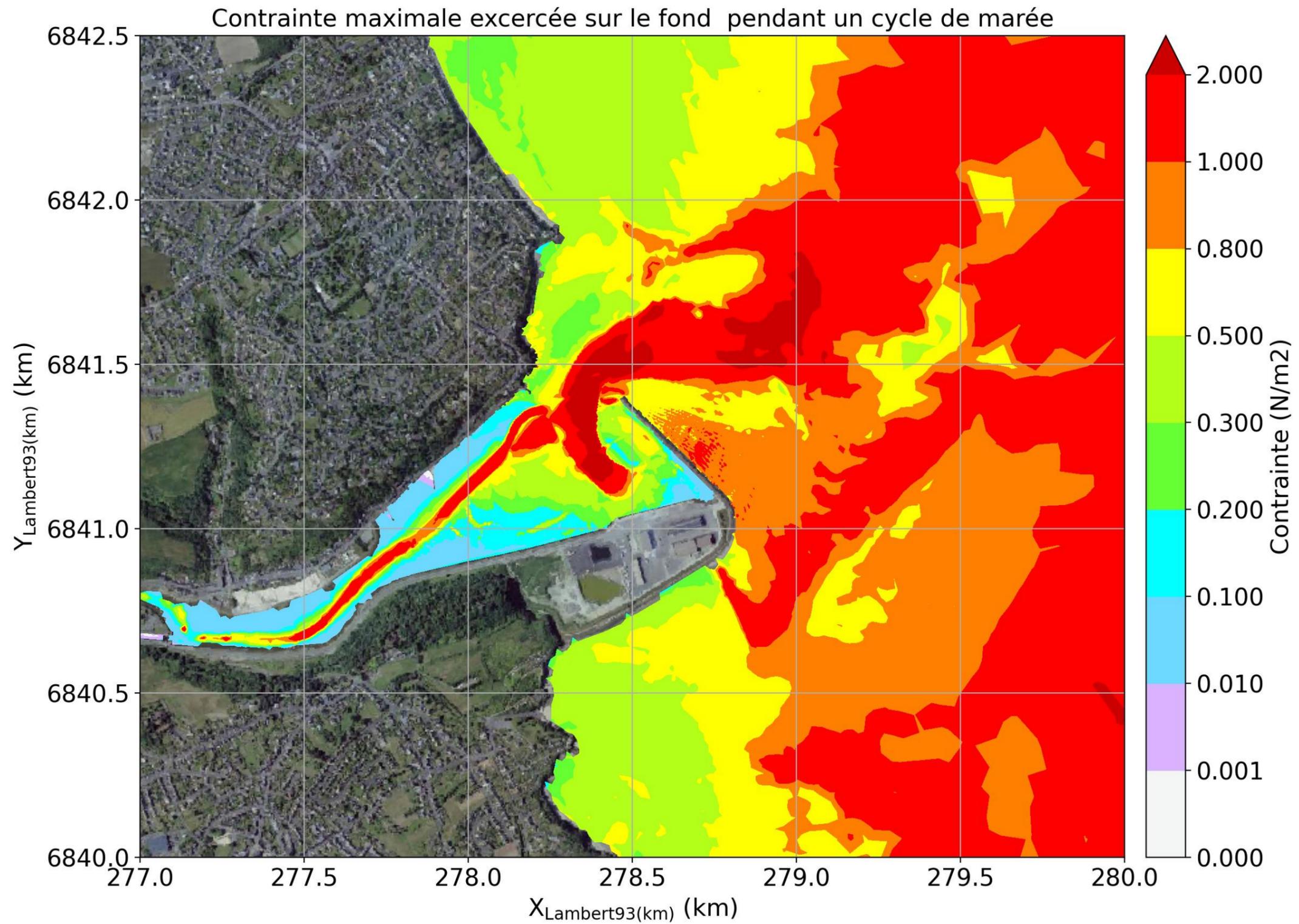


Figure 8-100: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 3.

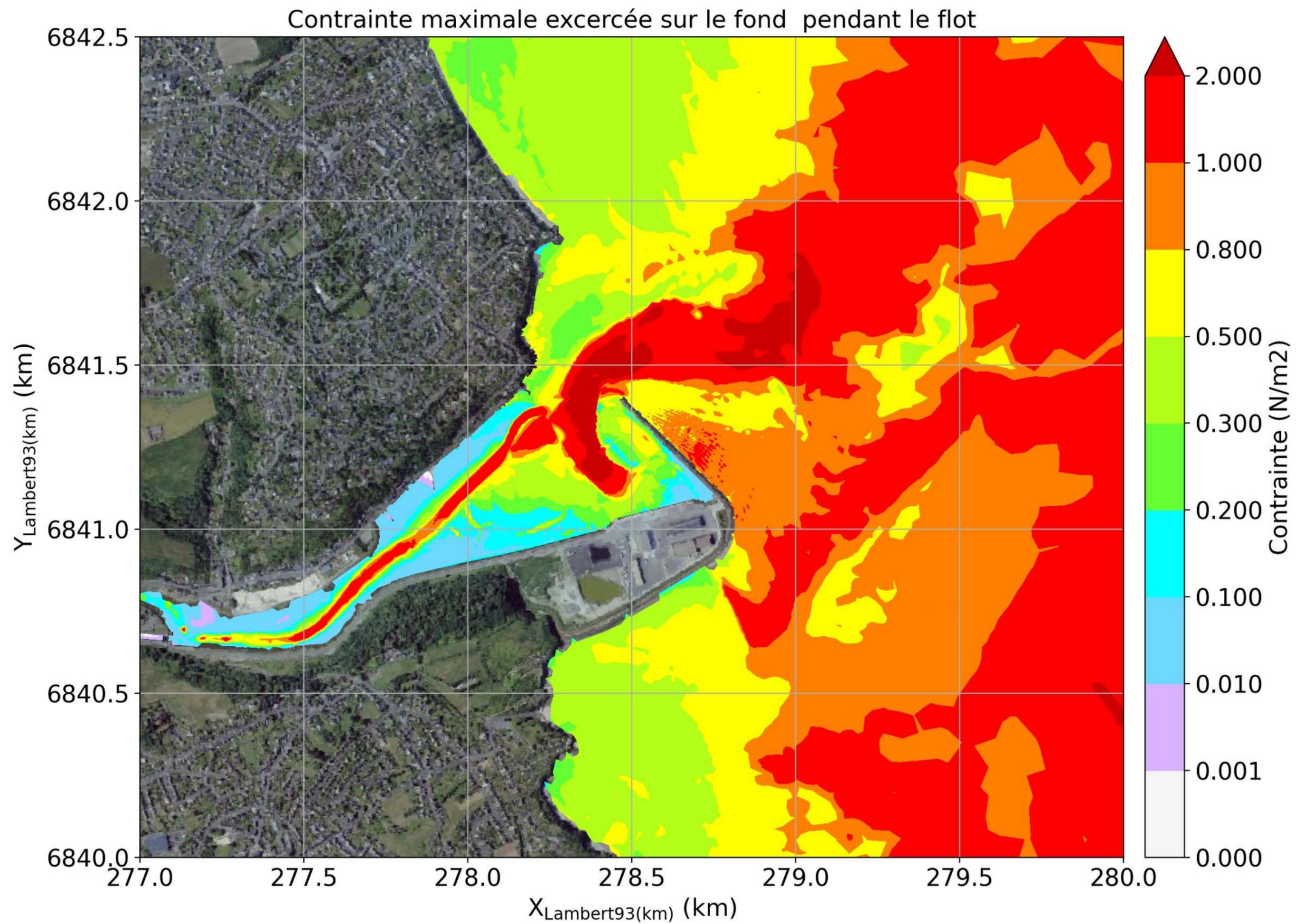


Figure 8-101: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 3.

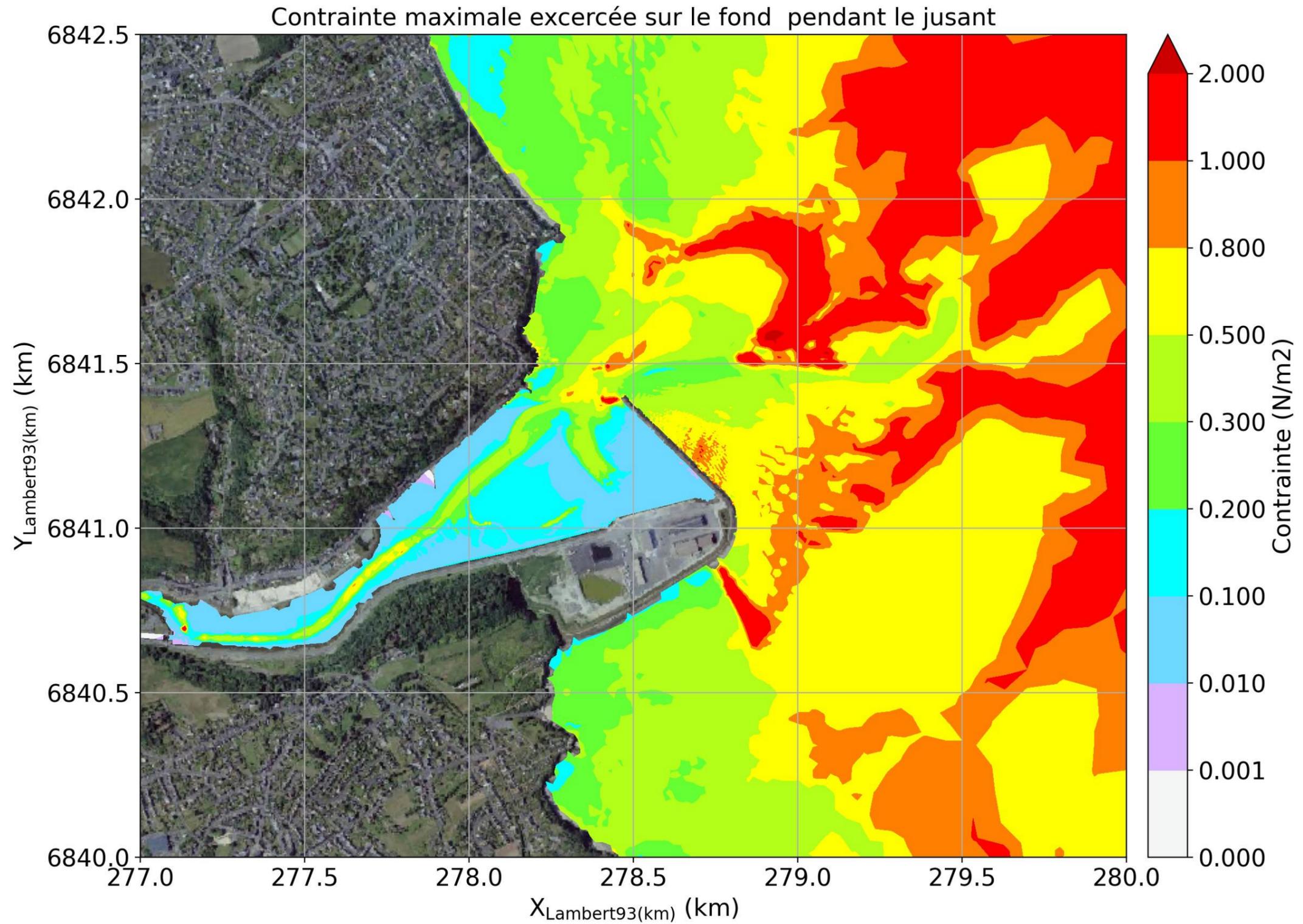


Figure 8-102: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 3.

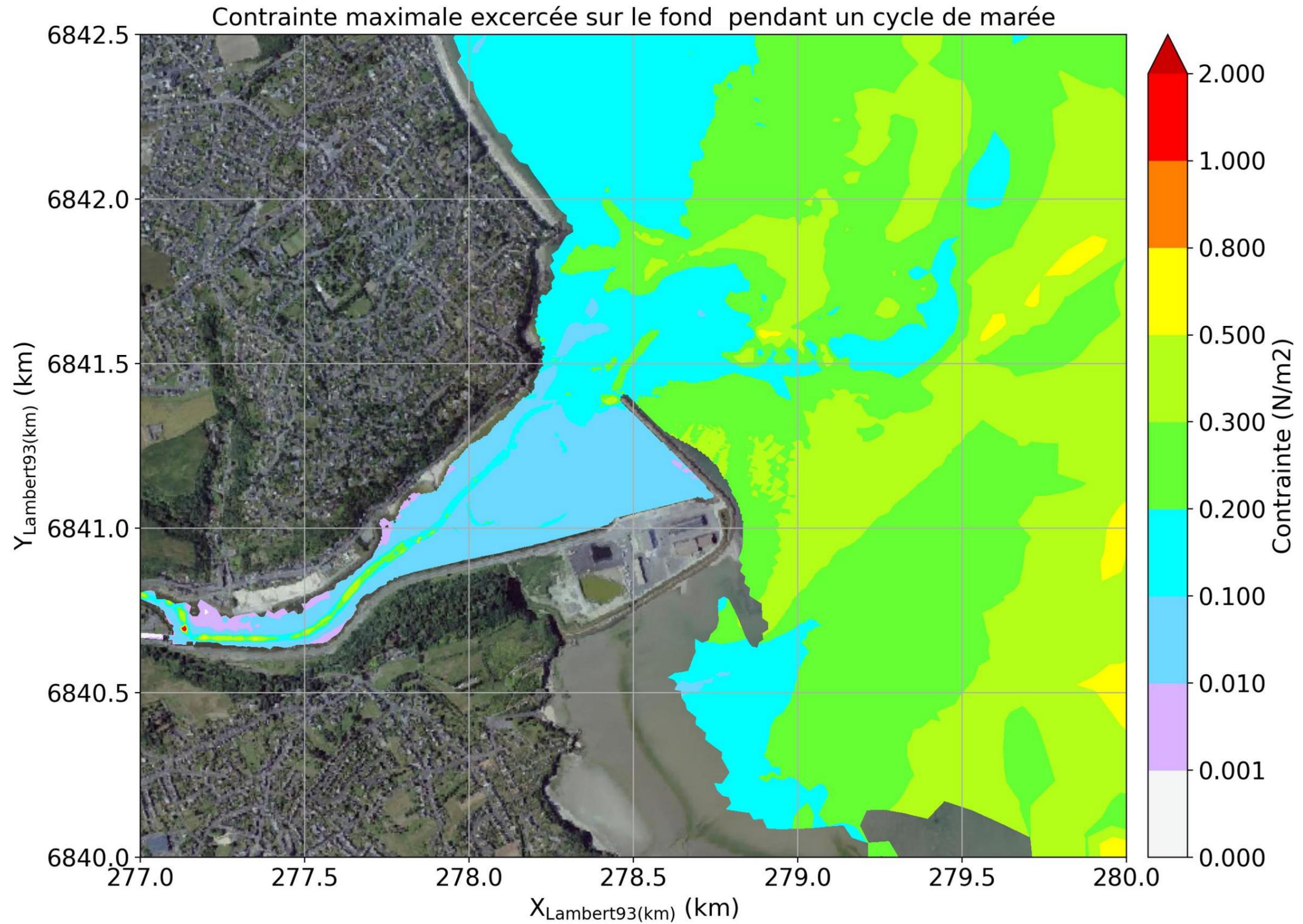


Figure 8-103: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 4.

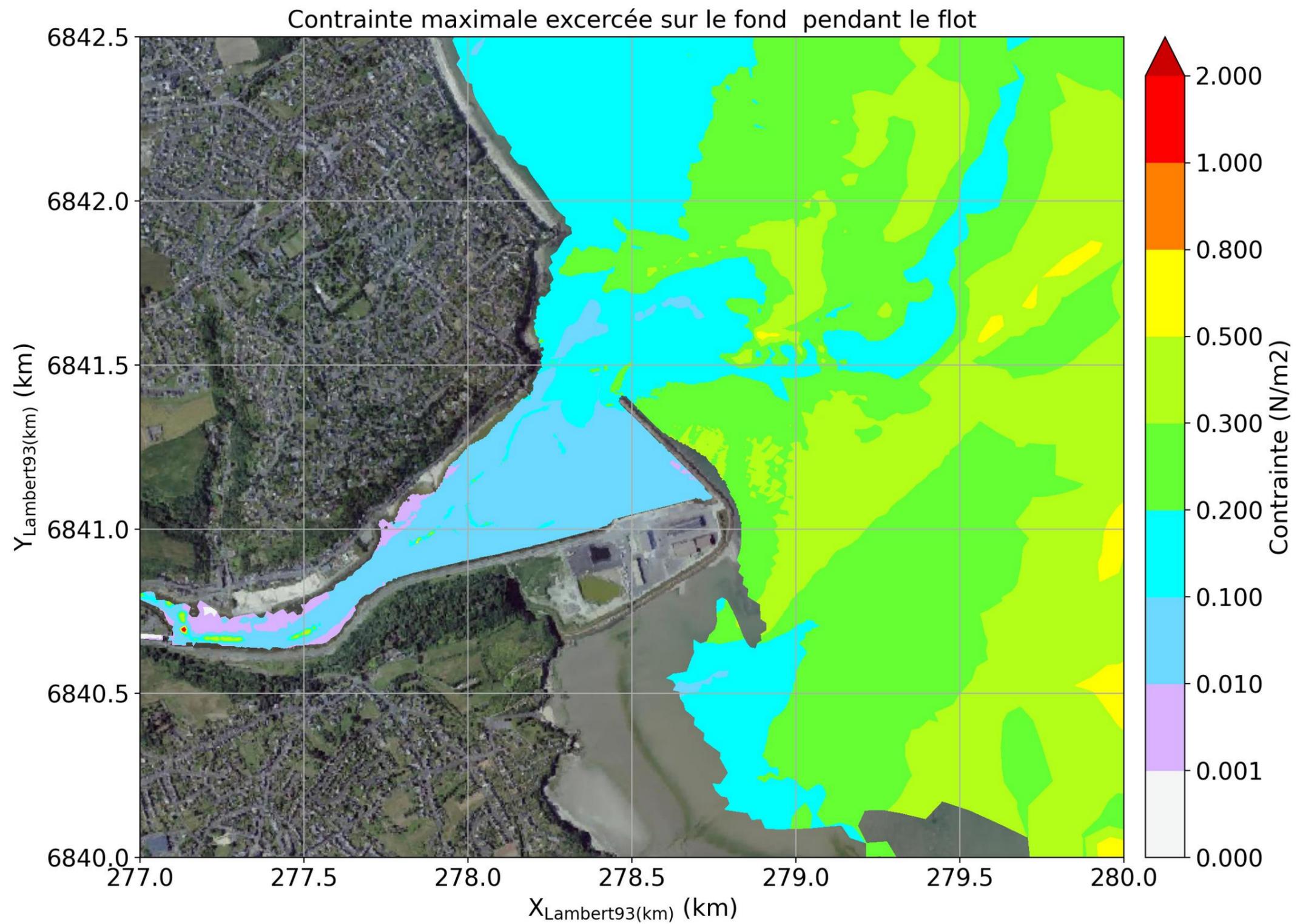


Figure 8-104: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 4.

