



# Port du Légué

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



## Rapport de la phase 3

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

<b>1.</b>	<b>MOTIF ET OBJECTIF .....</b>	<b>10</b>
<b>2.</b>	<b>PRESENTATION DES SCENARIOS MODELISEES EN PHASE 3 .....</b>	<b>13</b>
2.1	MODIFICATION DES PRATIQUES DE DRAGAGE ET/OU DE GESTION DES SEDIMENTS.....	14
2.1.1	Scénario 1 : Dépôt sur l'estran selon l'arrêté actuel (2022).....	14
2.1.2	Scénario 2 et 4 : Dépôt sur l'estran avec part valorisée à terre modifiée .....	14
2.1.3	Scénario 3 : Dépôt sur l'estran avec suppression de la pointe sableuse.....	15
2.1.4	Scénario 5 : Clapage ou valorisation 100 % terrestre .....	15
2.1.5	Scénario 6 : Refoulement hydraulique.....	15
2.2	AMENAGEMENT VISANT A LIMITER LE RECOURS AU DRAGAGE .....	16
2.2.1	Scénario 7 : Ouverture du mole.....	16
2.2.2	Scénario 8 : Mise en eau du port.....	17
2.2.3	Scénario 9 : Mise en place d'un épi pour recanaliser différemment le Gouët... 18	
2.2.4	Scénario 10 : Mise en place d'un seuil inclinable.....	18
<b>3.</b>	<b>MISE EN PLACE DES MODELISATIONS.....</b>	<b>20</b>
3.1	CODES DE CALCUL ET PARAMETRISATION.....	20
3.2	MAILLAGES .....	22
3.3	PRISE EN COMPTE EXPLICITE DES DRAGAGES ET DES DEPOTS .....	24
<b>4.</b>	<b>RESULTATS .....</b>	<b>25</b>
4.1	ANALYSE DE LA MODIFICATION DE LA STRATEGIE DE GESTION DES DRAGAGES/DEPOTS	26
4.1.1	Modification des zones de dépôt : Scénario 1 versus scénario 0.....	26
4.1.2	Modification du pourcentage de valorisation à terre : Scénario 2, 4 et 5 versus scénario 1 .....	28
4.1.3	Refoulement hydraulique.....	31

4.1.4	Synthèse .....	36
4.2	ANALYSE DE L'EFFET DE NOUVEAUX AMENAGEMENTS .....	37
4.2.1	Arasement de la flèche sableuse : Scénario 3 versus scénario 2 .....	37
4.2.2	Ouverture du mole (scénario 7) .....	42
4.2.3	Mise en eau de l'avant-port (scénario 8).....	44
4.2.4	Chenal recanalisé (scénario 9) .....	46
4.2.5	Seuil inclinable (scénario 10).....	48
4.2.6	Synthèse .....	59

## Table des illustrations

Figure 1-1. Localisation du port du Légué dans la baie de Saint-Brieuc .....	10
Figure 1-2. Port du Légué et localisation des zones de dragage dans l'avant-port (bleu) et de dépôt derrière la digue (jaune)- Ancien arrêté préfectoral.....	11
Figure 2-1 Localisation de la zone de refoulement pour le scénario 6. ....	16
Figure 2-2 Localisation des ouvertures dans le môle et cote des ouvertures pour le scénario 7. ....	17
Figure 2-3 Plan masse de l'écluse sur lequel est basé le scénario 8.....	17
Figure 2-4 Localisation de l'ouvrage pour le scénario 9. ....	18
Figure 2-5 Localisation de l'ouvrage pour le scénario 10. ....	19
Figure 2-6 Scénario 10, seuil inclinable : coupe transversale de l'ouvrage et de la bathymétrie dans l'axe du chenal. ....	19
Figure 2-7 Scénario 10, seuil inclinable : coupe de l'ouvrage et de la bathymétrie dans l'axe de l'ouvrage. ....	19
Figure 3-1 Comparaison des hauteurs d'eau et des courants, prédits et mesurés (cf. phase 1). ....	21
Figure 3-2 Comparaison des hauteurs significatives des vagues, prédites et mesurées (cf. phase 1). ....	21
Figure 3-3 Maillage et bathymétrie du modèle pour les différents scénarios : zoom sur la zone d'étude. ....	23
Figure 4-1 Zones considérées pour les bilans sédimentaires (identiques à celles définies dans les analyses morpho-sédimentaires de la phase 1). ....	25
Figure 4-2 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation : Scénario 1 versus Scénario 0 .....	26
Figure 4-3 Dépôts de vase en 1 an : Scénarios 1 versus scénario 0 (dépôts suivant ancien arrêté préfectoral).....	27
Figure 4-4 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation : Scénarios 1, 2, 4 et 5. ....	28
Figure 4-5 Dépôts de vase en 1 an : Scénarios 1, 2, 4 et 5.....	30
Figure 4-6 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse obtenues à l'issue d'un an de simulation : Scénario 6 versus Scénario 1 .....	31
Figure 4-7 Bathymétrie modélisée de la zone d'étude à différents instants au cours de la simulation. ....	32
Figure 4-8 Dépôts de vase en 1 an : Scénario 6 versus simulation de phase 1 (dépôts suivant ancien arrêté préfectoral).....	33



---

Figure 4-9 Concentration dépassée en moyenne une heure par jour pour la simulation de phase 1 et le scénario 6 sur différentes durées. ....	34
Figure 4-10 Temps de dépassement du seuil de 10mg/l pour le scénario 6. ....	35
Figure 4-11 Comparaison des flux résiduels de sable (en m3/m) au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 01/01/2018 à 05:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes) et du 07/01/2018 à 22:13 UT0 (marée moyenne, conditions de vagues énergétiques) pour différentes configurations d'aménagement : Scénario 3 versus Scénario 2 .....	38
Figure 4-12 Amorce de création de flèche sableuse simulée au cours de l'évènement énergétique du 07/01/2018 (scénario 3). ....	39
Figure 4-13 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse obtenues à l'issue d'un an de simulation : Scénario 3 versus Scénario 2 .....	39
Figure 4-14 Levé topo-bathymétrique (CCI) de novembre 2005.....	39
Figure 4-15 Intégration des flux sableux (entrant, sortant, ou total) au travers d'une section entre le musoir du môle et le phare de la Pointe-à-l'Aigle : comparaison des scénarios 2 et 3 (avec ou sans flèche sableuse dans le prolongement de la digue de l'avant-port). ....	40
Figure 4-16 Comparaison des bathymétries extraites le 27/10/2018 à 23h des simulations morphodynamiques relatives aux scénarios 2 (à gauche) et 3 (à droite). ....	40
Figure 4-17 Dépôts de vase en 1 an : Scénarios 3 versus scénario 2.....	41
Figure 4-18 Comparaison des flux résiduels de sable au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 01/01/2018 à 05:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes) pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 7 .....	42
Figure 4-19 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 7 .....	42
Figure 4-20 Dépôts de vase en 1 an : Scénario 7 versus simulation B de la phase 1. ....	43
Figure 4-21 Hauteur significative des vagues maximale pendant le cycle de marée du 04/02/2018 autour de la pleine mer de 08:00 : Scénario 7 versus simulation B de la phase 1.....	43
Figure 4-22 Comparaison des flux résiduels de sable au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 01/01/2018 à 05:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes) pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 8 .....	44
Figure 4-23 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 8 .....	44
Figure 4-24 Dépôts de vase en 1 an : Scénario 8 versus simulation B de la phase 1. ....	45
Figure 4-25 Comparaison des flux résiduels de sable au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 01/01/2018 à 05 :00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes) pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 9 .....	46

---

Figure 4-26 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 9 ..... 46

Figure 4-27 Dépôts de vase en 1 an : Scénario 9 versus simulation B de la phase 1. .... 47