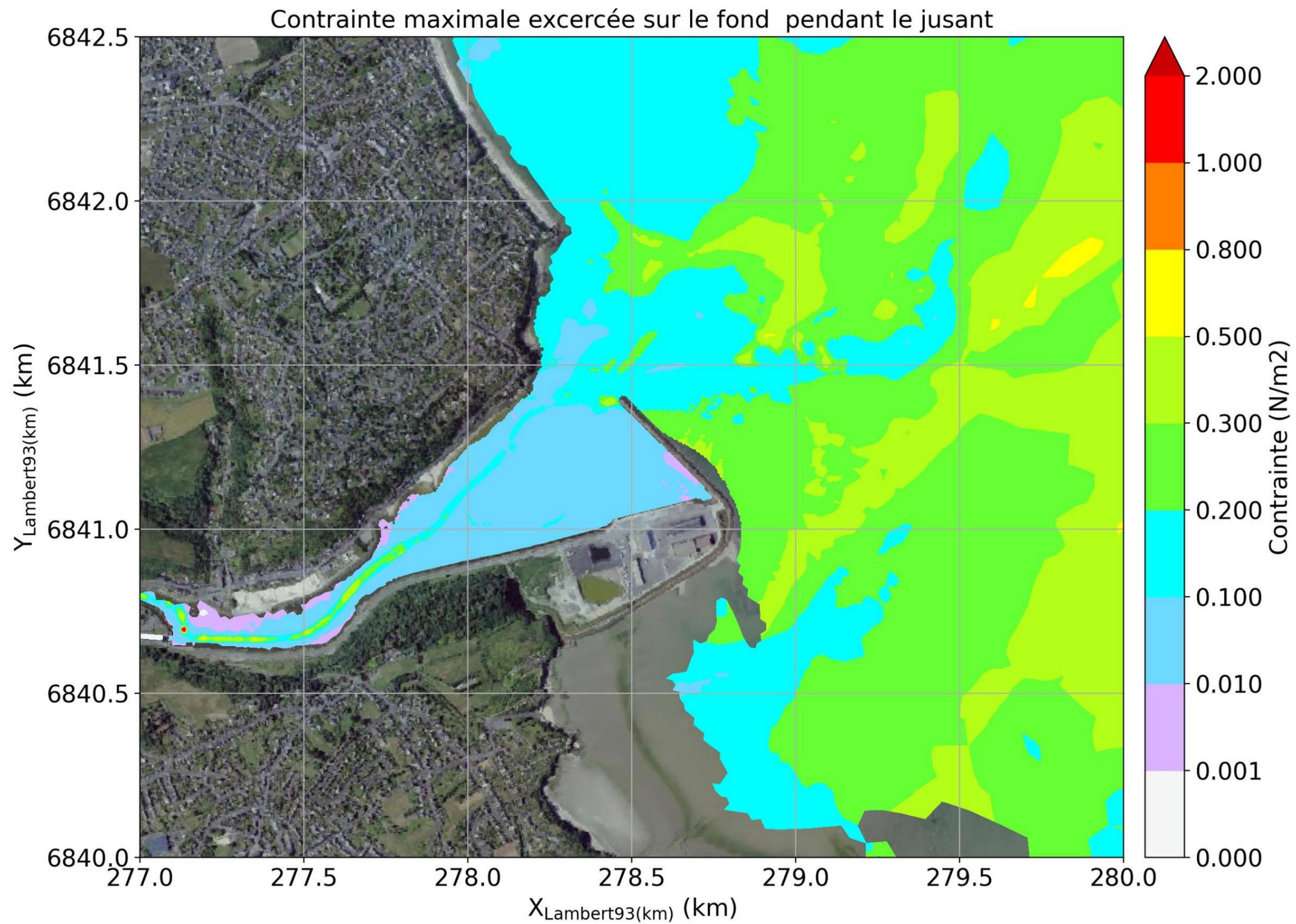


Figure 8-105: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 4.

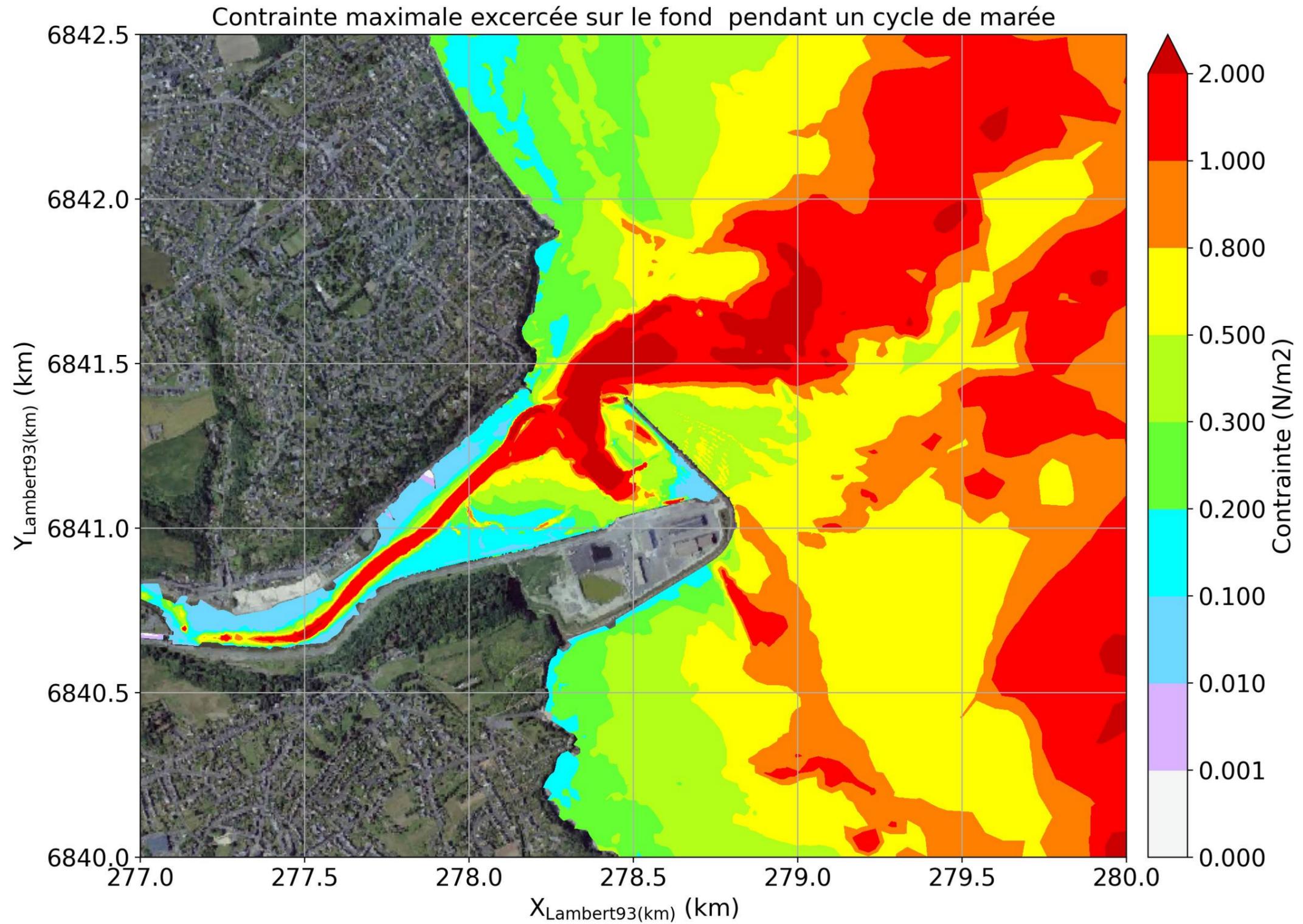


Figure 8-106: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 5.

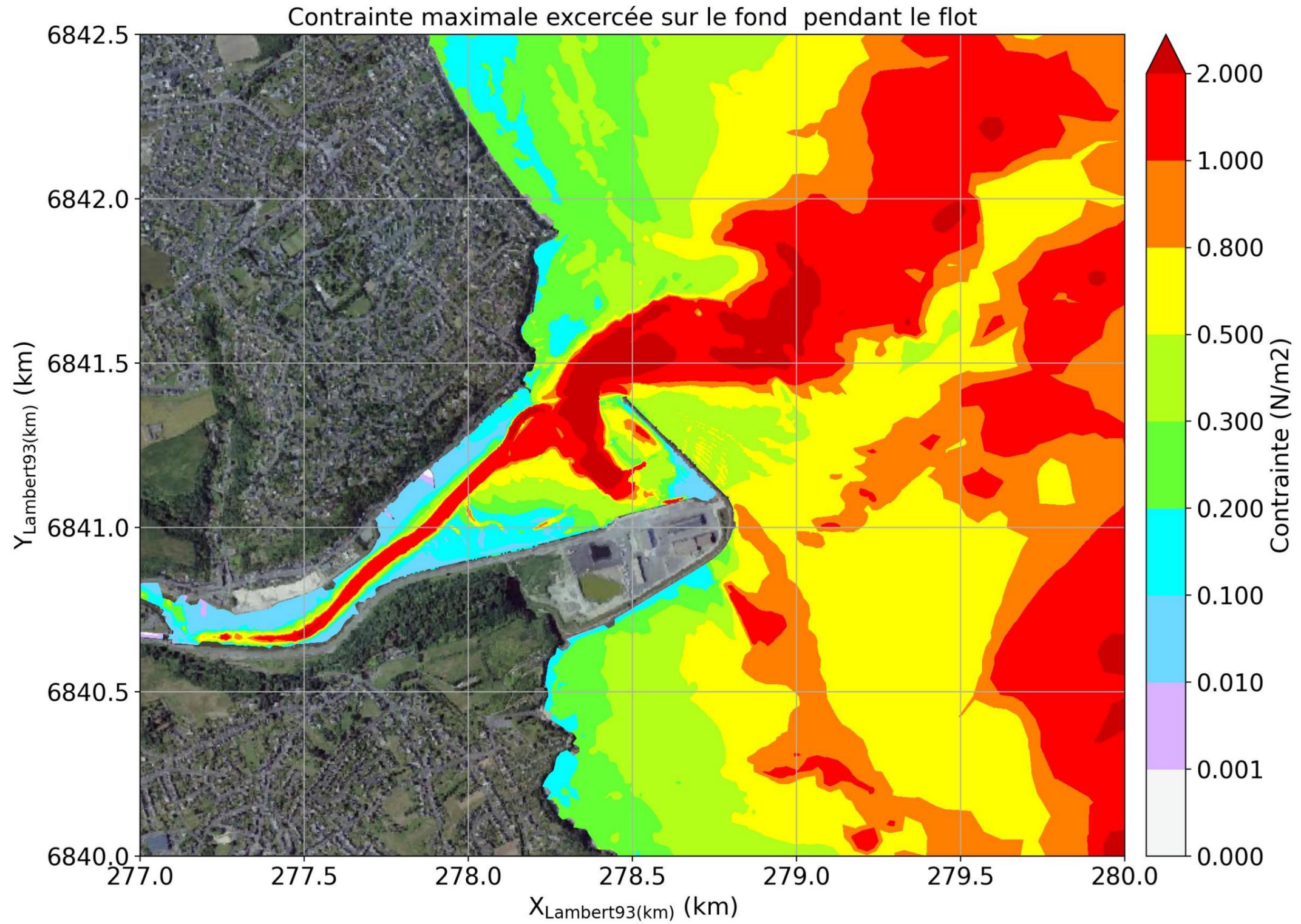


Figure 8-107: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 5.

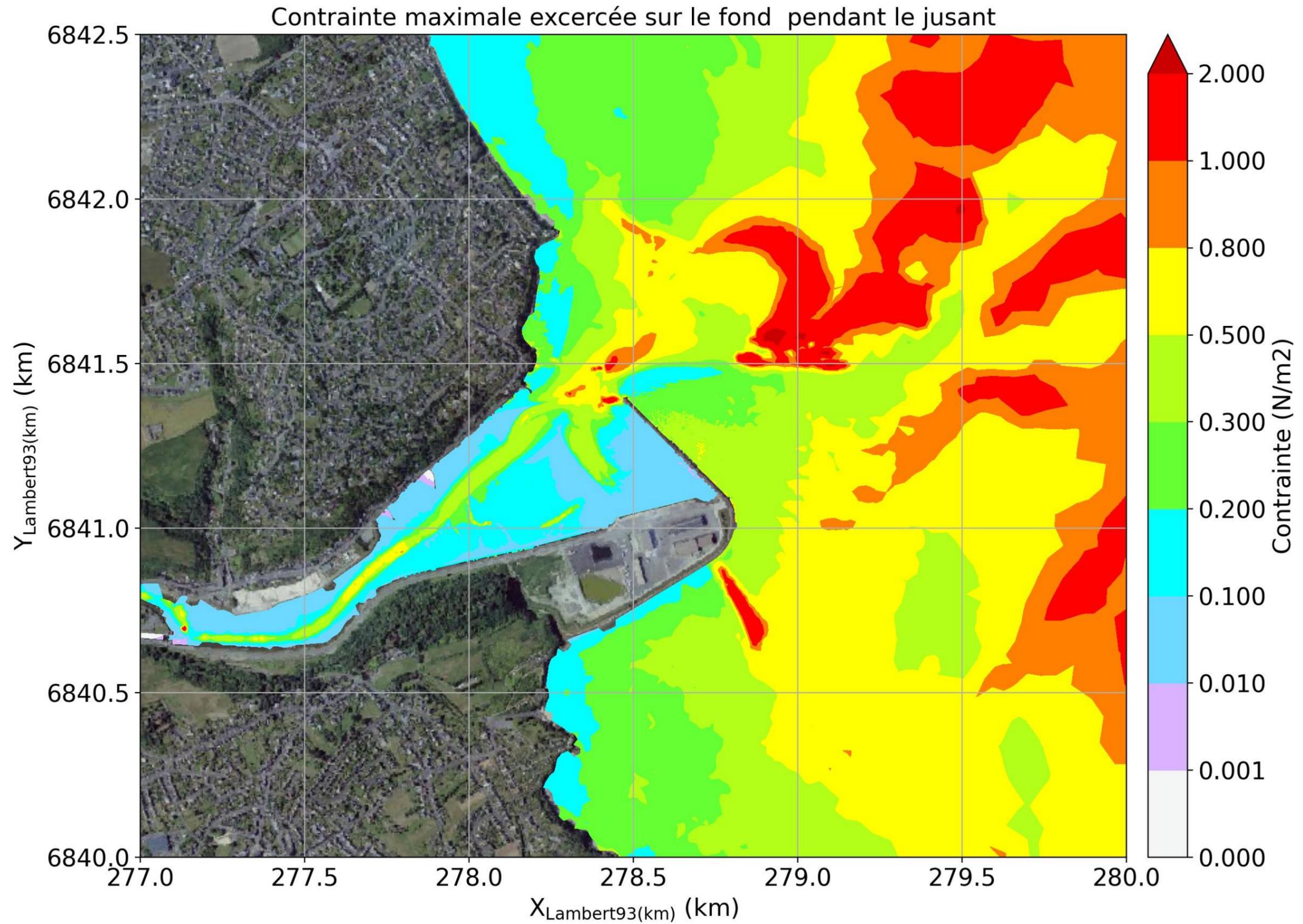


Figure 8-108: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 5.

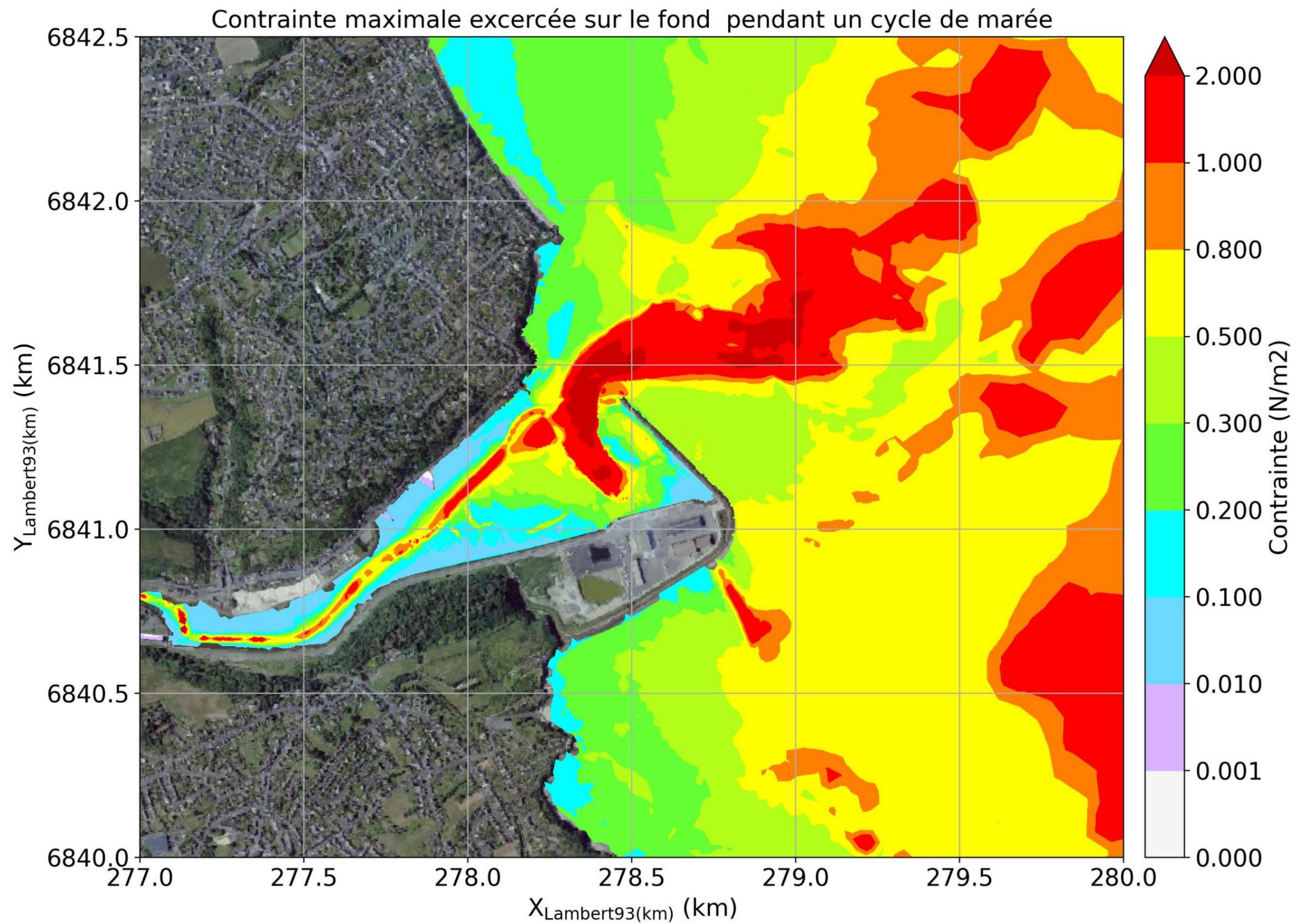


Figure 8-109: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant un cycle de marée pour le scénario 6.

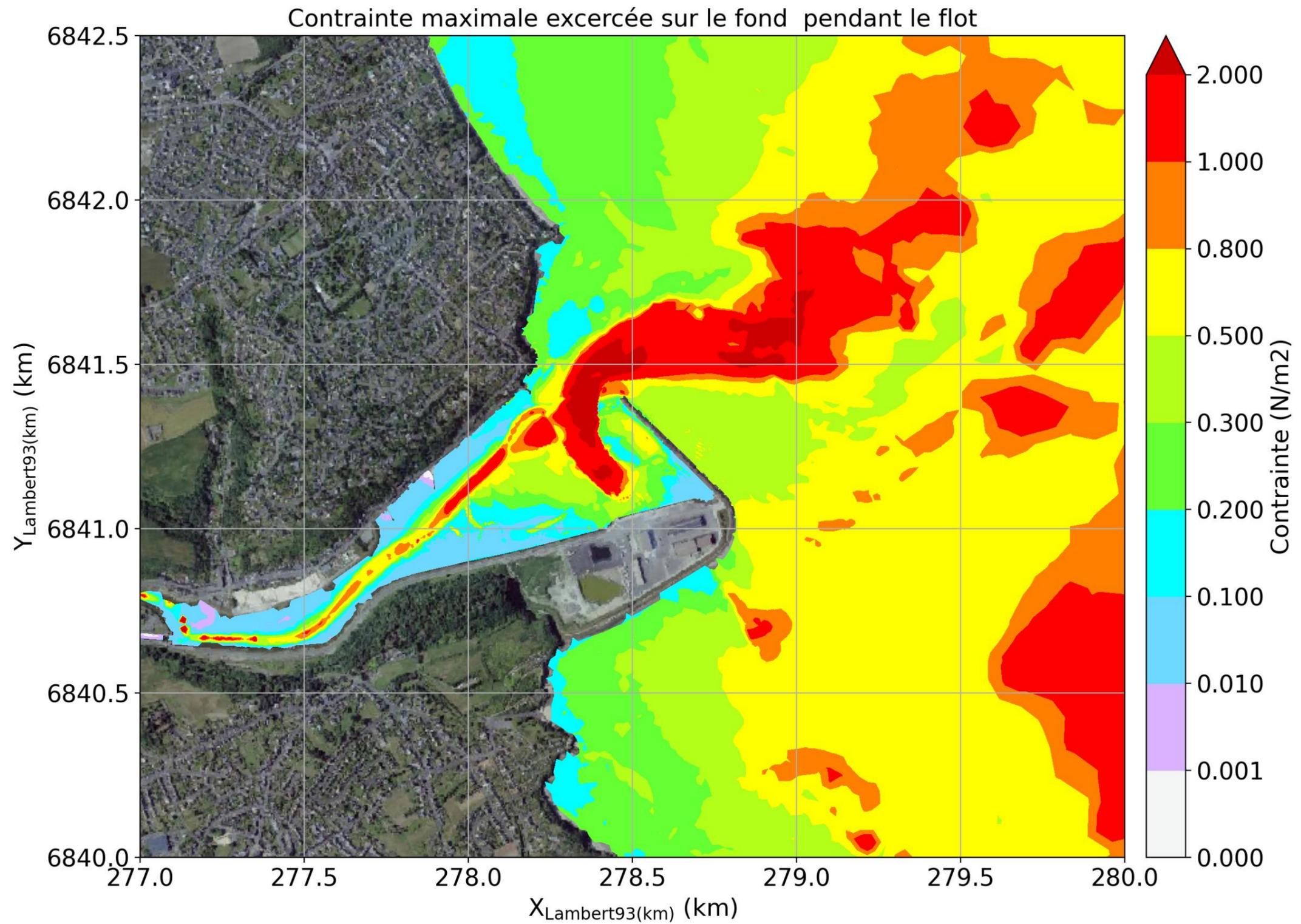


Figure 8-110: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le flot pour le scénario 6.

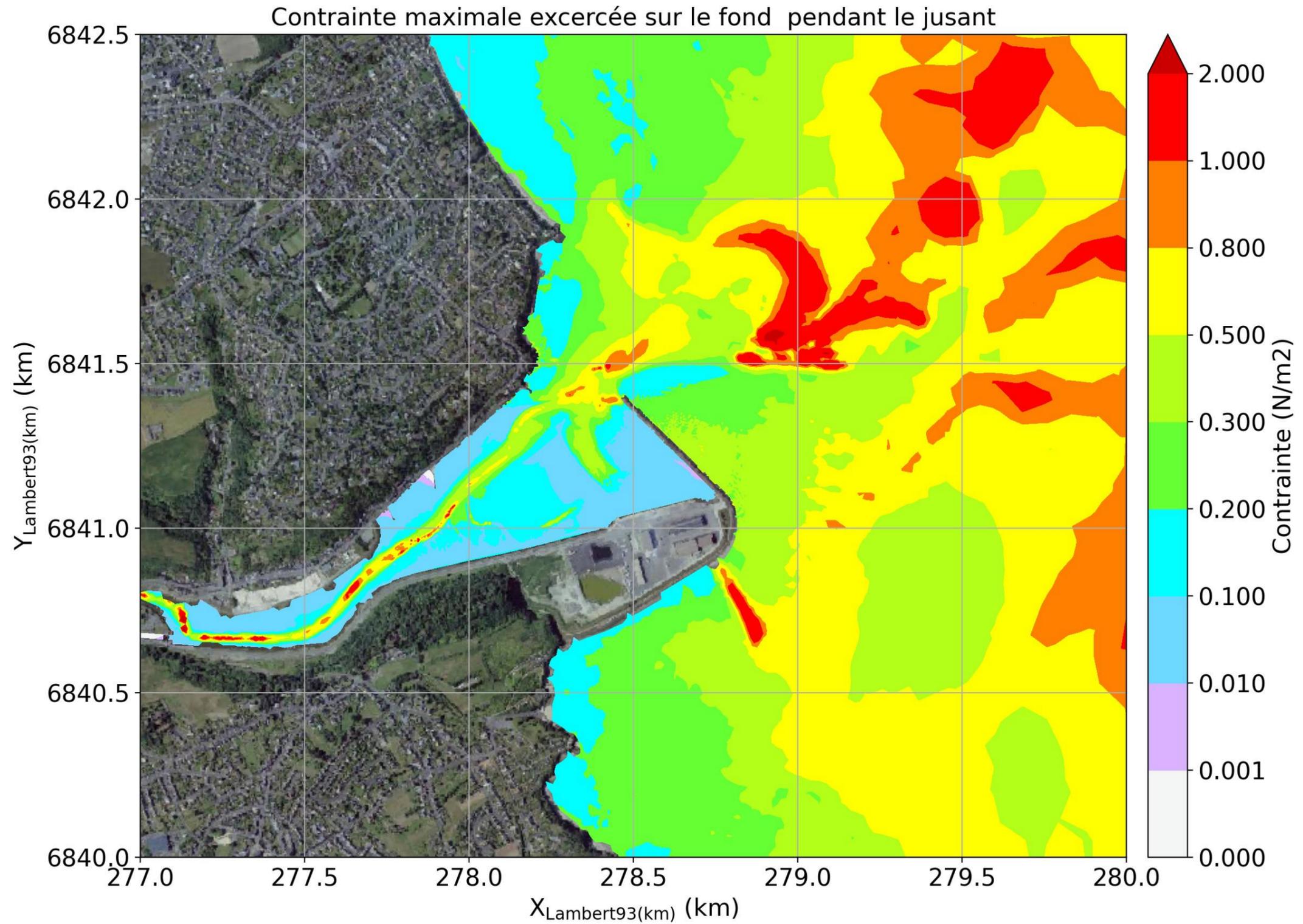


Figure 8-111: Contrainte maximale exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 6.

8.7.4.2 Contrainte moyenne

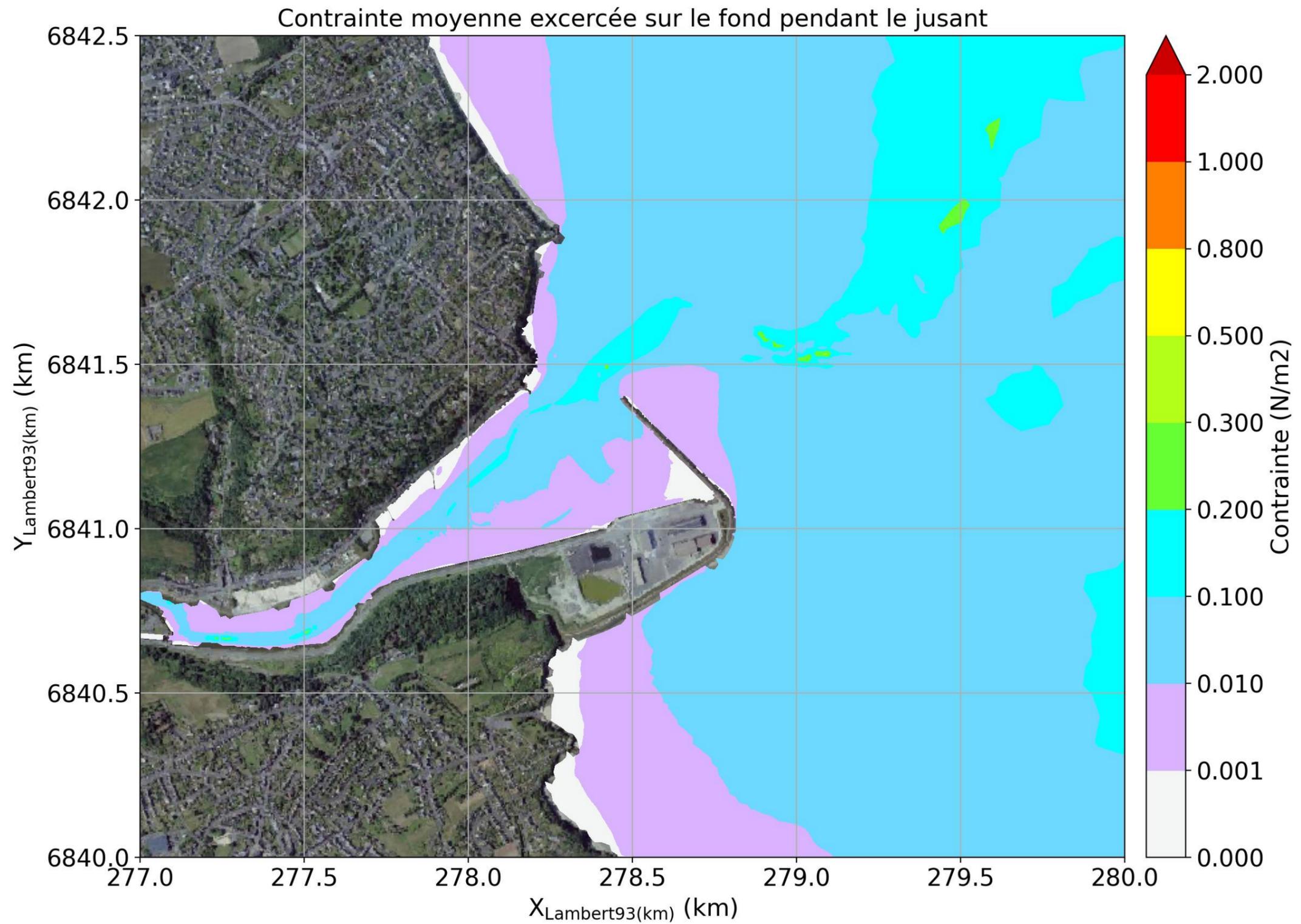


Figure 8-112: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 1.

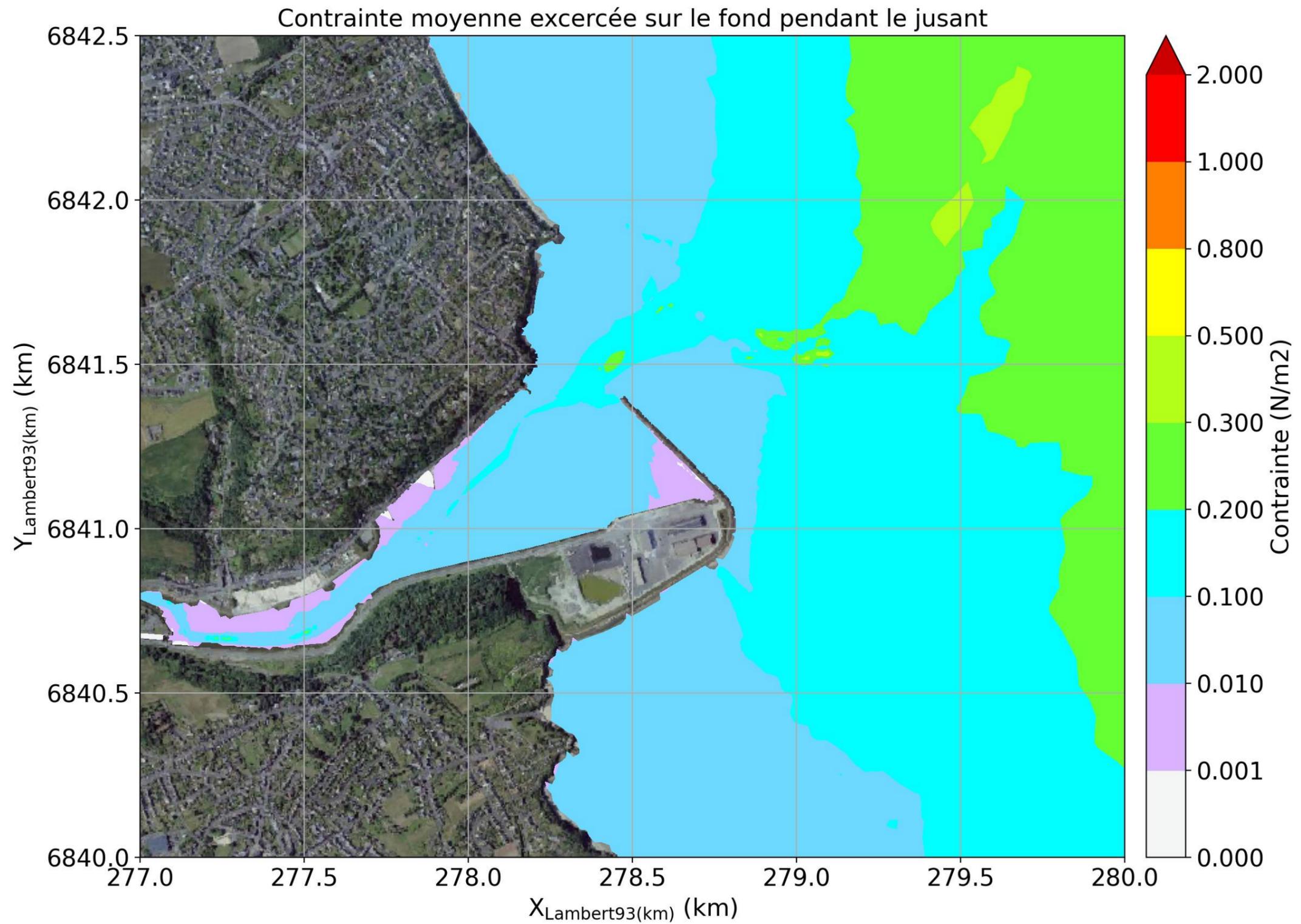


Figure 8-113: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 2.