Figure 4-28 Sorties TELEMAC de niveaux d'eau et de courants du 1<sup>er</sup> au 5 janvier 2018 au nœud 15 406, situé environ 20 m devant le seuil dans l'axe du chenal. La période d'intérêt pour les analyses relatives aux flux sableux pour le scénario 10 est encadrée en rouge et correspond au flot de la première marée de vive-eau du 2 janvier (pic de courant à 1.5 m/s). .... 49

Figure 4-29 (a) Configuration SWASH 2DV, (b) exemple de condition initiale de concentration en suspension de sable (175 µm) devant le seuil pour un courant de 1.5 m/s et une tranche d'eau d'environ 50 cm au-dessus de l'arase de l'ouvrage, et (c) détail des profils théoriques associés de courant, concentration en suspension, et flux (formalisme de Wu et Lin, 2014)..... 50

Figure 4-30 Concentrations en suspension de sable (en g/l) obtenues avec SWASH après 5 secondes de simulation pour un sable de 175 µm et pour les différentes combinaisons de niveaux d'eau et de courants (cf. Tableau 4-14). .... 52

Figure 4-31 Comparaison des flux en suspension avec (en rouge) ou sans la présence du seuil inclinable (en bleu ; d'après Wu et Lin, 2014), pour un sable de 175 µm, un courant de 1.5 m/s, et une tranche d'eau de 55 cm au-dessus de l'arase de l'ouvrage. Les valeurs indiquées en kg/m/s correspondent à l'intégration des flux en kg/m<sup>2</sup>/s sur les épaisseurs de tranche d'eau contraintes ou non par la présence du seuil. .... 52

Figure 4-32 Synthèse des flux en suspension obtenus au-dessus du seuil inclinable (qs SI) avec le modèle SWASH pour un sable de 125 µm et pour les différentes combinaisons de niveaux d'eau et de courants (cf. Tableau 4-14), et comparaison aux flux théoriques calculés en l'absence de seuil à partir du formalisme de Wu et Lin (2014) (suspension : « qs actuel » ; charriage : « qb actuel »). La figure du bas illustre le ratio  $qs\ SI / (qs + qb\ actuel)$  exprimé en pourcentage. .... 53

Figure 4-33 Synthèse des flux en suspension obtenus au-dessus du seuil inclinable (qs SI) avec le modèle SWASH pour un sable de 175 µm et pour les différentes combinaisons de niveaux d'eau et de courants (Tableau 4-14), et comparaison aux flux théoriques calculés en l'absence de seuil à partir du formalisme de Wu et Lin (2014) (suspension : « qs actuel » ; charriage : « qb actuel »). La figure du bas illustre le ratio  $qs\ SI / (qs + qb\ actuel)$  exprimé en pourcentage. .... 53

Figure 4-34 Analyse à l'échelle du flot de la marée de vive-eau du 2 janvier 2018 : comparaison des flux (en kg/m/s ou intégrés en kg/m et cumulés dans le temps) en suspension obtenus au-dessus du seuil inclinable (qs SI) avec le modèle SWASH pour un sable de 125 µm, avec les flux théoriques calculés en l'absence de seuil à partir du formalisme de Wu et Lin (2014) (suspension : « qs » ; charriage : « qb »). .... 55

Figure 4-35 Analyse à l'échelle du flot de la marée de vive-eau du 2 janvier 2018 : comparaison des flux (en kg/m/s ou intégrés en kg/m et cumulés dans le temps) en suspension obtenus au-dessus du seuil inclinable (qs SI) avec le modèle SWASH pour un sable de 175 µm, avec les flux théoriques calculés en l'absence de seuil à partir du formalisme de Wu et Lin (2014) (suspension : « qs » ; charriage : « qb »). .... 56

Figure 4-36 Bathymétrie à proximité du seuil inclinable dans le modèle au bout de 4 jours de simulation pour 3 propositions d'ouverture et de fermeture du seuil..... 57

Figure 4-37 Dépôts de vase en 1 mois : Scénario10 versus simulation A de la phase 1. .... 58

## Table des tableaux

Tableau 2-1 Description des scénarios étudiés en phase 3 .....	13
Tableau 4-1 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 1 versus Scénario 0 (zone de dragage de l'ancien arrêté préfectoral).....	26
Tableau 4-2 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénario 1 versus Scénario 0 .....	27
Tableau 4-3 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénarios 1, 2, 4 et 5 .....	29
Tableau 4-4 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénarios 1, 2, 4 et 5 .....	29
Tableau 4-5 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 6 versus Scénario 1 .....	31
Tableau 4-6 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénarios 1, 2 et 3 .....	38
Tableau 4-7 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénarios 1, 2 et 3 .....	41
Tableau 4-8 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 7 versus simulation B de la phase 1. ....	42
Tableau 4-9 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénario 7 versus simulation B de la phase 1. ....	43
Tableau 4-10 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 8 versus simulation B de la phase 1. ....	45
Tableau 4-11 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénario 8 versus simulation B de la phase 1. ....	45
Tableau 4-12 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 9 versus simulation B de la phase 1. ....	47
Tableau 4-13 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénario 9 versus simulation B de la phase 1. ....	47
Tableau 4-14 Combinaisons de niveaux d'eau/courants extraits de TELEMAC pendant le flot du 2 janvier 2018, qui seront utilisées comme conditions aux limites pour les simulations SWASH. ....	49
Tableau 4-15 Synthèse des simulations SWASH : comparaison des flux de sable (diamètres de 125 et 175 µm) intégrés à l'échelle du flot de la marée de vive-eau du 2 janvier 2018, avec ou sans la présence du seuil inclinable.....	54

## Suivi des modifications

Version	Modifications	Rédacteurs	Validation	Date
V1.0	Version initiale	Aurélie Rivier Baptiste Mengual	Benoit Waeles	28/04/2023

## 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)- Ancien arrêté préfectoral.

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...). A noter que depuis la fin de l'année 2022, les dépôts sur l'estran ont repris suivant un nouvel arrêté préfectoral définissant une nouvelle zone de dragage légèrement modifiée et une zone de dépôt significativement agrandie vers le large.

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 ;
- La phase 3 teste et évalue des propositions de solutions pour limiter les opérations de dragage de l'avant-port.

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.

En phase 3, le travail de modélisation vise à décrire le fonctionnement hydrodynamique et hydro-sédimentaire du site d'étude pour les différents scénarios de gestion des sédiments ou d'aménagement définis en réunions de concertation après les deux premières phases du projet. Les mêmes conditions océano-météorologiques sont simulées sur les différents scénarios afin d'évaluer les modifications liées aux pratiques et/ou aménagements (i.e. année 2018 représentative des conditions de hydro-sédimentaires du site).

Ce document constitue le rapport de la phase 3, il est composé des volets suivants :

- Présentation des scénarios établis en réunions de concertation (modification des pratiques de gestion des sédiments et aménagements visant à limiter le recours aux dragages) ;
- Présentation du modèle hydro-sédimentaire (rappel et compléments) et des maillages mis en place pour les scénarios d'aménagement ;
- Analyse des effets des différents scénarios (transport sédimentaire, évolutions morphologiques) ;



## 2. PRESENTATION DES SCENARIOS MODELISEES EN PHASE 3

A la suite des phases 1 et 2, 10 scénarios ont été définis en réunion de concertation afin de tester et d'évaluer différentes solutions alternatives à celles mises en place actuellement ou par le passé (Tableau 2-1).