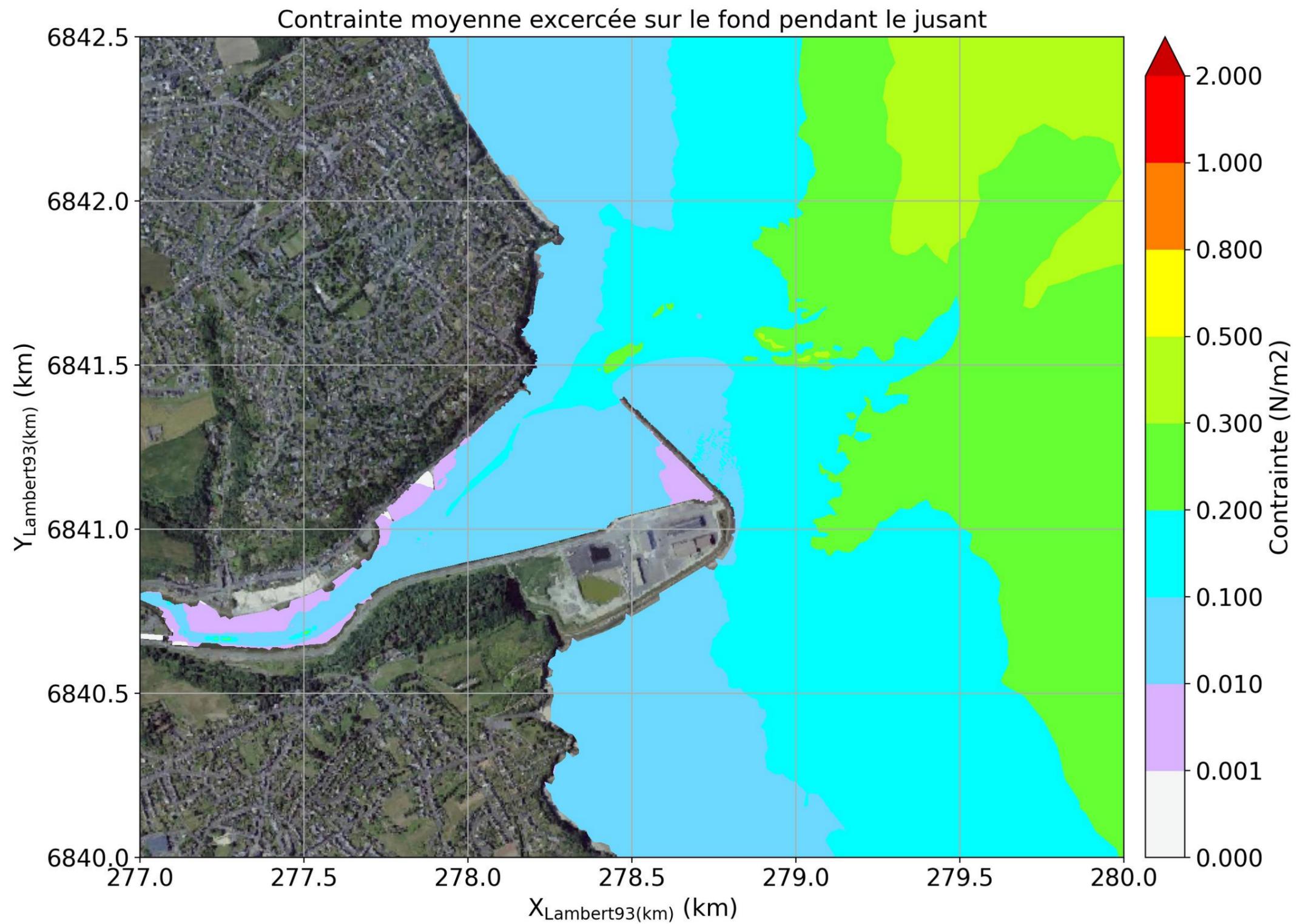


Figure 8-114: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 3.

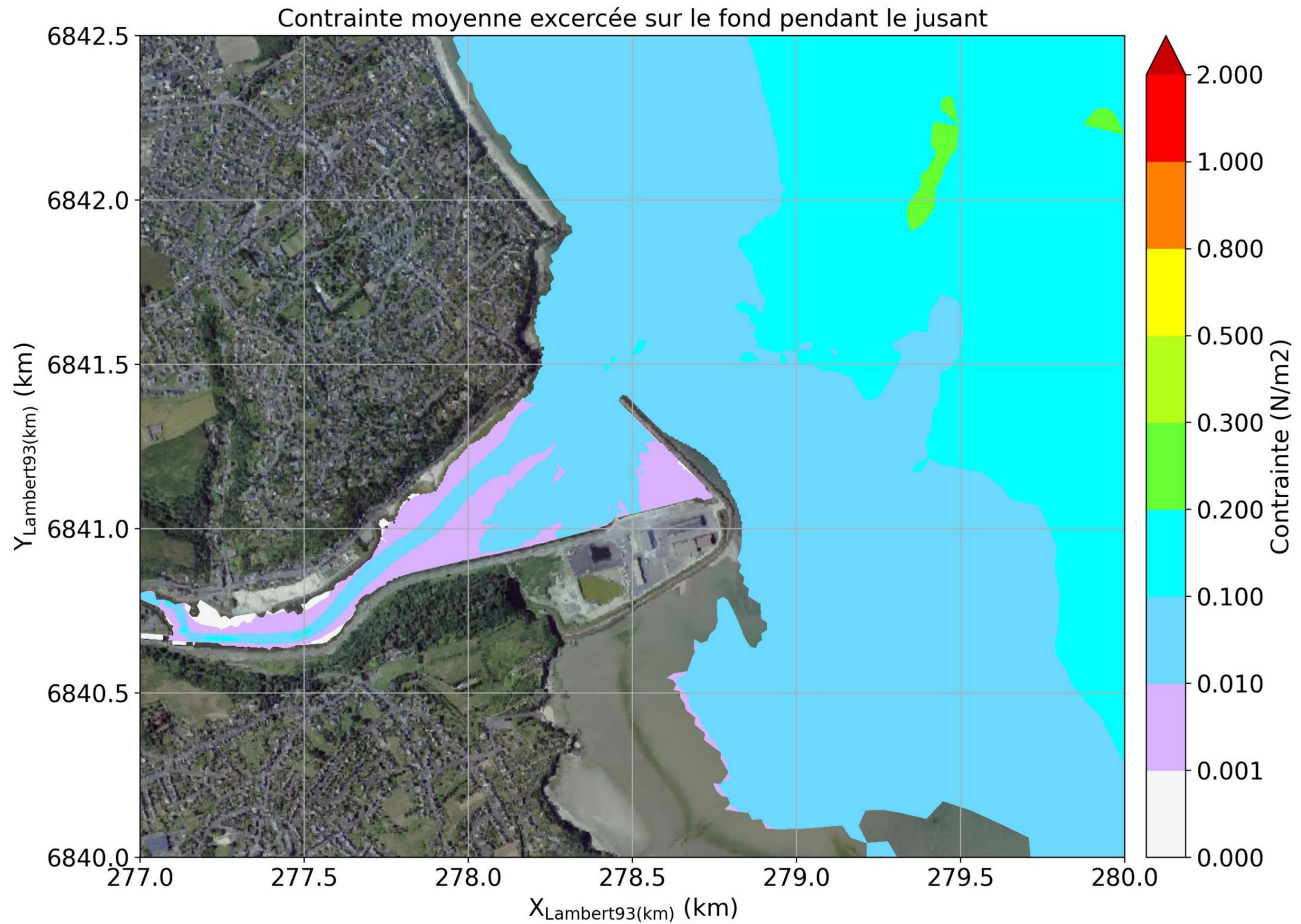


Figure 8-115: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 4.

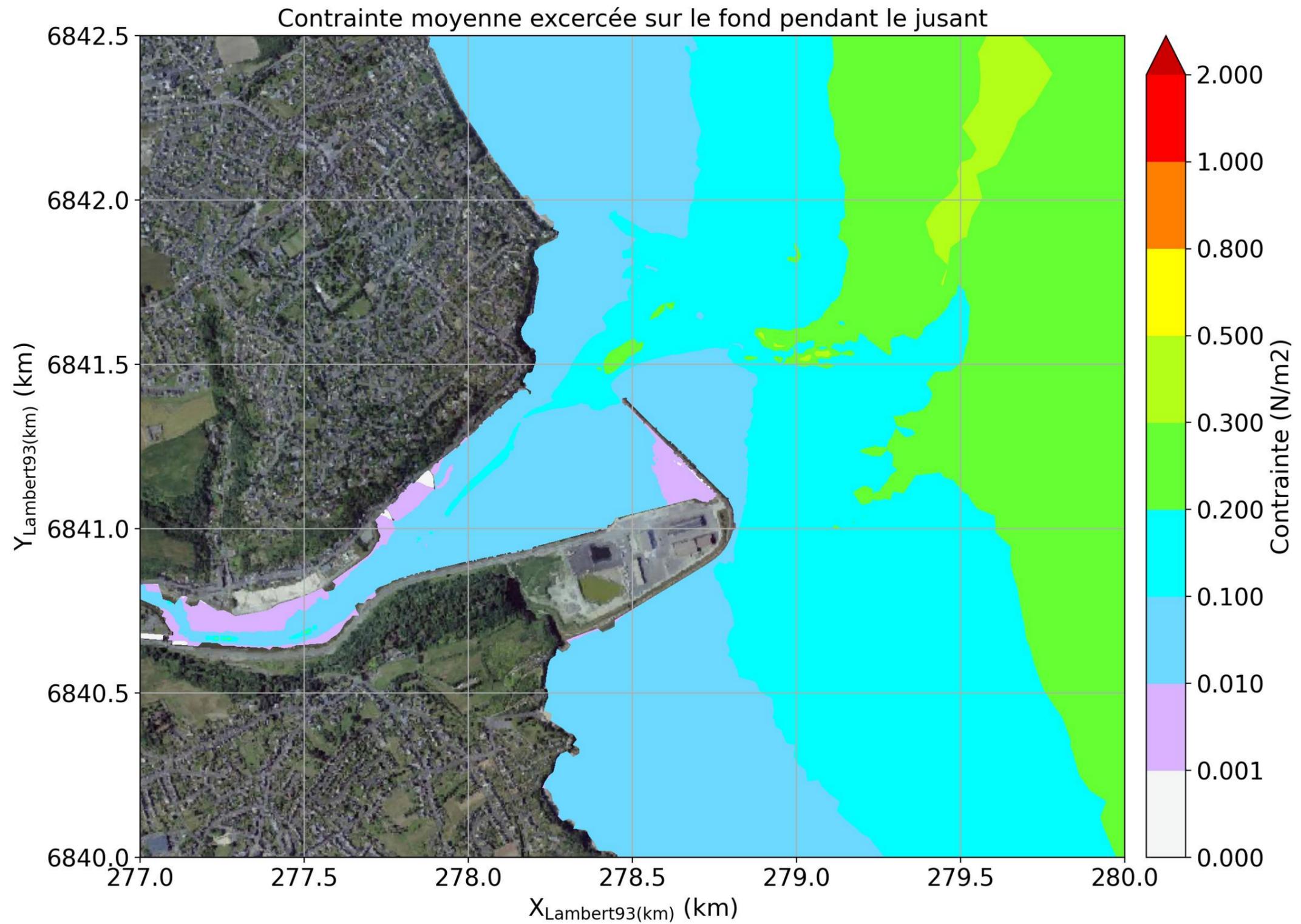


Figure 8-116: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 5.

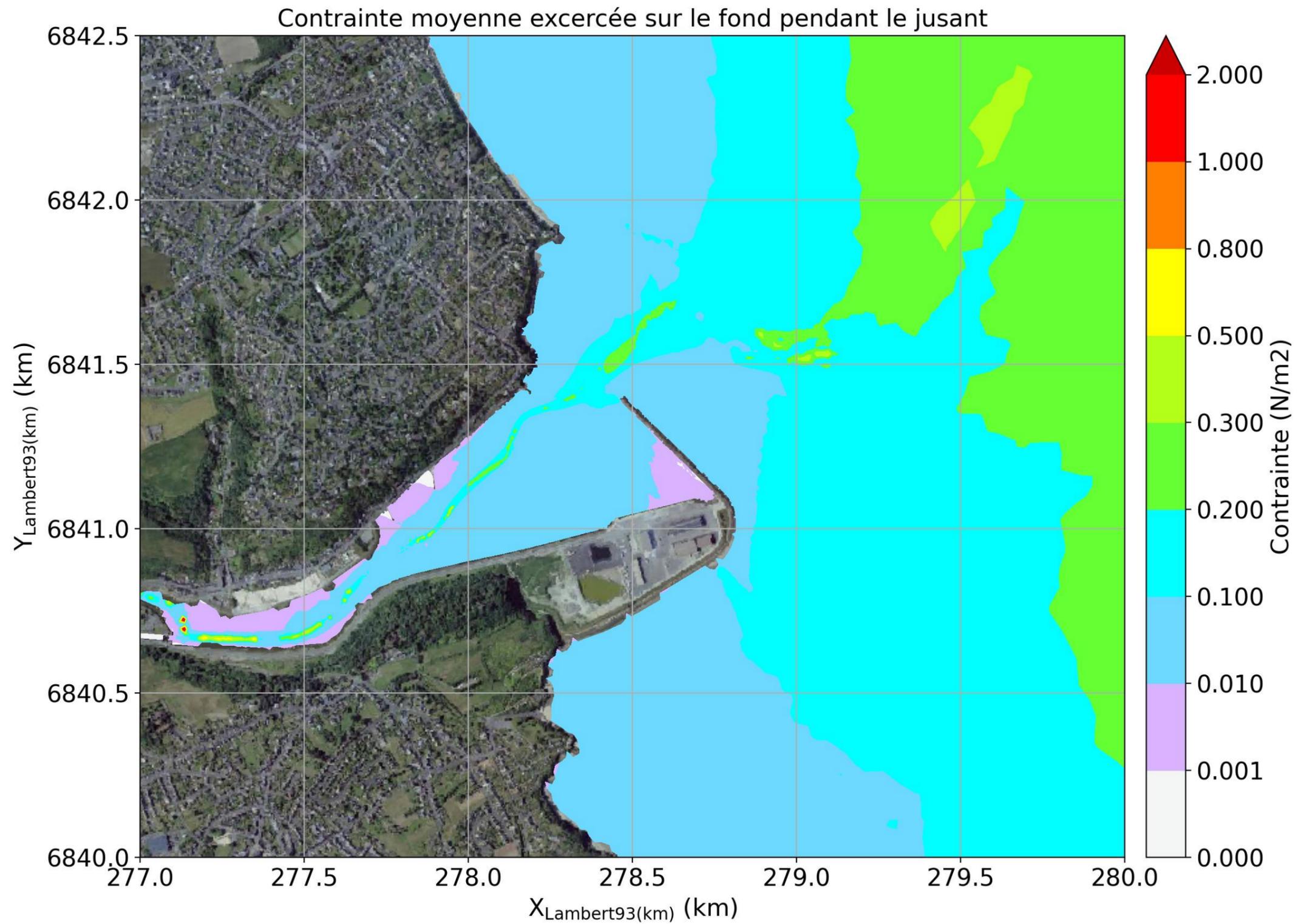


Figure 8-117: Contrainte moyenne exercée sur le fond pendant le jusant pour le scénario 6.

8.7.4.3 Epaisseur des dépôts vaseux

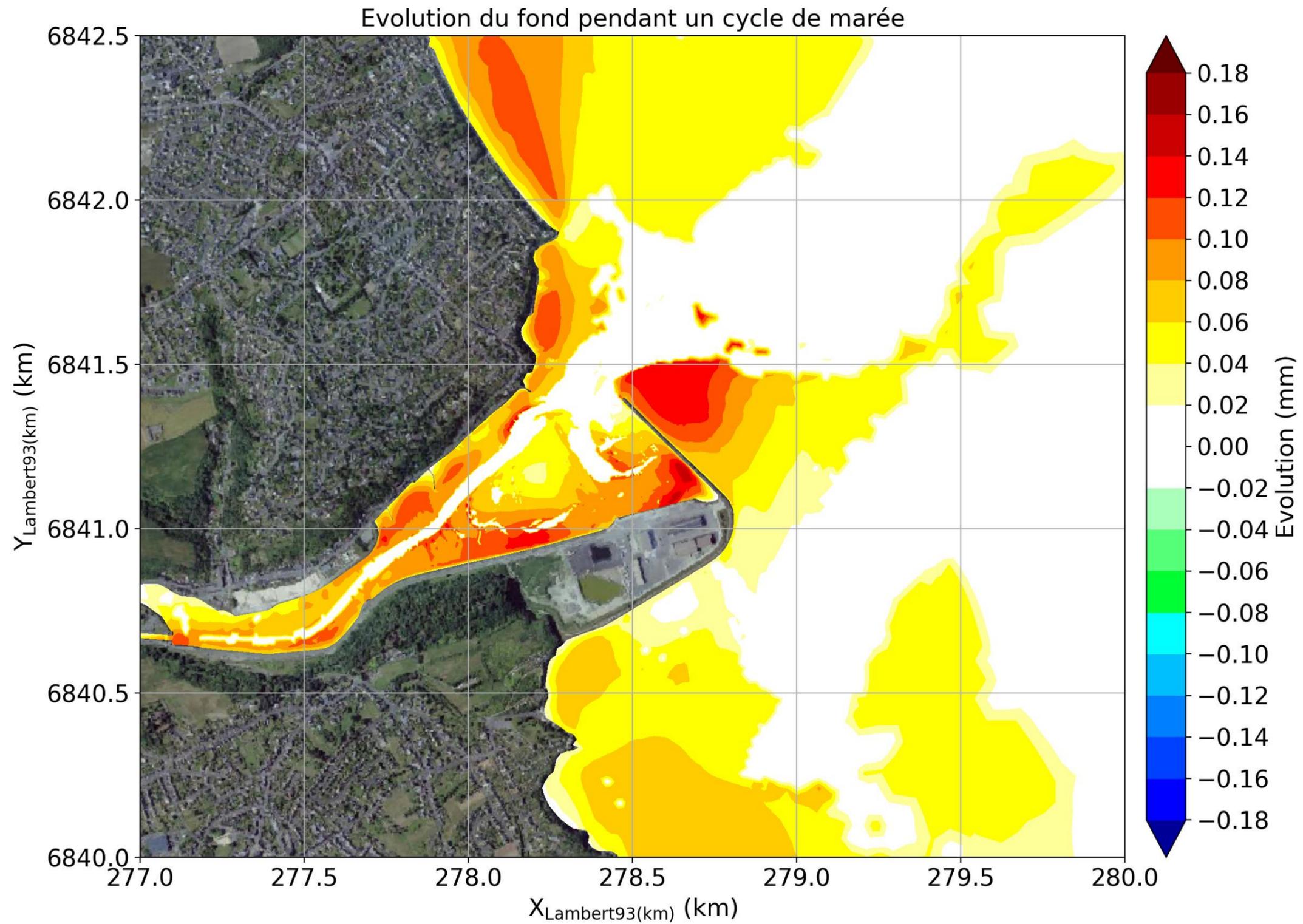


Figure 8-118: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 1 - Zoom sur le site d'étude.

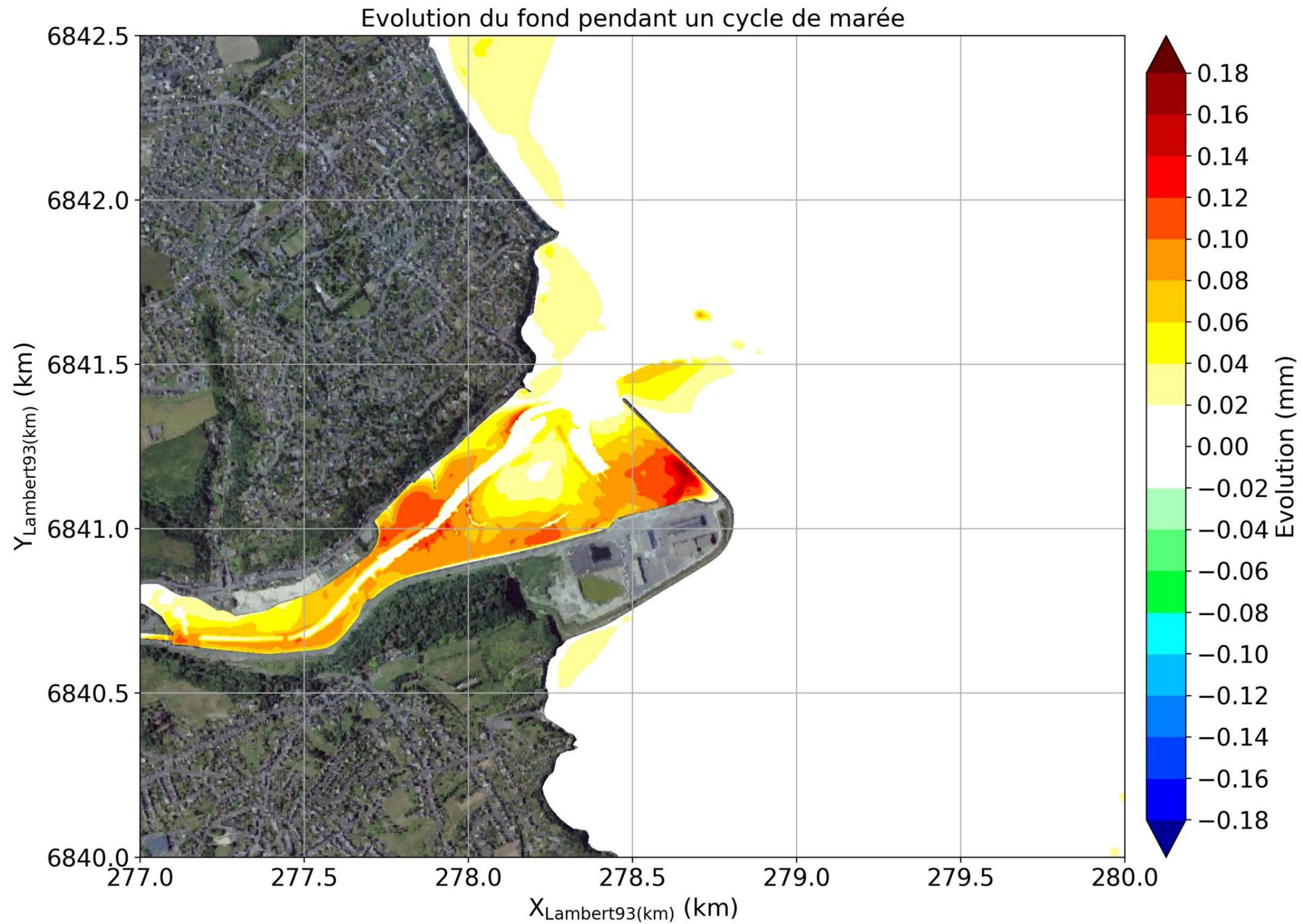


Figure 8-119: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom sur le site d'étude.

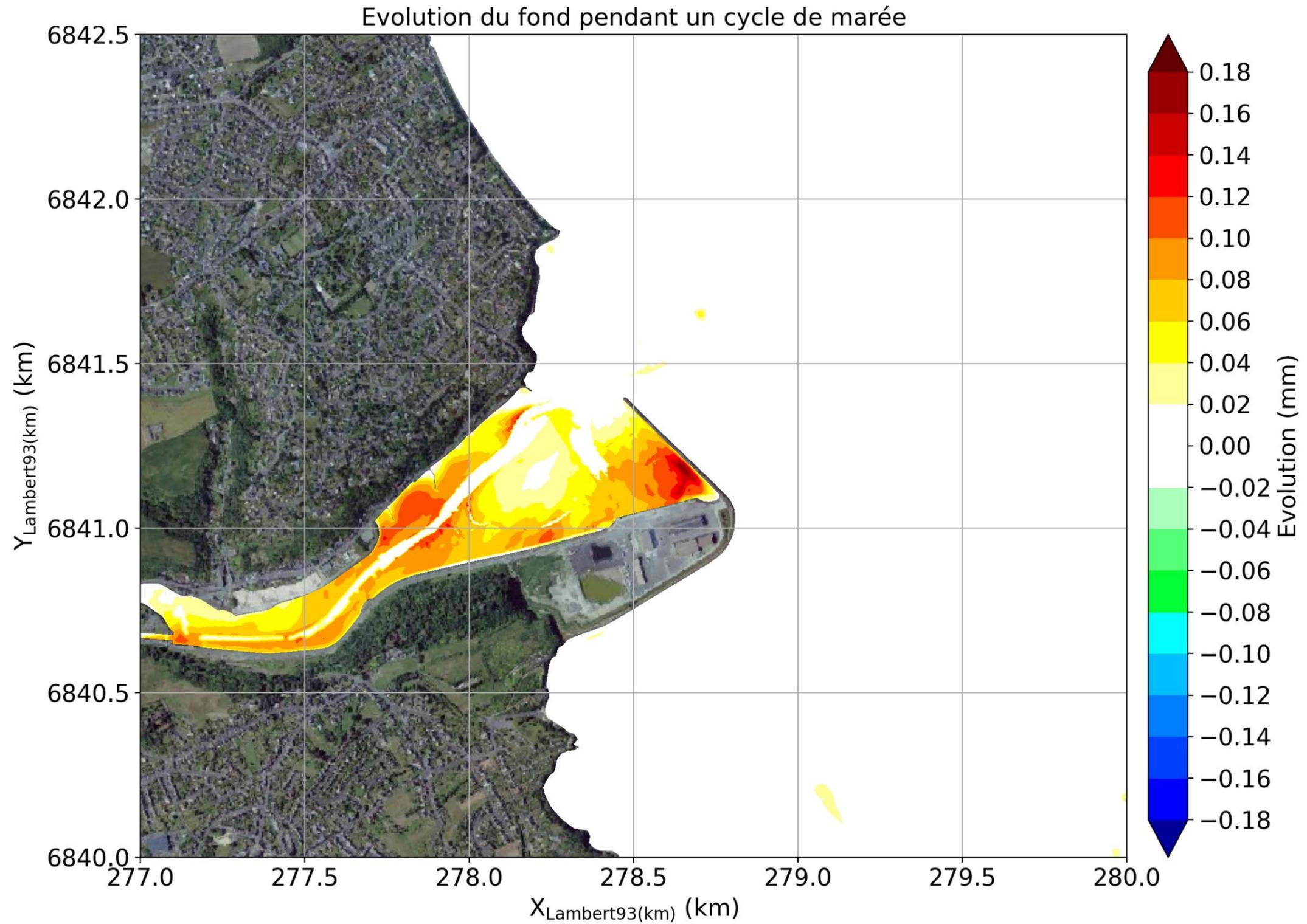


Figure 8-120: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 3 - Zoom sur le site d'étude.

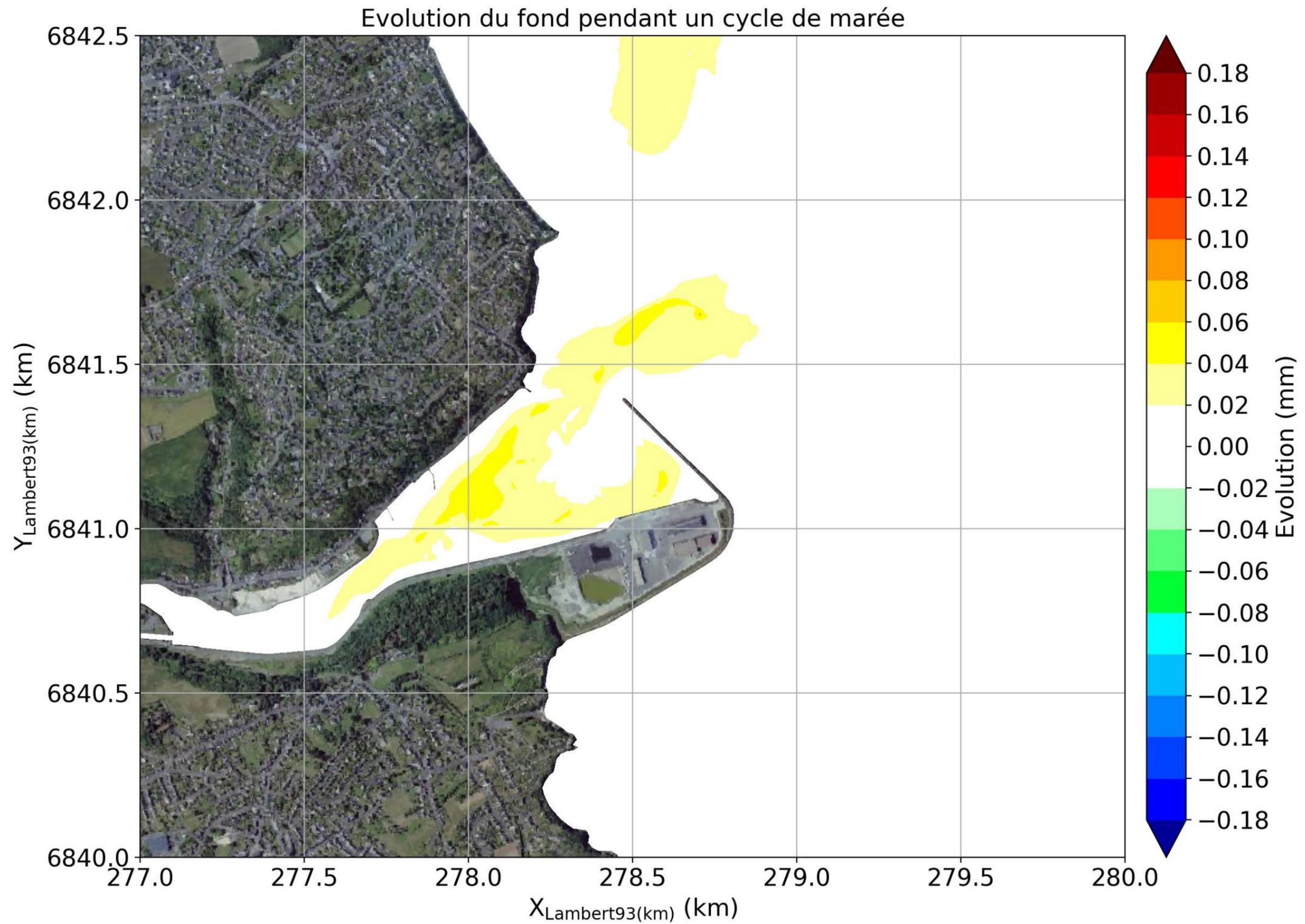


Figure 8-121: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 4 - Zoom sur le site d'étude.

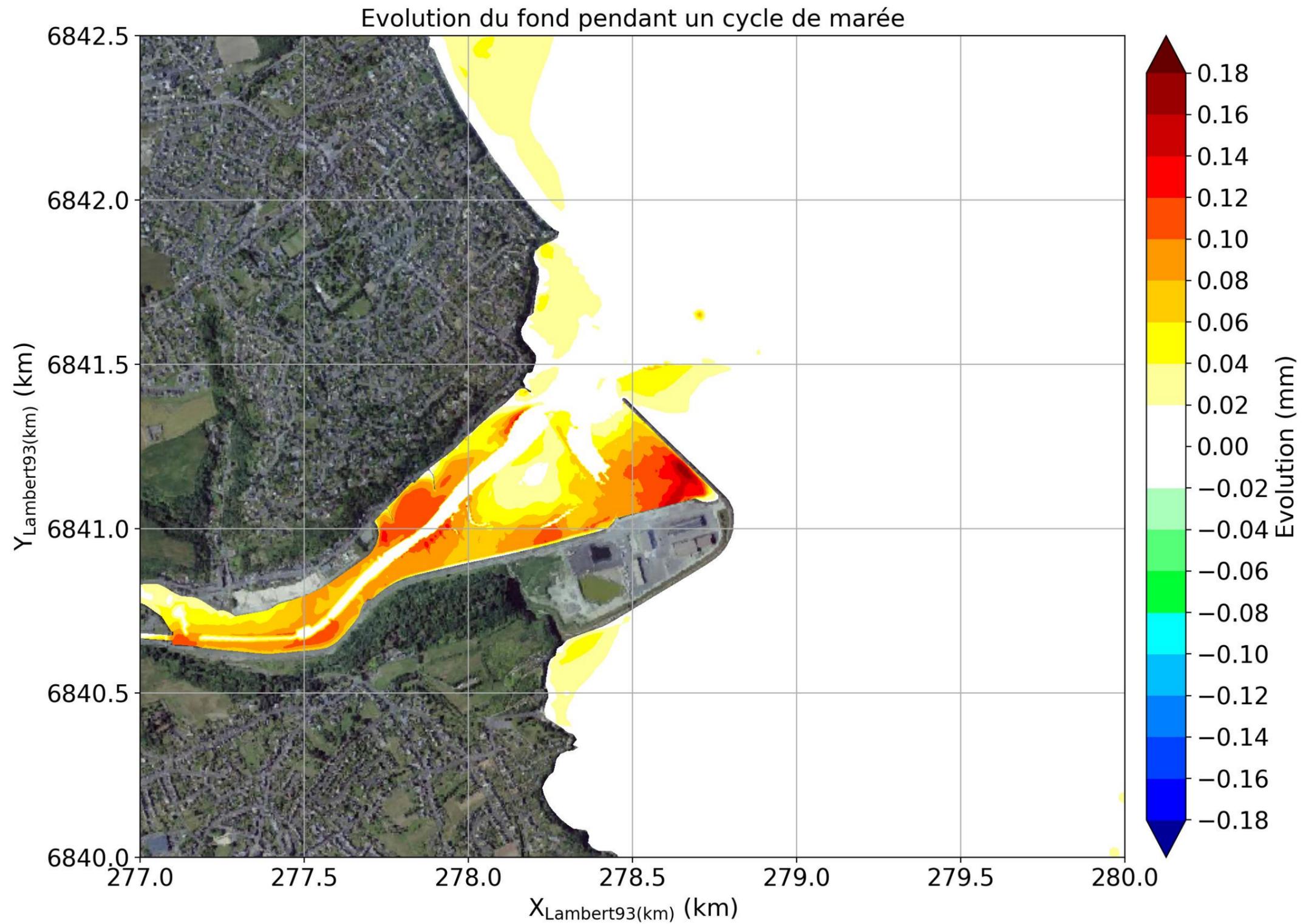


Figure 8-122: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 5 - Zoom sur le site d'étude.

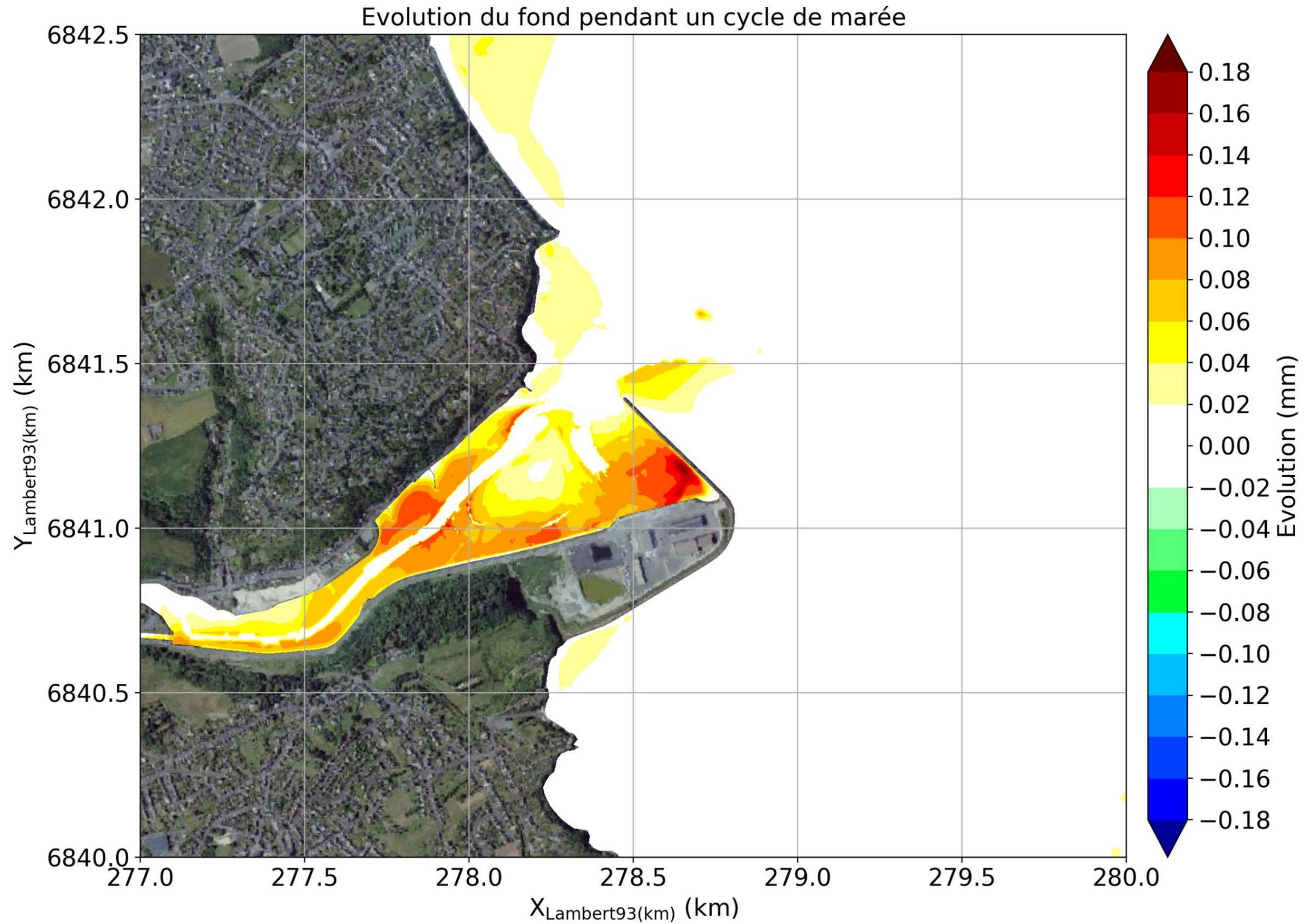


Figure 8-123: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom sur le site d'étude.