Tableau 2-1 Description des scénarios étudiés en phase 3

	Scénario	Dragage	Dépôt
Modification des pratiques de dragage / gestion des sédiments	0	Oui	Dépôt sur l'estran selon ancien arrêté préfectoral
	1	Oui	Dépôt sur l'estran selon arrêté préfectoral de 2022
	2	Oui	Dépôt sur l'estran 75% et valorisation terrestre 25%
	3	Oui	Dépôt sur l'estran 75% et valorisation terrestre 25% avec retrait du sable de la pointe sableuse
	4	Oui	Dépôt sur l'estran 50% et valorisation terrestre 50%
	5	Oui	Clapage / Dépôt 100 % à terre
Aménagements visant à limiter le recours au dragage	6	Oui sur période courte (2mois)	Refolement hydraulique
	7	Non	Ouverture du môle
	8	Non	Mise en eau du port (Ecluse)
	9	Non	Mise en place d'un épi pour re canaliser différemment le <u>Gouët</u>
	10	Non	Seuil inclinable

Les six premiers scénarios visent à tester différentes pratiques de dragage et/ou de gestion des sédiments (e.g. différents ratios entre les pourcentages de sédiments déposés sur l'estran et ceux stockés à terre) et à évaluer les effets engendrés sur la dynamique du sable et de la vase, et les évolutions morphologiques des fonds associées. Afin d'évaluer les effets liés à la modification des zones de dépôts (de l'arrêté préfectoral de 2022 vs celles de l'ancien arrêté), un scénario 0 a été ajouté pour lequel les dragages et les dépôts sont explicitement pris en compte.

Les quatre autres scénarios (7 à 10) étudient les effets de différents types d'aménagement, visant à limiter le recours au dragage, sur la dynamique du sable et de la vase ainsi que les évolutions morphologiques des fonds associées.

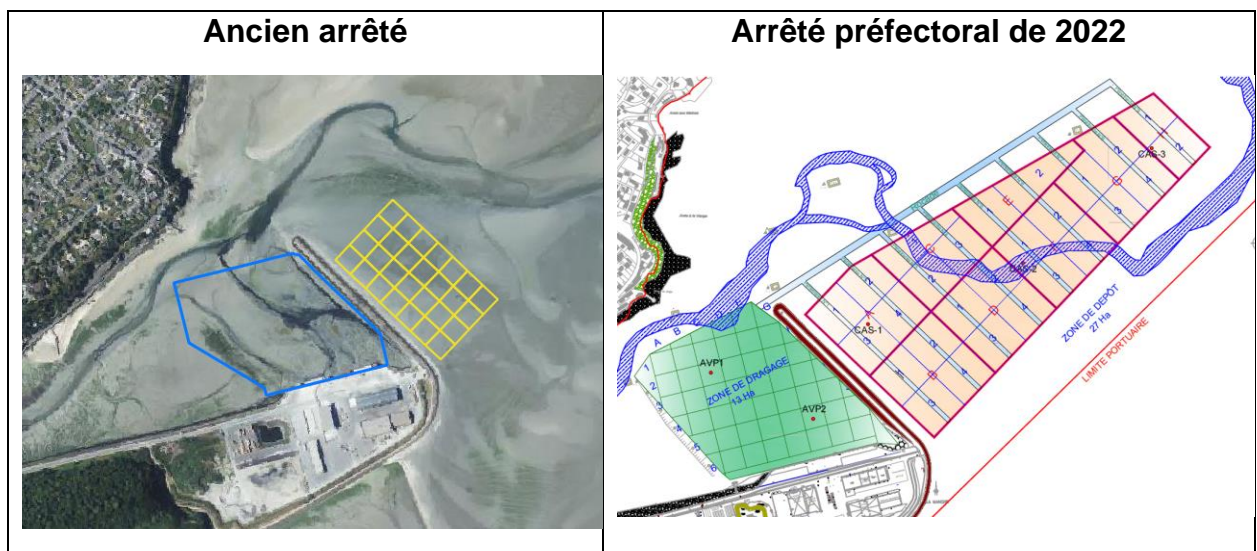
## 2.1 MODIFICATION DES PRATIQUES DE DRAGAGE ET/OU DE GESTION DES SEDIMENTS

### 2.1.1 SCENARIO 1 : DEPOT SUR L'ESTRAN SELON L'ARRETE ACTUEL (2022)

Le scénario 1 correspond à la gestion des sédiments pratiquée depuis la fin de l'année 2022 suivant le nouvel arrêté préfectoral. Les sédiments sont extraits à marée basse par pelle mécanique (Pelle + Dumper) et déposés sur l'estran dans les sous-casiers de la nouvelle zone de dépôts s'étendant sur 27 hectares.

Le calendrier des dragages et des dépôts pris en compte dans cette étude correspond à celui de l'année 2018 fourni par la CCI. L'année 2018 avait été choisie en phase 1 car elle était représentative d'une année type, tant du point de vue des conditions météo-océaniques qu'en termes de volumes dragués. 126 560 m<sup>3</sup> sont ainsi dragués au cours de l'année simulée.

Les dépôts sont effectués à terre durant les mois de juillet et août. Ainsi, suivant ce calendrier de l'année 2018, 90% des sédiments dragués sont déposés sur l'estran et 10% à terre. La localisation des dépôts dans les différents sous-casiers a été déterminée en cohérence avec le calendrier prévu pour l'année 2023, et adaptée à l'année 2018.



### 2.1.2 SCENARIO 2 ET 4 : DEPOT SUR L'ESTRAN AVEC PART VALORISEE A TERRE MODIFIEE

Les scénarios 2 et 4 sont similaires au scénario 1 concernant la technique utilisée pour la gestion des sédiments : ces derniers sont extraits à marée basse par pelle mécanique (Pelle + Dumper) et déposés sur l'estran dans les sous-casiers de la nouvelle zone de dépôt s'étendant sur 27 hectares (à raison d'un volume dragué de 126 560 m<sup>3</sup> sur l'année).

La modification concerne la part de sédiments dragués valorisée à terre :

- Dans le scénario 2, 25% des sédiments sont valorisés à terre (ce qui revient en pratique à déposer les sédiments dragués uniquement à terre de début juin à fin septembre) et 75 % sont déposés sur l'estran.
- Dans le scénario 4, 50% des sédiments sont valorisés à terre (ce qui revient en pratique à déposer les sédiments dragués uniquement à terre de début avril à fin septembre) et 50 % sont déposés sur l'estran.

L'objectif de ces scénarios est d'évaluer la sensibilité de la dynamique sédimentaire du site (flux et évolutions des fonds sur les différents secteurs d'intérêt) en fonction de la part des sédiments dragués revalorisée à terre.

#### 2.1.3 SCENARIO 3 : DEPOT SUR L'ESTRAN AVEC SUPPRESSION DE LA POINTE SABLEUSE

Le scénario 3 reprend la même gestion des sédiments dragués que le scénario 2 (extraction par pelle mécanique à marée basse de 126 500 m<sup>3</sup> de sédiment sur l'année, dont 25% de valorisation à terre) mais considère par ailleurs la suppression intégrale de la flèche sableuse localisée dans le prolongement du môle (ce qui correspond à un volume arasé de 11 500 m<sup>3</sup> en se basant sur la bathymétrie de mars 2020).

L'objectif de ce scénario est d'évaluer les effets de la suppression de la flèche sableuse sur la dynamique sédimentaire du site, et en particulier les conditions d'envasement sur le secteur du Valais.

#### 2.1.4 SCENARIO 5 : CLAPAGE OU VALORISATION 100 % TERRESTRE

Pour ce scénario 5, les sédiments sont extraits dans la zone de dragage comme pour les scénarios 1, 2 et 4 (126 500 m<sup>3</sup> sur l'année), mais ne sont pas redéposés sur l'estran. Cela correspond à une valorisation terrestre de 100% ou à un clapage en mer éloigné du site d'étude. A noter que dans le cas d'un clapage, les questions relatives aux impacts liés à la génération de panaches turbides (et à leur diffusion) sur le lieu de dépôt en mer ne sont pas traitées.

L'objectif de ce scénario est d'évaluer les effets de la suppression des dépôts sur l'estran (tout en maintenant les dragages) sur la dynamique sédimentaire du site.

#### 2.1.5 SCENARIO 6 : REFOULEMENT HYDRAULIQUE

Le scénario 6 correspond à un entretien de la zone de dragage par aspiration hydraulique à l'aide d'une drague stationnaire (ayant un débit de 500 m<sup>3</sup> de sédiment dragué par heure) et à un rejet des sédiments par conduite sur l'estran. Les travaux sont opérés essentiellement au jusant pour favoriser la dispersion des vases vers le large. Le dragage sont réalisés de la manière suivante :

- 3h30 par cycle de marée autour de la pleine mer (PM), selon 2 phasages, de PM-1h30 à PM+2h ou de PM-1h à PM+2h30 ;
- sur une marée par jour ;
- sur 70 marées consécutives par an, i.e. environ 2 mois d'opérations, soit le temps nécessaire pour atteindre la côte cible de dragage de 4.5 m CM sur l'ensemble de la zone d'entretien.

La localisation du point de refoulement (Figure 2-1) a été définie :

- à partir des cartes de courants maximaux au jusant, de telle sorte que la dispersion des vases (en suspension) vers le large soit favorisée,
- et en concertation avec la région Bretagne et la CCI22 pour ne pas gêner les activités portuaires.

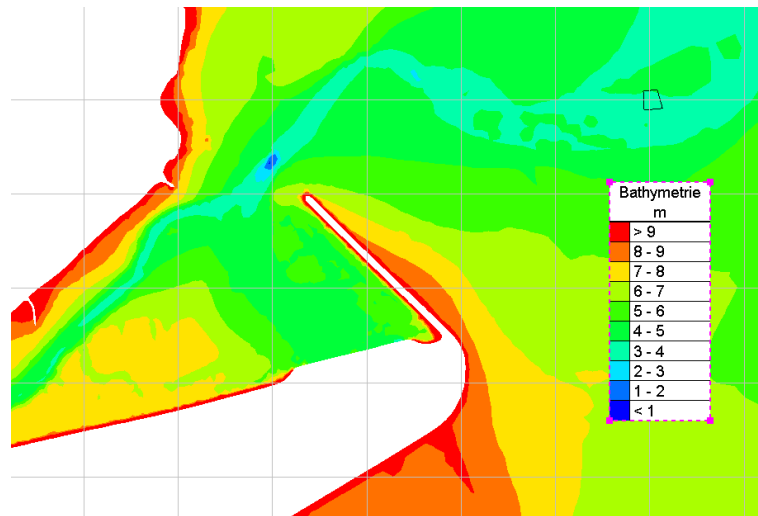


Figure 2-1 Localisation de la zone de refoulement pour le scénario 6.

## 2.2 AMENAGEMENT VISANT A LIMITER LE RECOURS AU DRAGAGE

### 2.2.1 SCENARIO 7 : OUVERTURE DU MOLE

Le scénario 7 consiste à créer 4 ouvertures dans le môle pour favoriser la chasse naturelle des sédiments de l'avant-port. Ces ouvertures présentent les caractéristiques suivantes :

- espacement tous les 50 m ;
- ouverture de 30 m de largeur au niveau de l'arase du môle ;
- pente de 3H/2V reliant le haut et la base des ouvertures ;
- la cote altimétrique de la base est variable d'une ouverture à l'autre et correspond à celle du MNT « plafond » devant le môle calculé sur la période 2005-2021 (cf. Figure 2-2). Le MNT « plafond » correspond à la cote la plus haute du terrain naturel observée sur cette période. Devant le môle, cette cote se situe entre 2.5 et 4 m au-dessus de la cote d'exploitation de l'avant-port (à 5.2 m CM). Ce choix paraît pertinent étant donné qu'abaisser davantage la base des ouvertures impliquerait de créer des sillons face au môle (volume de matériaux à évacuer conséquent), puis de les entretenir par dragage.
- A leur base, les ouvertures ont une largeur comprise entre 10 et 15 m (compte tenu des hypothèses évoquées précédemment).

Le volume de matériaux à déblayer sur l'ensemble des ouvertures du môle est estimé à environ 6660 m<sup>3</sup>.

L'objectif de ces ouvertures est d'augmenter l'hydrodynamisme dans l'avant-port, et in fine d'y limiter la sédimentation. Il s'agit de plus de distribuer le remplissage de l'avant-port, qui pourra se faire en partie par les ouvertures (qui laissent passer l'eau sans qu'elle charrie de sédiment au passage des échancrures), pour tenter de limiter le charriage du sable depuis le chenal.



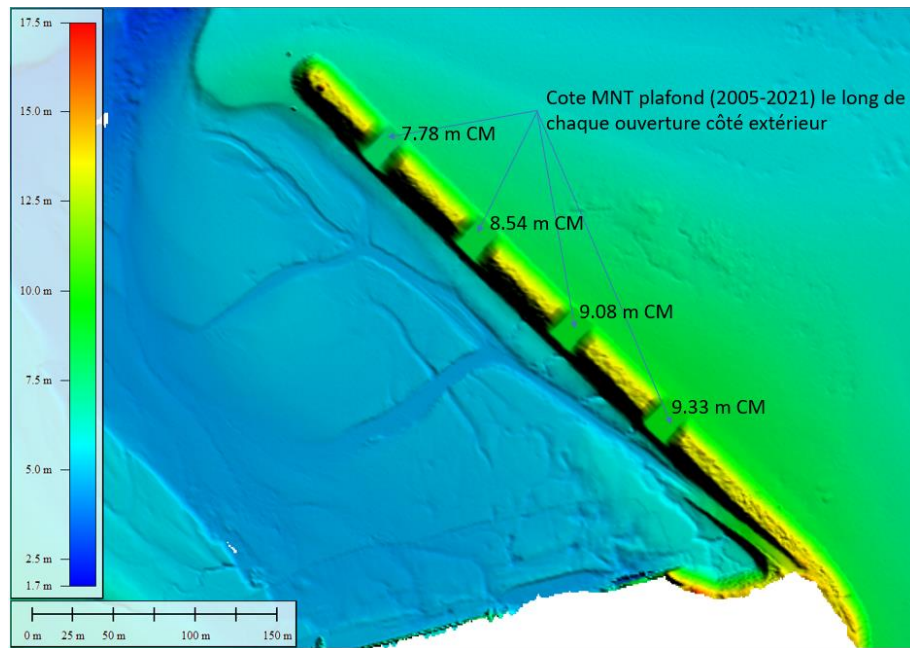


Figure 2-2 Localisation des ouvertures dans le môle et cote des ouvertures pour le scénario 7.

### 2.2.2 SCENARIO 8 : MISE EN EAU DU PORT

Le scénario 8 correspond à une mise en eau du bassin de commerce avec création d'une digue et d'un déversoir à 11.4 m CM au Nord et d'une écluse permettant l'accès des navires à marée haute. A noter que ce système de mise en eau du port était prévu dans le projet initial (cf. rapport CNEXO-COB, 1981) en même temps que la mise en place du terre-plein. Le plan utilisé pour l'écluse correspond au plan masse d'un projet de mise à flot plus récent, datant de 2006 (Figure 2-3).

Dans le cadre de la modélisation, l'écluse est ouverte lorsque le niveau d'eau est supérieur à la cote 11.4m CM.