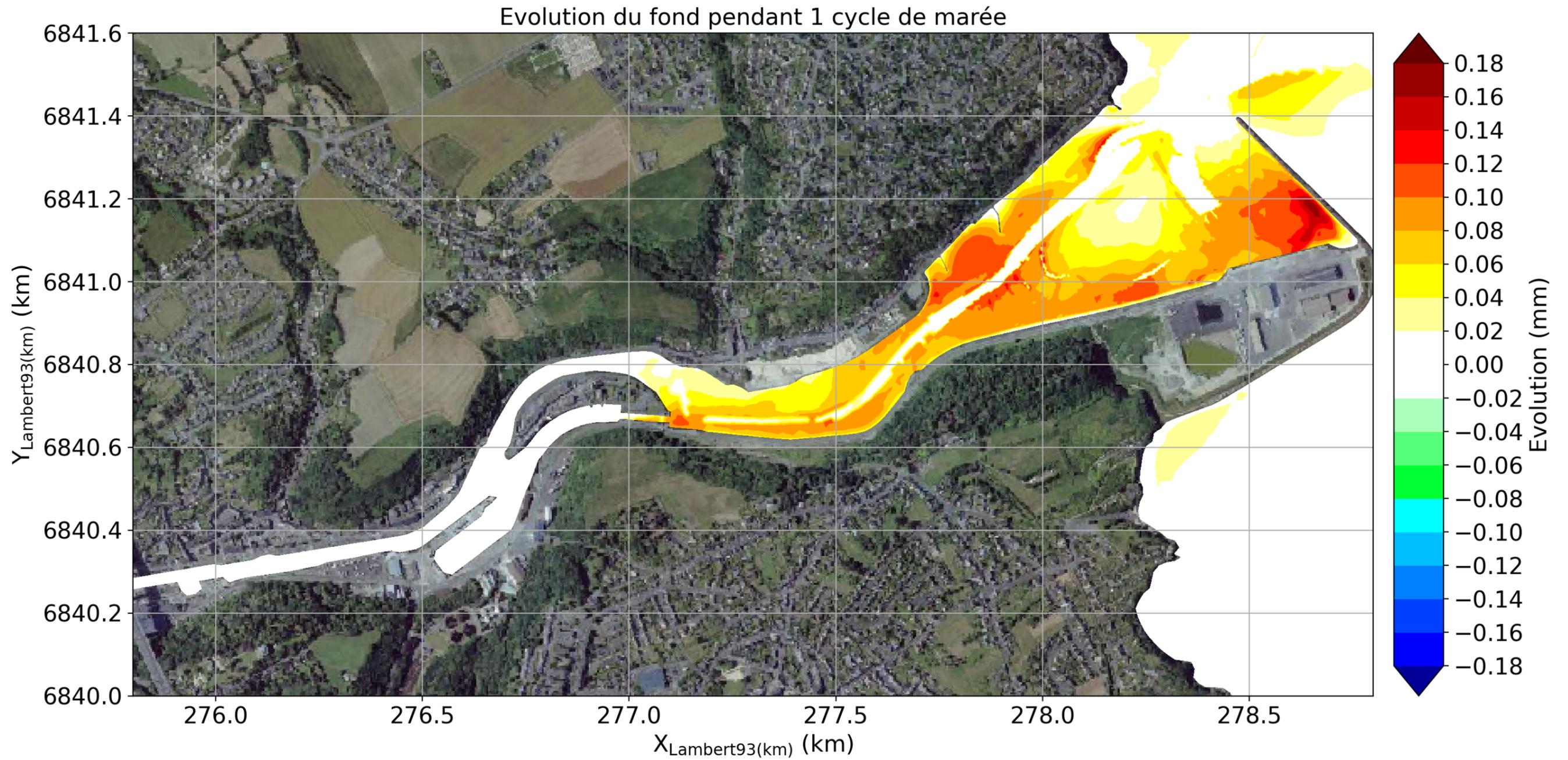


Figure 8-124: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 2 - Zoom du pont de pierre à l'avant-port.

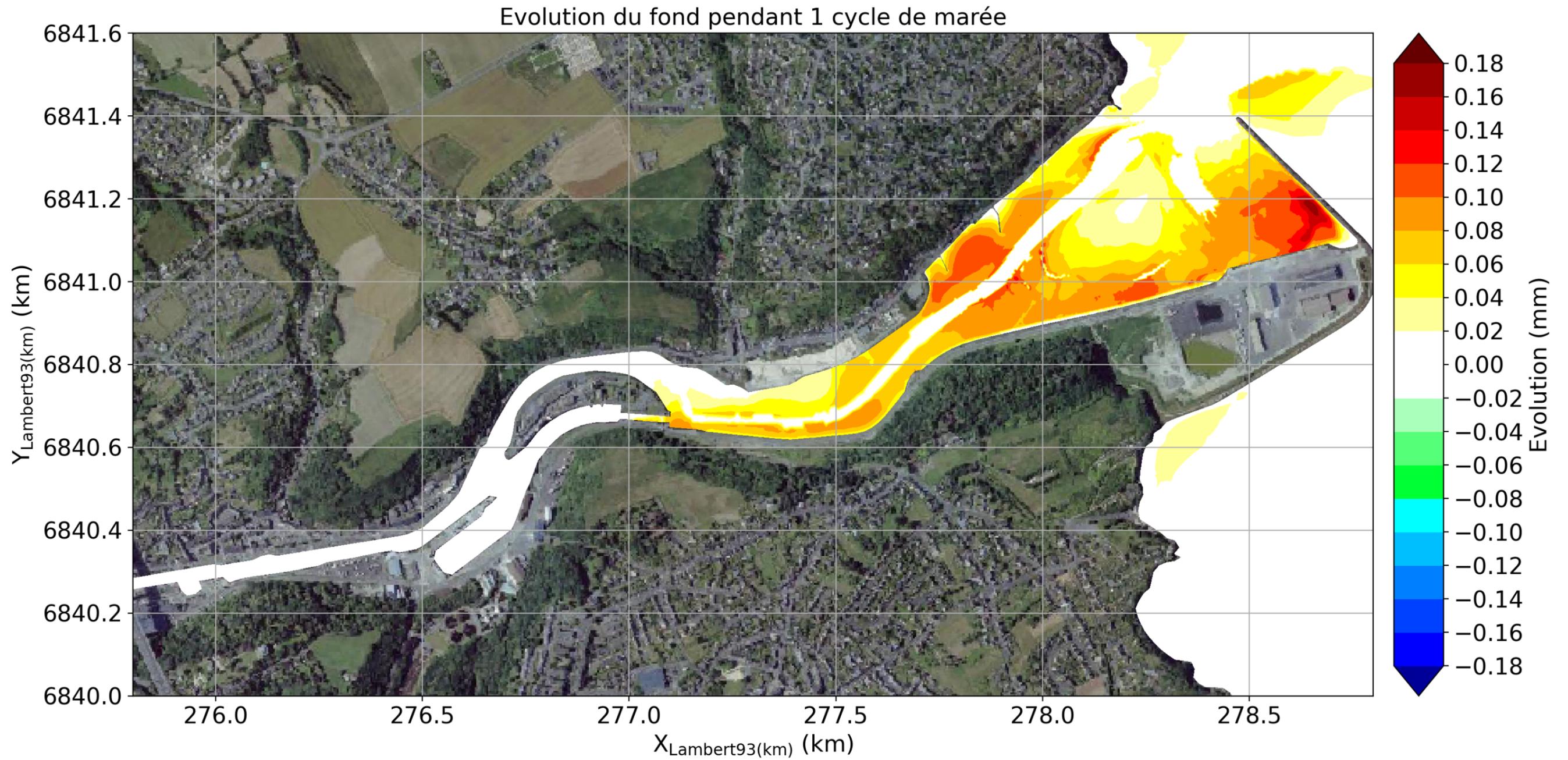


Figure 8-125: Cartographie des dépôts vaseux pendant un cycle de marée pour le scénario 6 - Zoom du pont de pierre à l'avant-port.

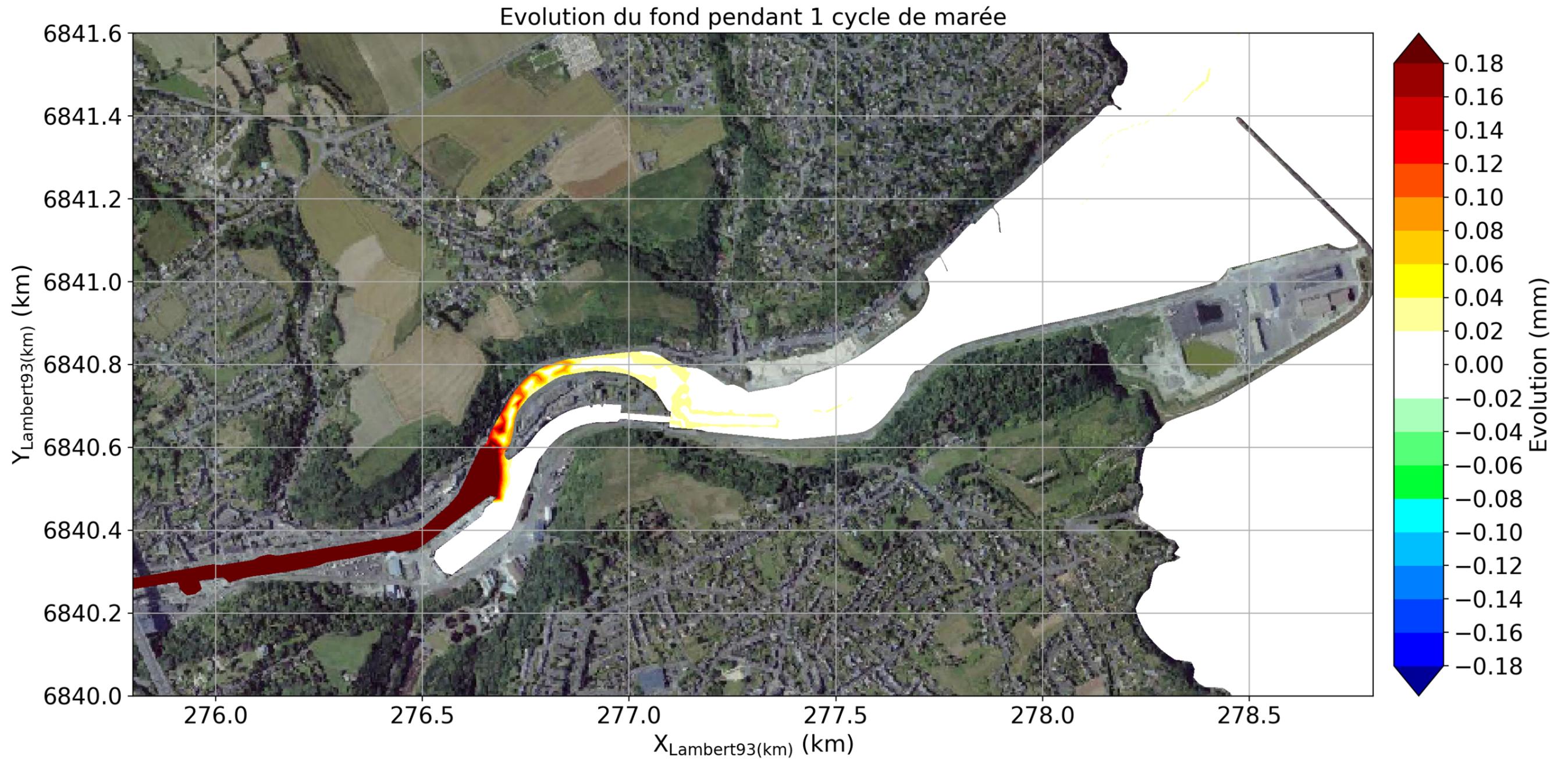


Figure 8-126: Epaisseurs de vases déposées à la fin du 1e cycle de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de 12 m3/s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.

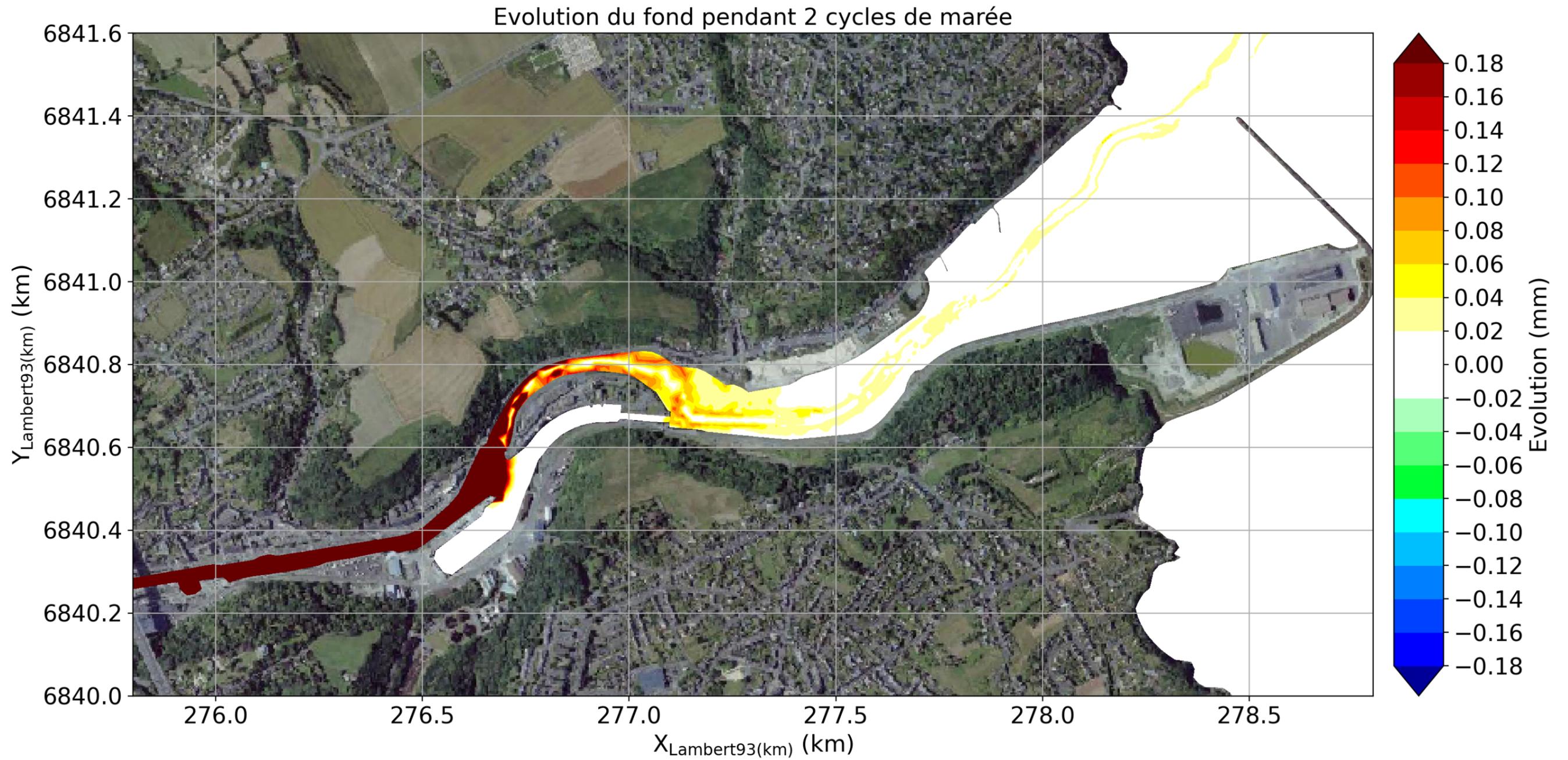


Figure 8-127: Epaisseurs de vases déposées à la fin du 2e cycle de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de 12 m3/s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.

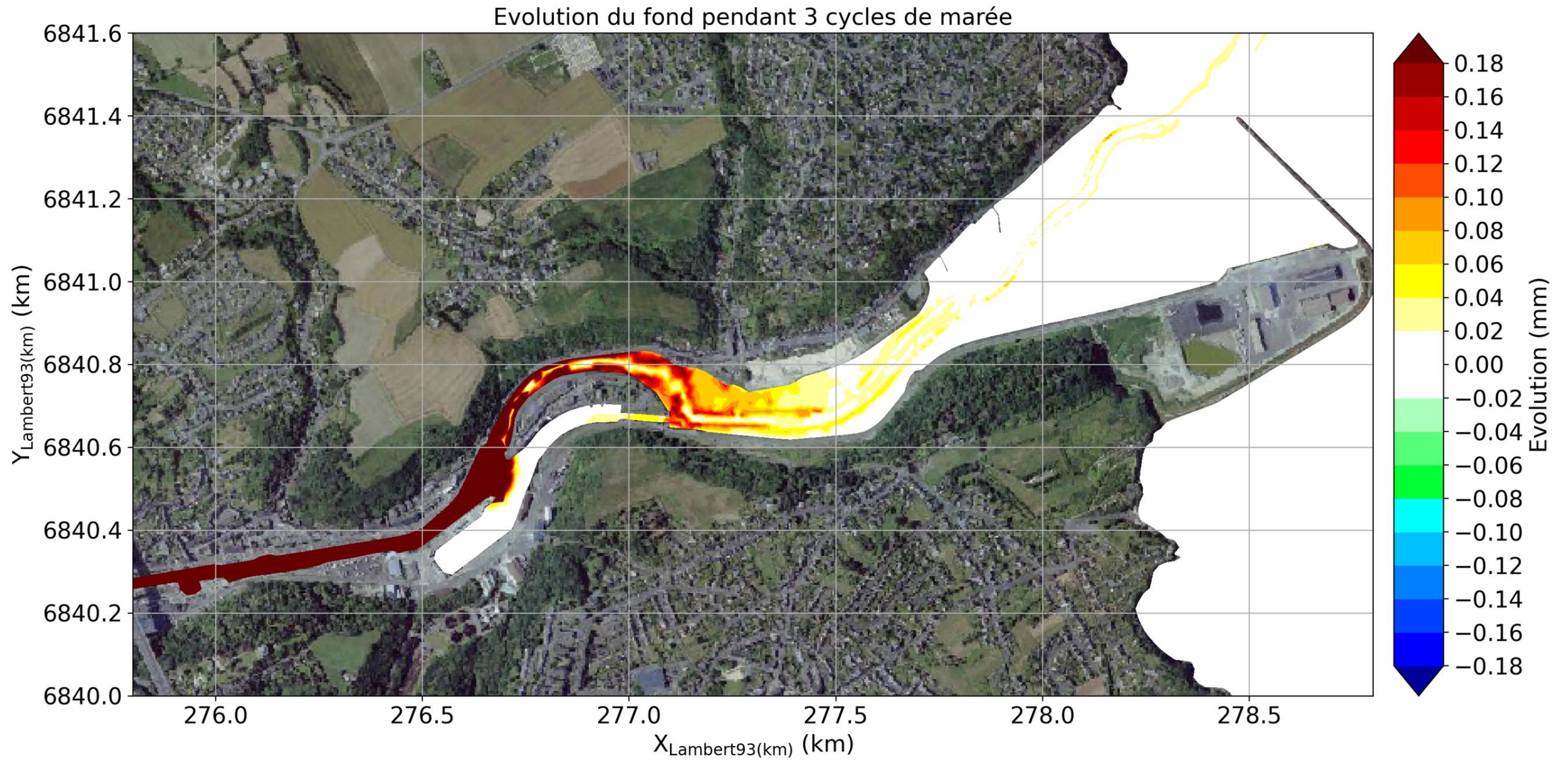


Figure 8-128: Epaisseurs de vases déposées à la fin du 3e cycle de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de 12 m3/s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire.