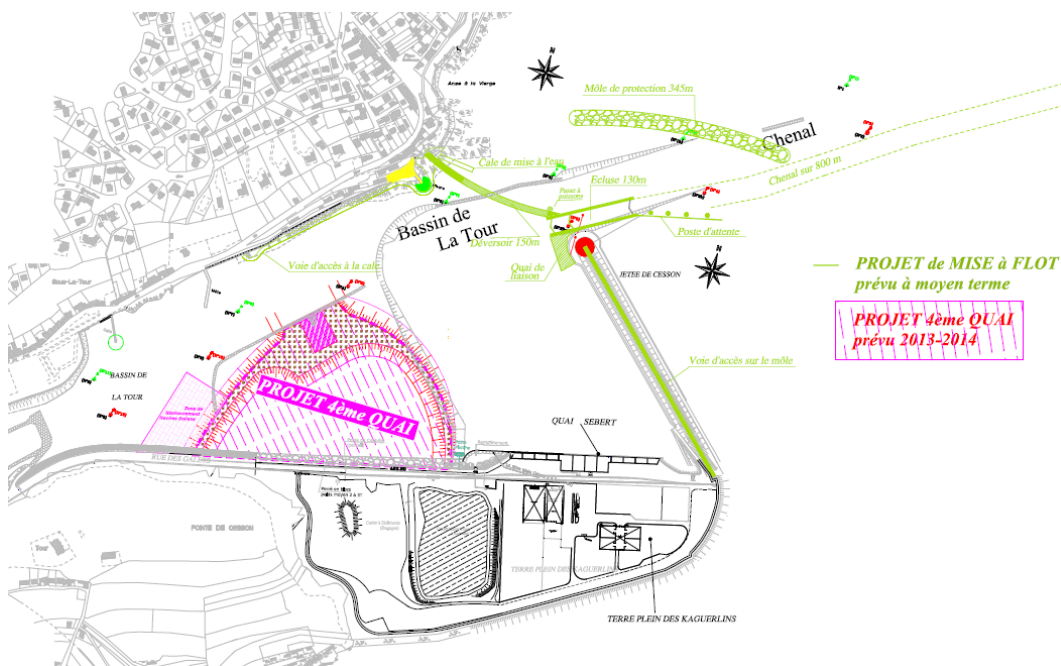


Figure 2-3 Plan masse de l'écluse sur lequel est basé le scénario 8

### 2.2.3 SCENARIO 9 : MISE EN PLACE D'UN EPI POUR RECANALISER DIFFEREMMENT LE GOUËT

Le scénario 9 concerne la construction d'un ouvrage permettant de retrouver le tracé du chenal du Gouët avant qu'il ne soit déplacé vers le Nord tel que constaté actuellement. Cet ouvrage a pour objectif de linéariser le flux du Gouët au Jusant pour limiter l'envasement et favoriser la chasse naturelle des sédiments. Par rapport aux contraintes de navigation, cet ouvrage est défini avec une cote d'arase à 5.20 m CM, soit la cote d'exploitation de l'avant-port.



Figure 2-4 Localisation de l'ouvrage pour le scénario 9.

### 2.2.4 SCENARIO 10 : MISE EN PLACE D'UN SEUIL INCLINABLE

Le scénario 10 consiste à mettre en place un ouvrage inclinable en travers du chenal dans le but de limiter les flux sableux orientés vers l'avant-port au début du flot, lorsque les courants sont les plus intenses (période courte où l'essentiel de la dynamique d'ensablement intervient). Pour cela, le seuil est ainsi levé pendant le flot. Sa cote d'arase est fixée à 5.20 m CM afin de ne pas impacter la navigabilité dans la zone (cote d'exploitation). Cet ouvrage a ainsi une hauteur de 1.95 m (dans l'axe du chenal), une épaisseur de 0.5 m et une longueur de 80 m. Dans un premier temps, il est proposé de lever le seuil à 5,20m CM de BM à PM et de le baisser à 3,25m CM de PM à BM (i.e. à la cote bathymétrique la plus profonde dans l'axe du chenal).



Figure 2-5 Localisation de l'ouvrage pour le scénario 10.

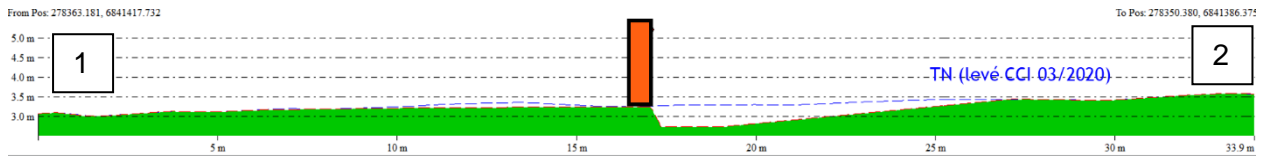


Figure 2-6 Scénario 10, seuil inclinable : coupe transversale de l'ouvrage et de la bathymétrie dans l'axe du chenal.

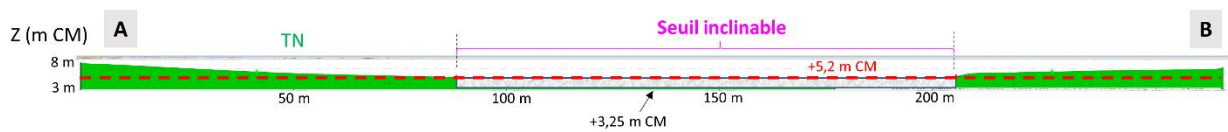
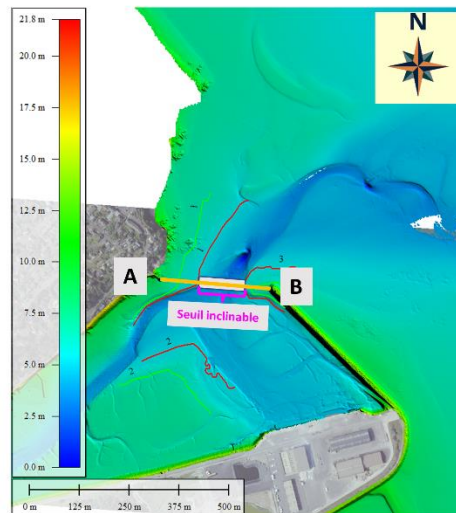


Figure 2-7 Scénario 10, seuil inclinable : coupe de l'ouvrage et de la bathymétrie dans l'axe de l'ouvrage.



---

## 3. MISE EN PLACE DES MODELISATIONS

---

### 3.1 CODES DE CALCUL ET PARAMETRISATION

Les codes de calculs, les conditions aux limites et les paramétrisations utilisées dans le cadre de cette phase 3 sont similaires à ceux utilisés en phase 1, seuls les maillages et les bathymétries associées diffèrent dans le but de représenter les configurations relatives aux différents scénarios d'aménagement. Du point de vue des forçages hydrodynamiques, les simulations se basent donc sur l'année 2018 dont la représentativité a été démontrée lors de la phase 1.

Trois modules de la chaîne TELEMAC ont été couplés :

- TELEMAC 2D, qui calcule les niveaux d'eau et les courants ;
- TOMAWAC, qui modélise les états de mer et leur propagation à partir du large vers le site d'étude ;
- SYSIPHE, qui simule la dynamique sédimentaire. Les 2 approches du code ont été utilisées afin de traiter les 2 types de sédiment en présence :
  - Le sable, qui est transporté principalement par charriage avec un déplacement de proche en proche. Pour cela, des formulations de capacité de transport, et plus particulièrement celle de Wu et Lin (2014).
  - La vase, qui est transportée à la vitesse du courant et se déplace sur de grandes distances avant de décanter dans des secteurs de faible hydrodynamisme. La vase est traitée en résolvant des équations d'advection-dispersion avec érosion et dépôt.

Au cours de la phase 1, les résultats des simulations hydrodynamiques avaient été comparés à des mesures de niveaux d'eau, courant et d'états de mer effectuées sur site (Figure 3-1 et Figure 3-2) avec des concordances très satisfaisantes. Les volumes de sables et de vases déposés dans la zone de dragage ont également été comparés à ceux dragués annuellement. Le modèle reproduit bien les conditions d'engraissement, à la fois en termes de volumes et de répartition sable/vase.

Les codes de calcul et les paramétrisations des différents modules du système de modélisation sont plus largement détaillés dans le rapport de la phase 1.



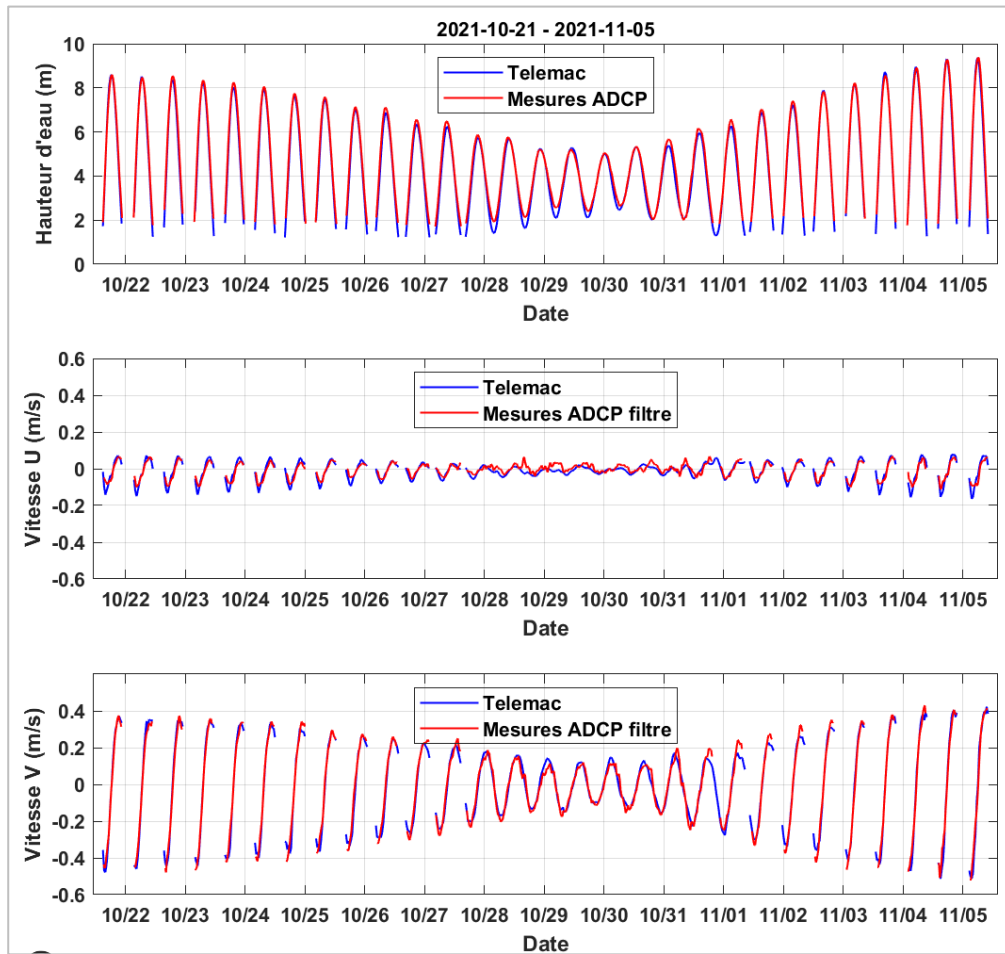


Figure 3-1 Comparaison des hauteurs d'eau et des courants, prédits et mesurés (cf. phase 1).

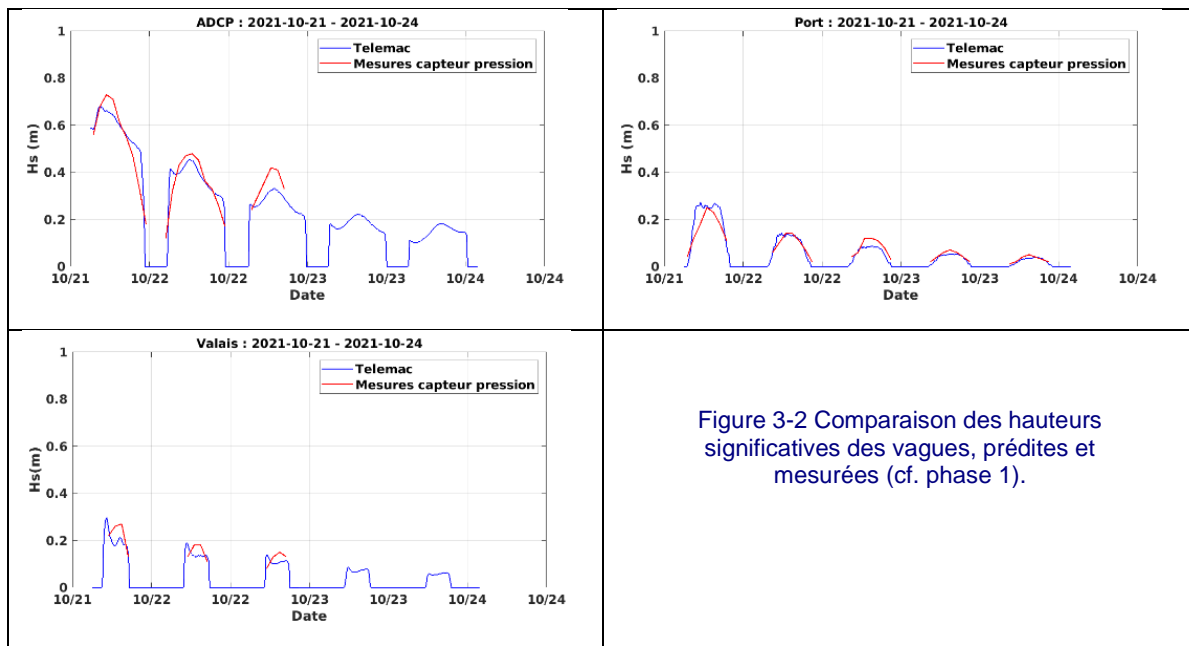


Figure 3-2 Comparaison des hauteurs significatives des vagues, prédits et mesurés (cf. phase 1).

### 3.2 MAILLAGES

L'emprise globale des maillages reste inchangée par rapport à la phase 1 : 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'étude. Le trait de côte a été ajusté au niveau des aménagements afin de tenir compte de la présence ou de l'absence des aménagements. Le choix de la résolution du maillage dans la zone d'étude est fait en fonction des zones d'intérêt, tout en veillant à optimiser le rapport entre la précision des résultats et les temps de calcul nécessaires pour réaliser des simulations longues sur une année.

Pour les scénarios 0 à 6, le maillage utilisé en phase 1 a été conservé avec une résolution du modèle pouvant atteindre quelques kilomètres au large et s'affinant au fur et à mesure que l'on s'approche de la zone d'étude pour atteindre une résolution de 20 m dans les zones correspondant actuellement à l'avant-port, à la zone de dépôt des sédiments devant le môle, ou encore au secteur du Valais. La bathymétrie est identique à celle du maillage de la simulation A de la phase 1 (bathymétrie de mars 2020) pour les scénarios 0, 1, 2, 4, 5 et 6. Pour le scénario 3, la flèche sableuse présente dans le prolongement du môle au Sud du terre-plein est arasée.

Pour les scénarios 7 à 10, les maillages ont été modifiés pour tenir compte des aménagements testés. Les maillages sont similaires au maillage de la phase 1 excepté à proximité des ouvrages où la résolution est raffinée à 5 m. Le nombre de nœuds des différents maillages sont compris entre 15 000 et 16 000. La bathymétrie prise en compte pour ces scénarios d'aménagement se base sur celle de la simulation B de la phase 1 (réalisée à partir des données suivantes : HOMONIM + RGE alti + bathymétrie CCI22 de mars 2020 + bathymétrie creusée à 4.5 m CM dans la zone de dragage de l'avant-port). La bathymétrie a ensuite été ajustée spécifiquement pour chaque scénario afin d'inclure les différents ouvrages.

A noter que pour l'ensemble des scénarios modélisés, les évolutions morphologiques des fonds sont prises en compte dans les calculs hydrodynamiques au cours des simulations (couplage morphodynamique activé).