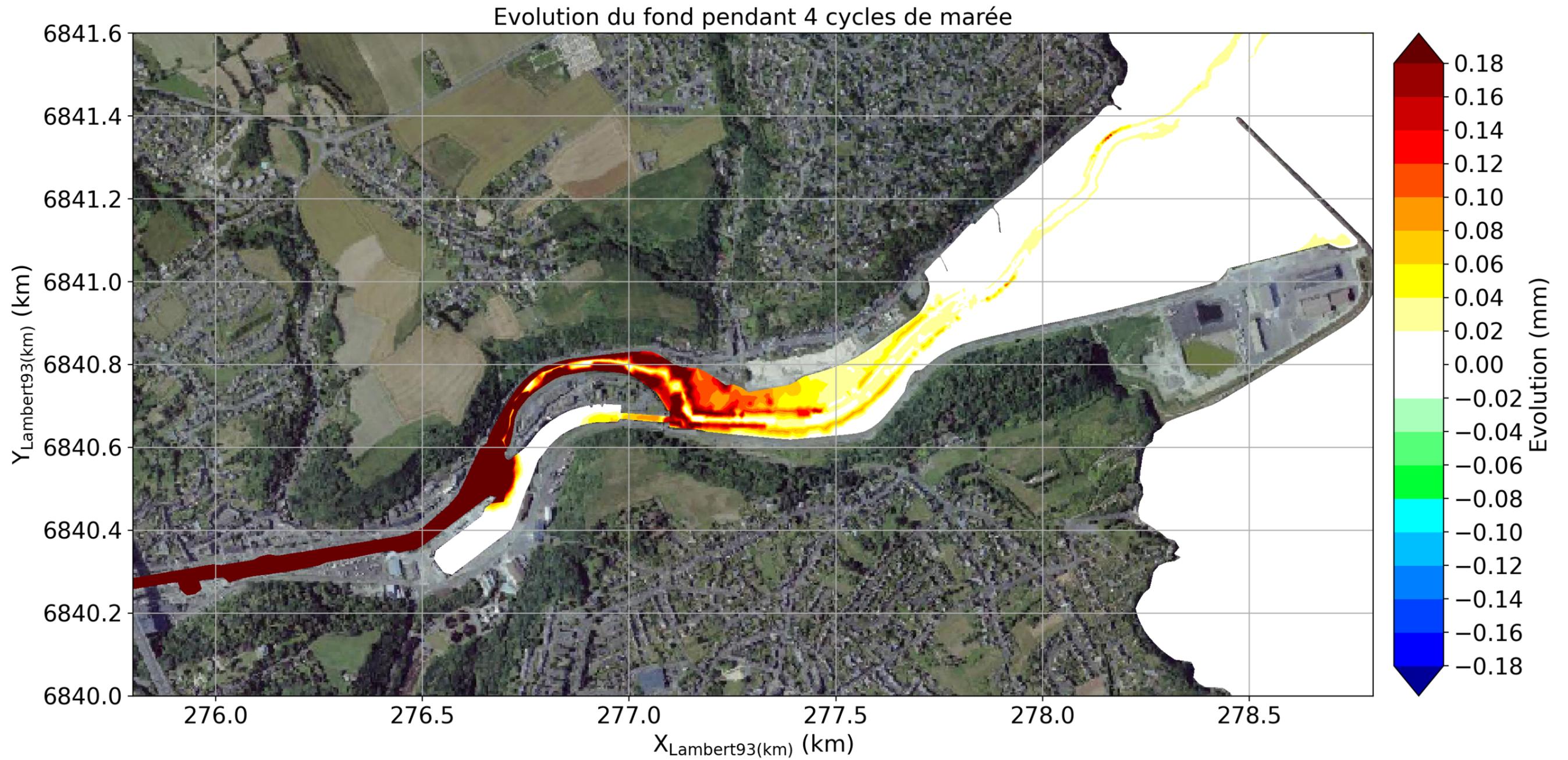


Figure 8-129: Epaisseurs de vases déposées à la fin du 4e cycle de marée en prescrivant une concentration en MES de 10 mg/l et un débit de 12 m³/s (percentile 98) en limite amont du modèle hydro-sédimentaire

8.8 ANNEXE 8 : FIGURES AU FORMAT A3 POUR LES SCENARIOS LONGS

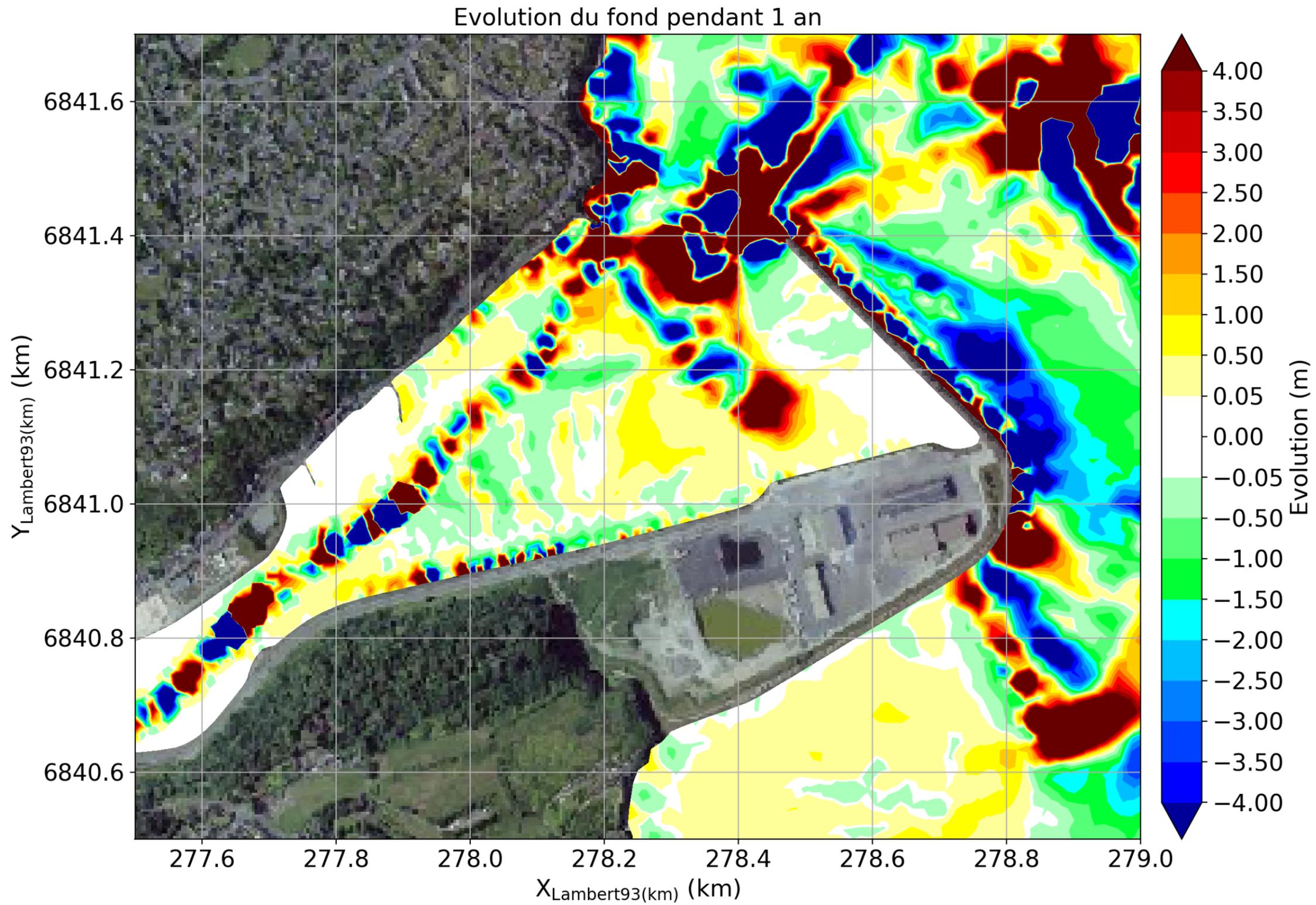


Figure 8-130 Evolution des fonds sableux au bout d'un an de simulation lors de la simulation A (bathymétrie 2020).

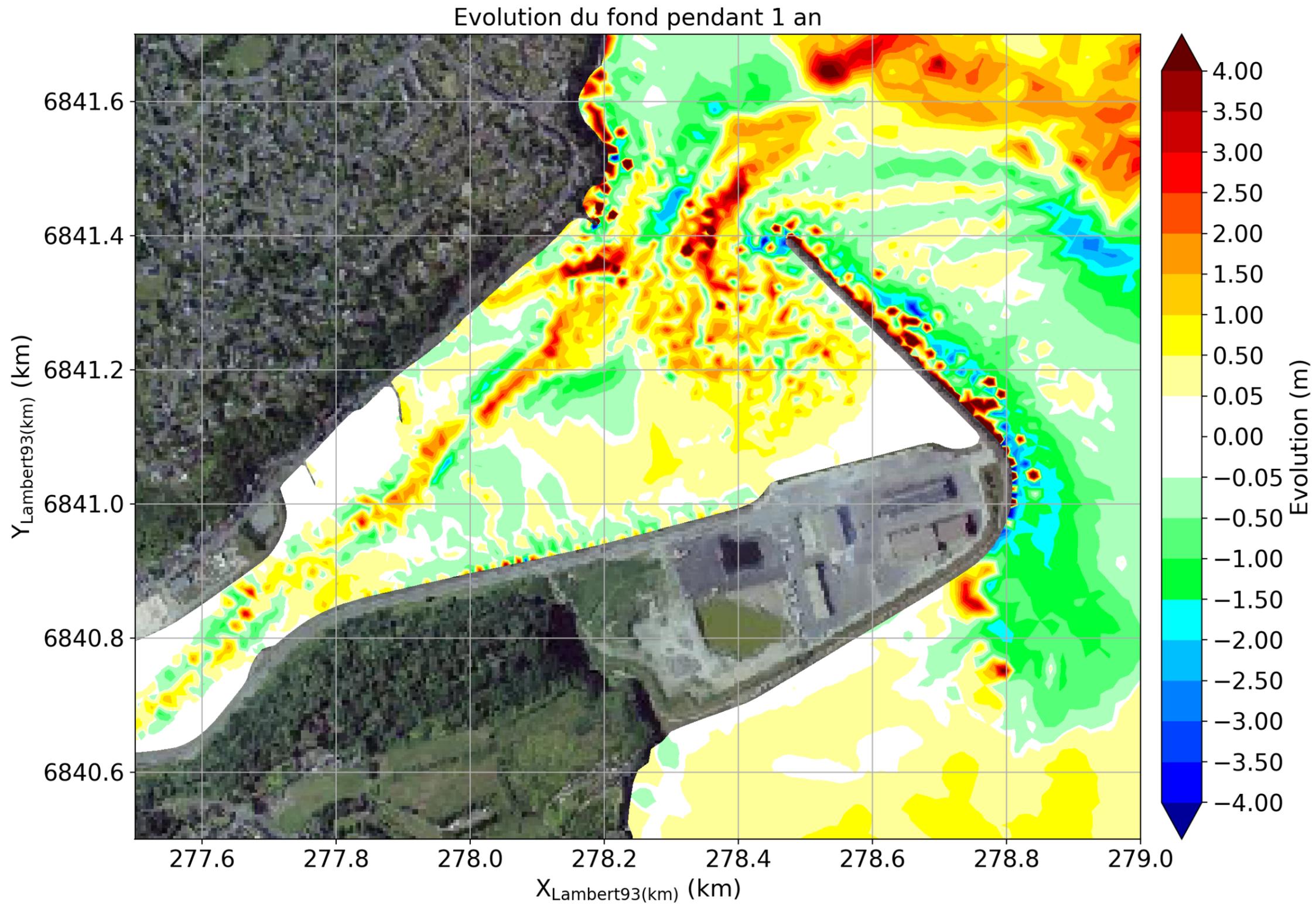


Figure 8-131 Evolution des fonds sableux au bout d'un an de simulation lors de la simulation B (fonds dragués initialement à +4.5m CM dans l'avant-port).

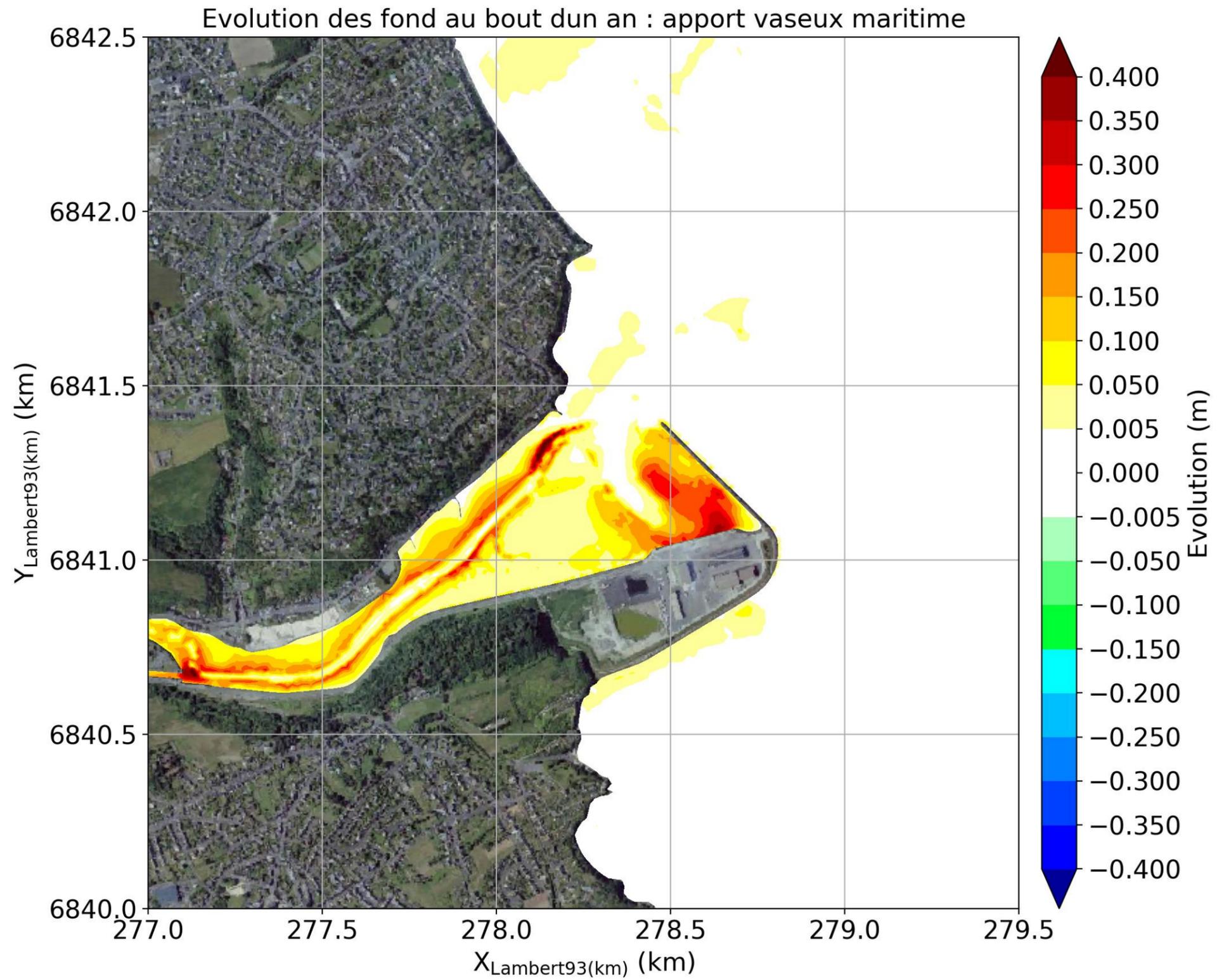


Figure 7-5 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation : apport maritime

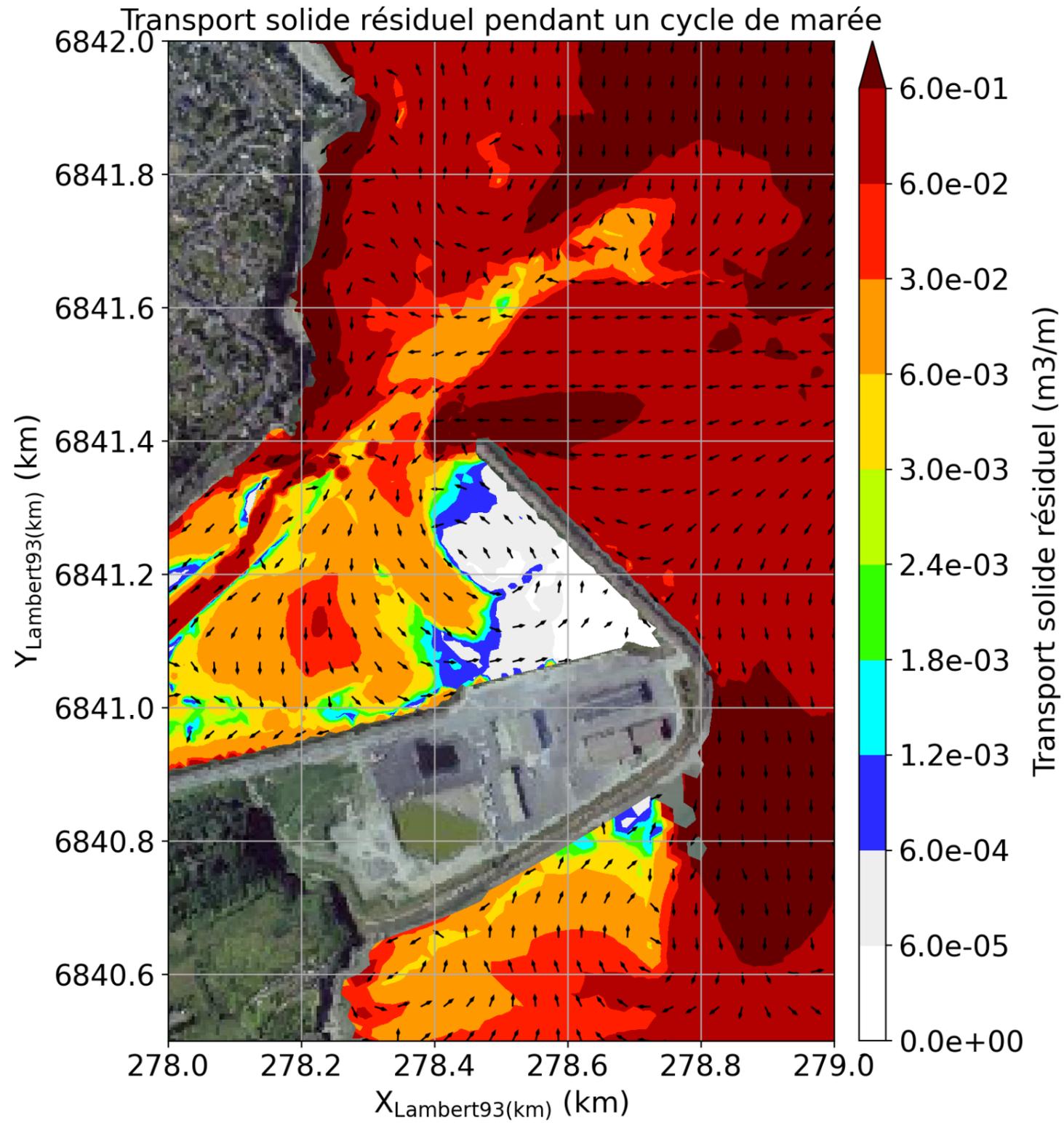


Figure 8-132 Cartographie du transport résiduel au cours du cycle de marée du 06/01/2018 matin (marée de vive-eau 92) ; Bathymétrie initiale correspondant à la bathymétrie arasée devant le mole.