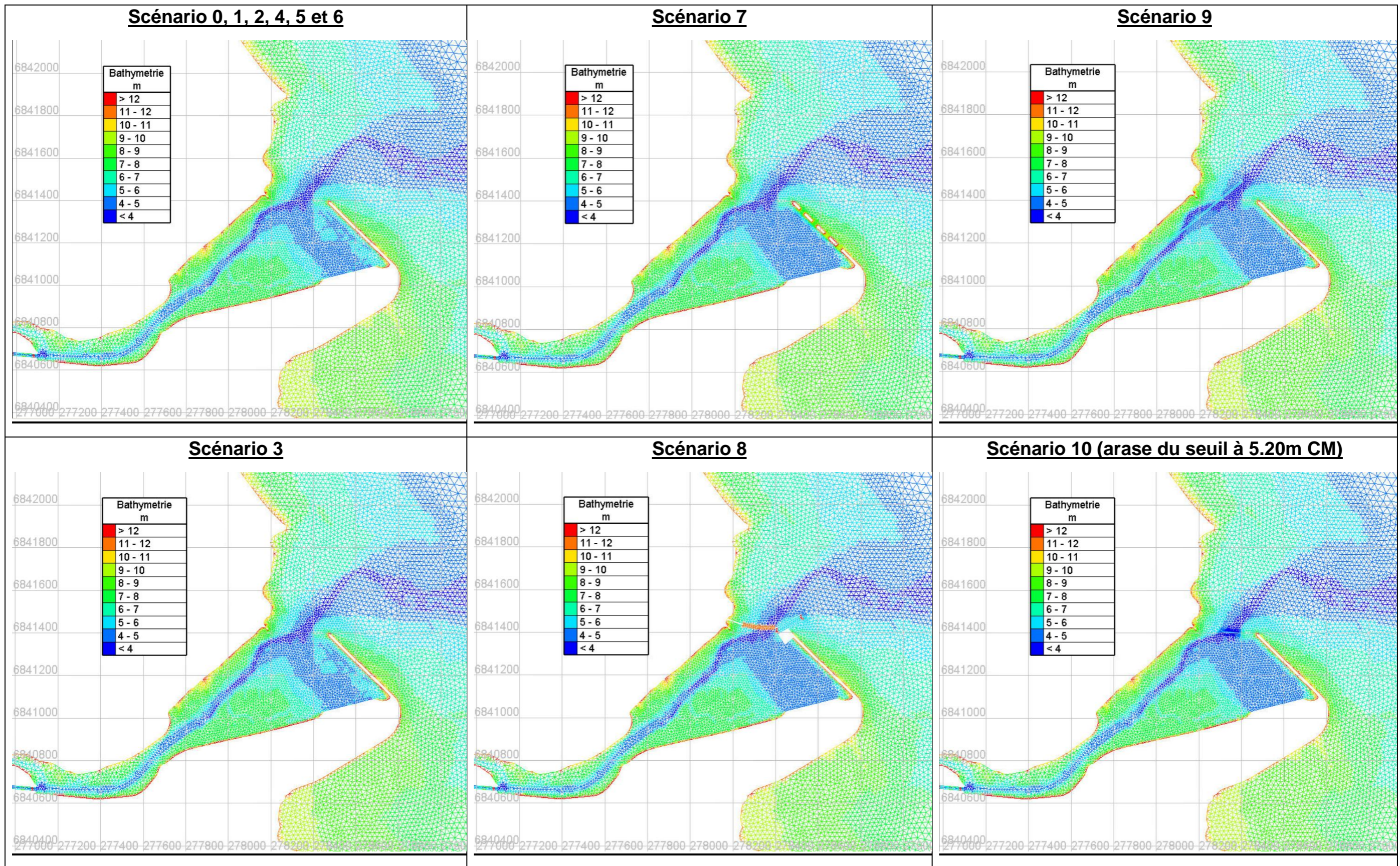


Figure 3-3 Maillage et bathymétrie du modèle pour les différents scénarios : zoom sur la zone d'étude.



### 3.3 PRISE EN COMPTE EXPLICITE DES DRAGAGES ET DES DEPOTS

Pour les simulations 0 à 6, les dragages et les dépôts de sable ont été pris en compte de manière explicite dans le modèle grâce au module Nestor du système de modélisation, couplé à Télémac (module hydrodynamique), Tomawac (module de vagues) et Sisyphe (module sédimentaire). Concernant les vases, des développements ont été réalisés dans SISYPHE en ce sens.

Le calendrier des dragages et des dépôts pris en compte dans cette étude correspond à celui de l'année 2018 fourni par la CCI. L'année 2018 avait été choisie en phase 1 car elle était représentative d'une année type, tant du point de vue des conditions météo-océaniques qu'en termes de volumes dragués. 126 560 m<sup>3</sup> sont ainsi dragués au cours de l'année simulée.

Pour le dragage, le calendrier ne spécifie pas de localisations précises concernant les zones draguées. Dans le modèle, le volume dragué au cours d'une marée est ainsi prélevé aux points de la zone de dragage où la cote du fond dépasse 4.5 m CM (cote cible de dragage).

Pour le dépôt, les sédiments sont déposés dans les casiers prévus par les arrêtés. Pour l'ancien arrêté, en l'absence d'informations précises sur leur localisation, une rotation des dépôts sur les différentes sous-zones est considérée. Pour les scénarios 1 à 4, la localisation des dépôts dans les différents sous-casiers a été déterminée en cohérence avec le calendrier prévu pour l'année 2023, et adaptée à l'année 2018.

Les volumes dragués sont déposés à terre en juillet et août pour les scénarios 0 et 1, de début juin à fin septembre pour les scénarios 2 et 3, et de début avril à fin septembre pour le scénario 4. Pour la modélisation de la dispersion des vases, il est fait l'hypothèse que 20% des sédiments dragués sont vaseux. Ce pourcentage, identique à celui considéré en phase 1, se base sur les mesures effectuées dans l'avant-port (fraction vaseuse moyenne).

## 4. RESULTATS

Les effets liés aux pratiques de dragage/dépôts et à la mise en place de différents aménagements sur les flux sédimentaires et les évolutions des fonds associées sont analysés successivement vis-à-vis de la dynamique du sable et de la vase.

L'étude des effets relatifs à chaque phase d'aménagement s'appuie sur :

- Des comparaisons de cartes de résultats du modèle (flux résiduels de sables, évolutions des fonds sur 1 an).
- Des bilans volumétriques de sable et de vase (en m<sup>3</sup>), calculés sur les zones illustrées sur la Figure 4-1 pour chaque configuration, permettant de fournir une vision plus intégrée de l'effet des pratiques de gestion et des aménagements sur la dynamique sédimentaire. On peut souligner que ces zones sont les mêmes que celles définies dans les analyses morpho-sédimentaires de la phase 1 de l'étude. Dans les tableaux présentant les bilans sédimentaires sur chaque zone, « ZD » désigne la zone de dragage de l'avant-port (~AVP1), « M » la zone devant le môle nommée « digue\_extérieur », « V » la zone du Valais nommée « Valais\_glob » et « F » le secteur de la flèche sableuse nommé « fleche\_sableuse\_Valais ».



Figure 4-1 Zones considérées pour les bilans sédimentaires (identiques à celles définies dans les analyses morpho-sédimentaires de la phase 1).

## 4.1 ANALYSE DE LA MODIFICATION DE LA STRATEGIE DE GESTION DES DRAGAGES/DEPOTS

### 4.1.1 MODIFICATION DES ZONES DE DEPOT : SCENARIO 1 VERSUS SCENARIO 0

#### 4.1.1.1 Dynamique sableuse

En modifiant la localisation des zones de dépôt des sédiments dragués (ancien et nouvel arrêts), le bilan sédimentaire annuel à l'échelle de la zone de dragage reste globalement inchangé (différence de moins de 1%). Les besoins en dragage associés à la dynamique d'ensablement de l'avant-port ne sont donc pas modifiés.

En élargissant la zone de dépôt et en diminuant ainsi les volumes déposés à proximité immédiate du môle (scénario 1), la zone localisée le long de ce dernier passe d'une tendance à l'accrétion à une tendance à l'érosion. Cette érosion est notamment liée à la reprise (par les courants et les vagues) de l'excédent sédimentaire résultant des anciennes pratiques de dépôt (ancien arrêté), particulièrement concentrées sur ce secteur. A noter que l'érosion simulée le long du môle est cohérente avec les évolutions morphologiques des fonds observées entre mars 2021 et mars 2021, pendant la période caractérisée par un arrêt total des dépôts sur l'estran (cf. rapport de phase 1). Il est possible que cette tendance à l'érosion devant le môle se poursuive jusqu'à ce que la totalité de l'excédent lié aux dépôts précédents soit érodé, puis que les fonds se stabilisent.