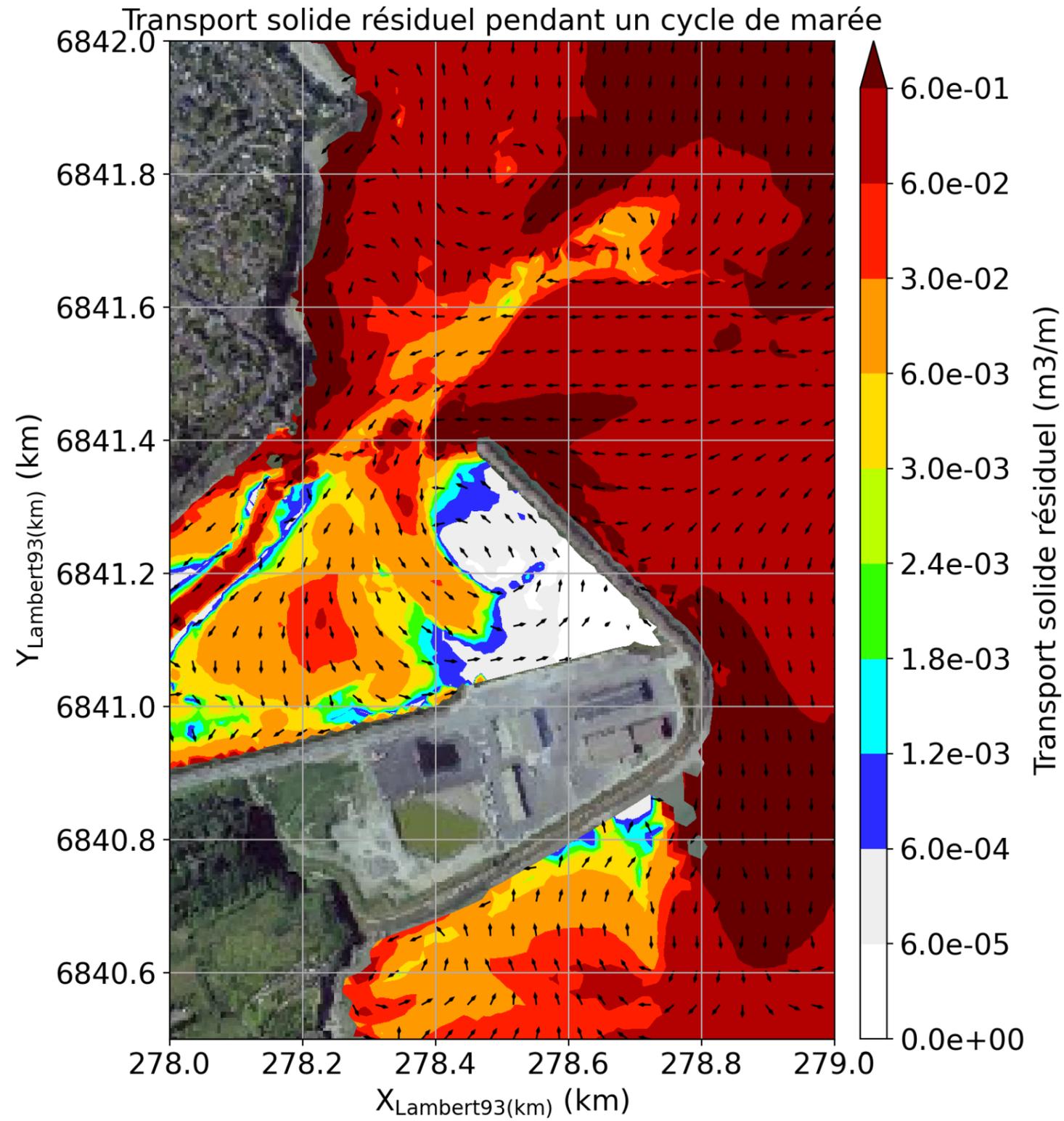


Figure 8-133 Cartographie du transport résiduel au cours du cycle de marée du 06/01/2018 matin (marée de vive-eau 92) ; Bathymétrie initiale correspondant à celle de 2020.

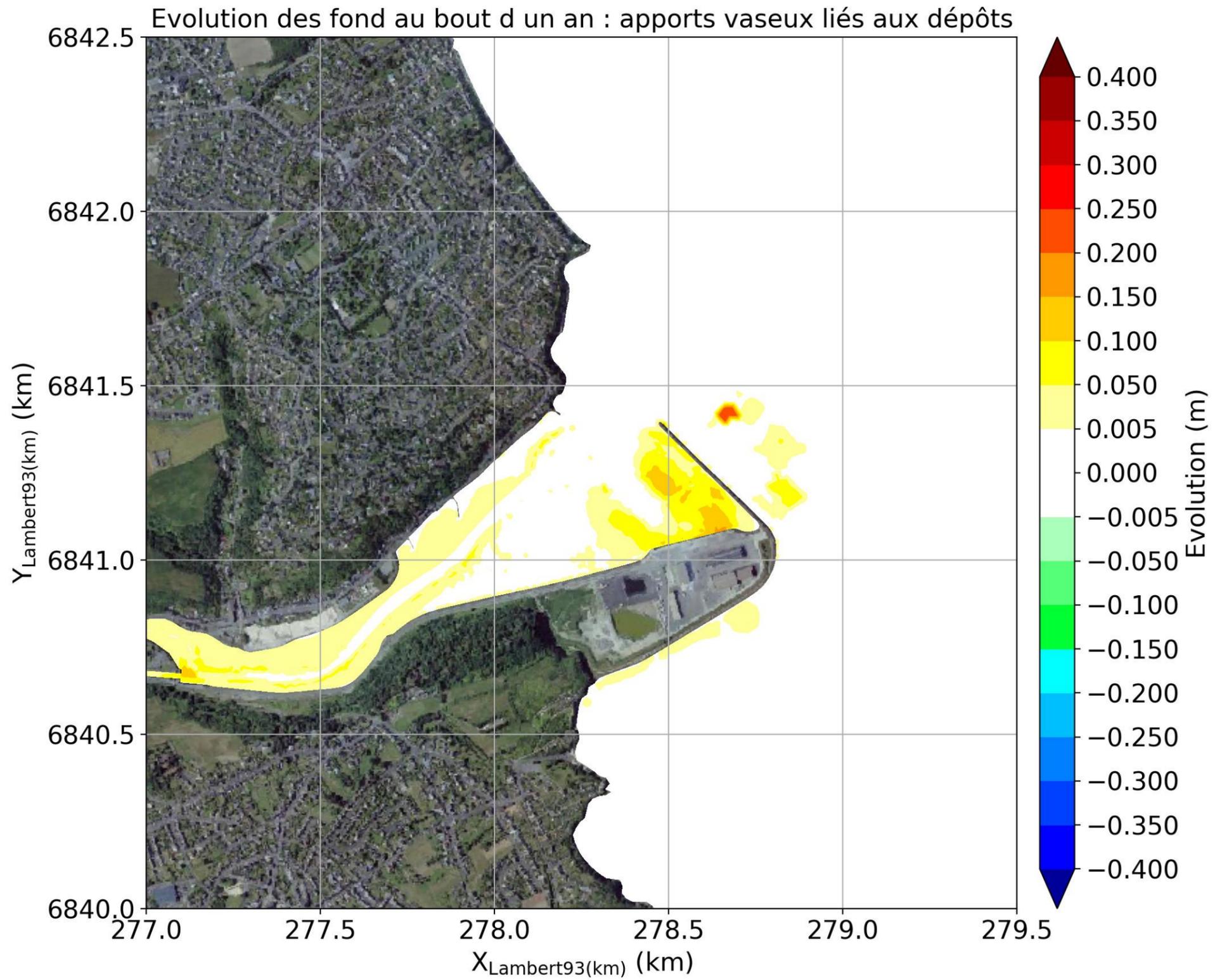


Figure 8-134 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation : apport lié au dépôt des sédiments dragués

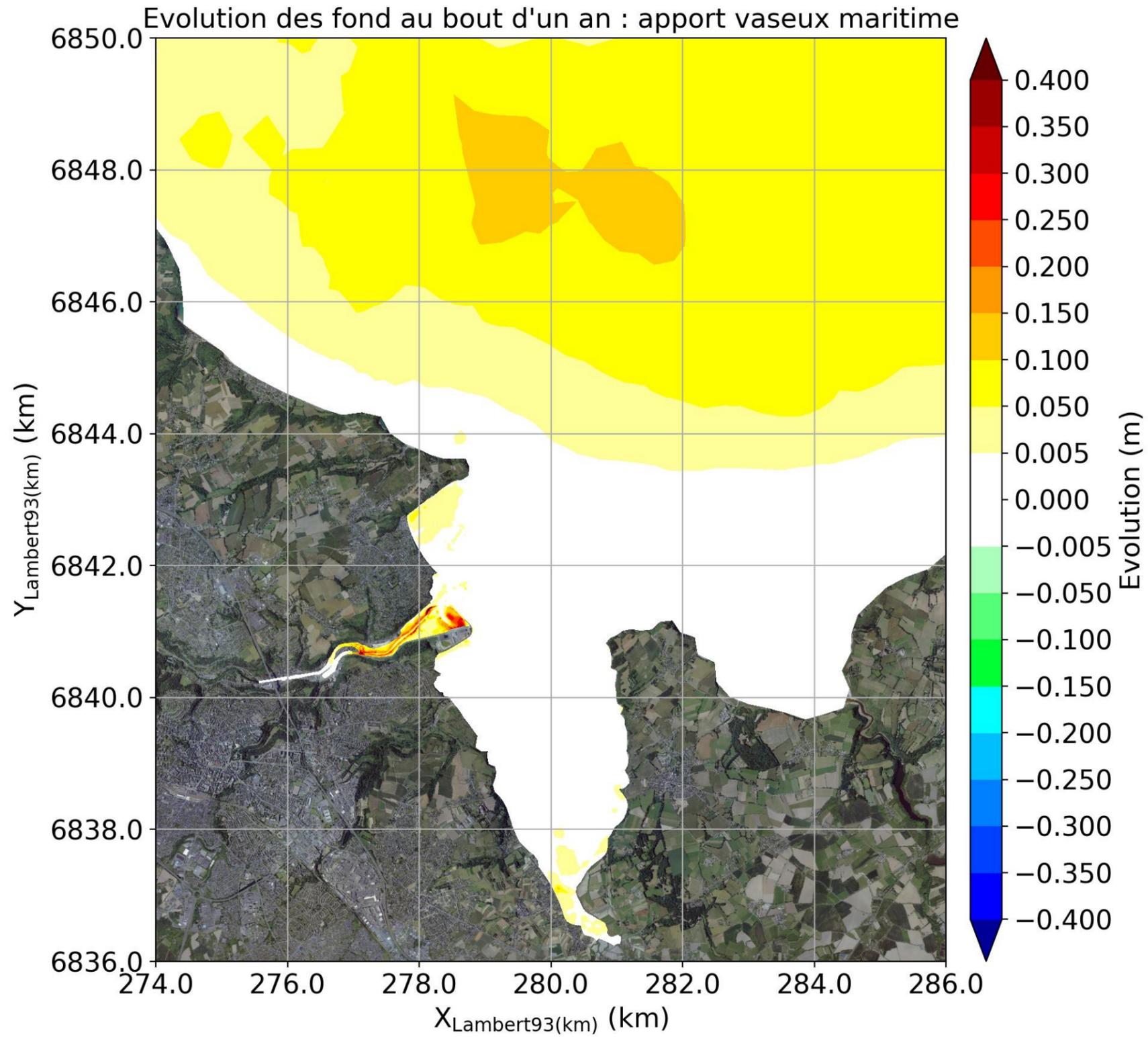


Figure 8-135 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation à une échelle élargie : apports maritimes.

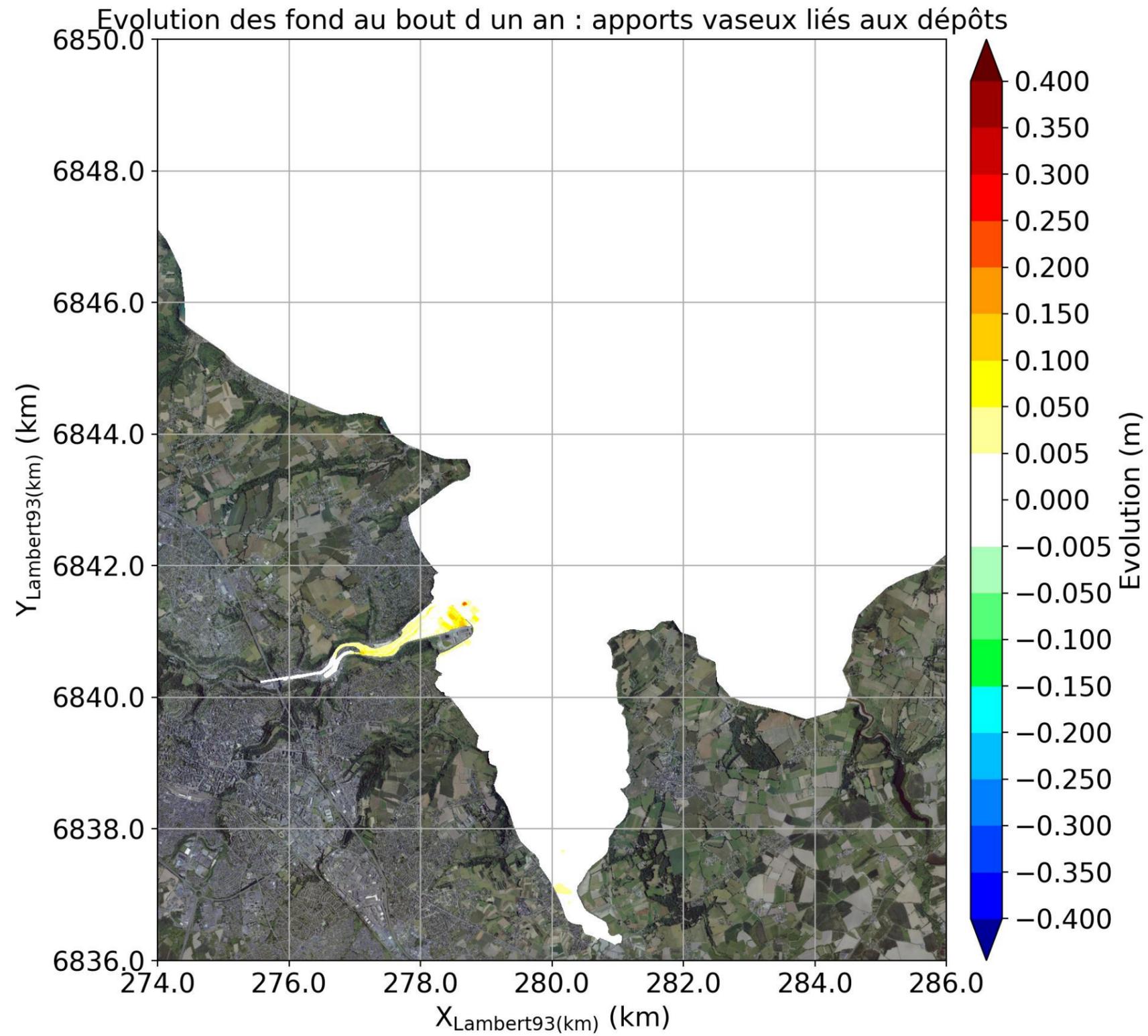


Figure 8-136 Epaisseur des dépôts vaseux au bout d'un an de simulation à une échelle élargie : apports liés au dépôt des sédiments dragués

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACTIMAR, 2012. Port de Saint-Brieuc Le Légué – Projet 4ème quai: étude d'agitation, courantologie et sédimentation. Rapport d'étude.

Airy, G.B. 1841. Tides and Waves. In Hughes James Rose et al. Encyclopedia Metropolitana Mixed Science. 3 (published 1817-1845). Also; Trigonometry, On The Figure of The Earth, Tides and Waves, 396 pp.

BCEOM, 1998. Extension du port de Saint-Brieuc / Le Légué - Projet d'infrastructures à court terme.

Bishop, C.T. et Donelan, M.A. 1987. Measuring waves with pressure transducers. Coastal Engineering 11, 309-328.

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.