Dans le secteur de la flèche sableuse, la tendance à l'érosion augmente mais le changement est faible, de l'ordre de 7%.

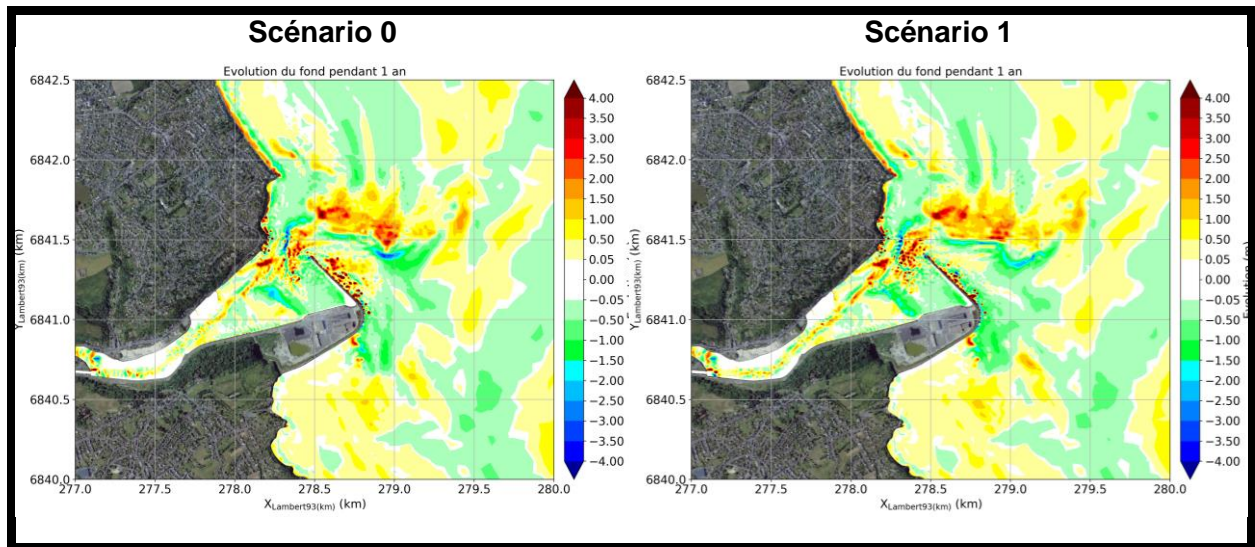


Figure 4-2 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation : Scénario 1 versus Scénario 0

Tableau 4-1 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 1 versus Scénario 0 (zone de dragage de l'ancien arrêté préfectoral)

Bilan (m3)	SC0	SC1
ZD	85 400	85 500
M	29 500	-23 00
FS	-42 300	-45 200
V	15 300	16 000

### 4.1.1.2 Dynamique des vases

Concernant les apports naturels maritimes, les modifications de dépôts entre les différents scénarios sont faibles. Les volumes déposés associés aux apports maritimes restent majoritaires par rapport à ceux liés aux dragages.

Concernant les dépôts associés aux activités de dragage, ils sont multipliés par deux dans la zone d'entretien de l'avant-port (ZD), et diminués de 23% dans le secteur du Valais. Les dépôts plus importants dans la zone de dragage pourraient s'expliquer par une surface érodable de vase plus importante avec le nouvel arrêté (i.e. vase plus facilement reprise par les courants du fait d'une répartition des sédiments dragués de l'avant-port sur une surface plus étendue).

De manière globale, les dépôts vaseux augmentent de 28% dans la zone de dragage, et évoluent peu dans le secteur du Valais (changement de l'ordre de 5%).

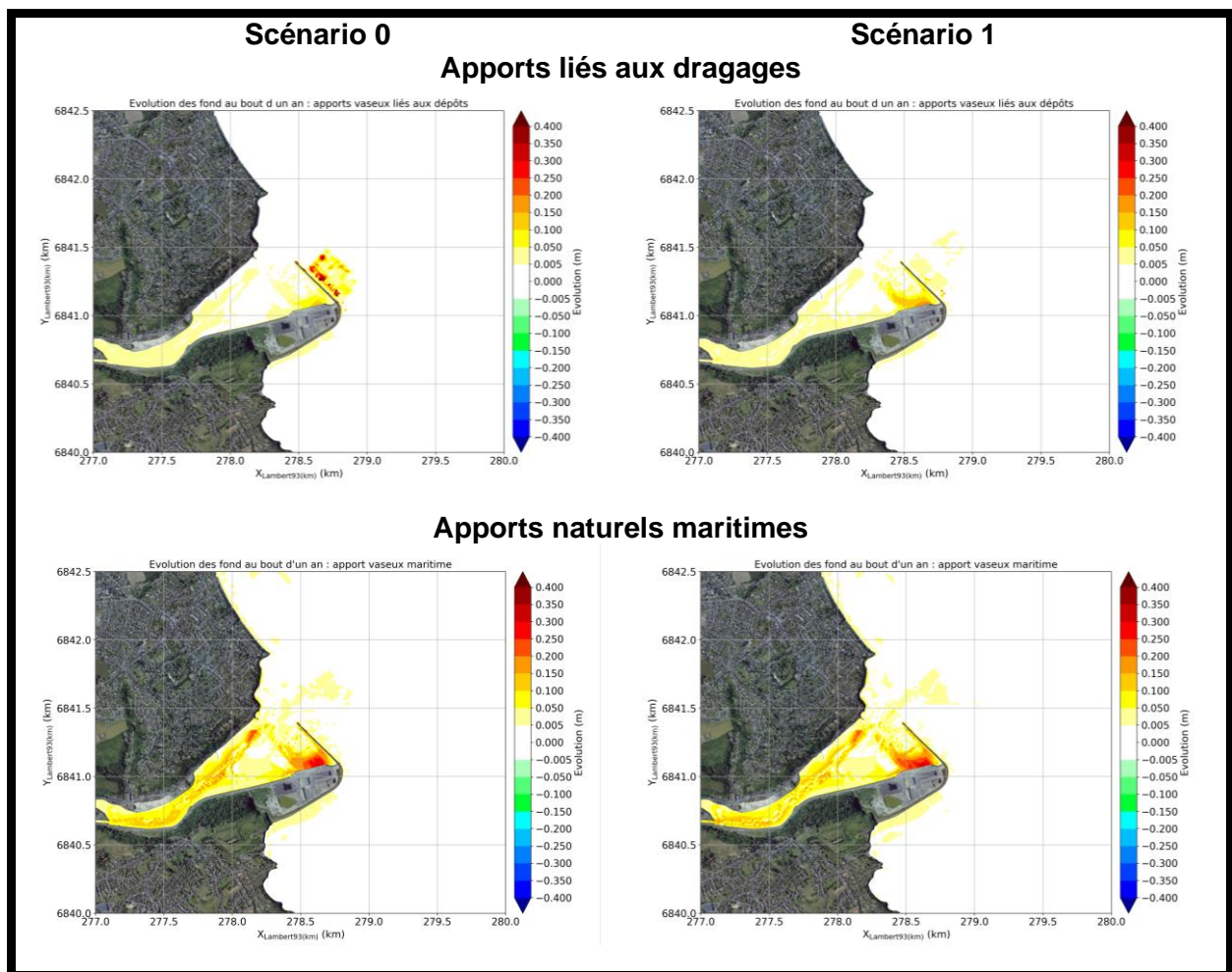


Figure 4-3 Dépôts de vase en 1 an : Scénarios 1 versus scénario 0 (dépôts suivant ancien arrêté préfectoral)

Tableau 4-2 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénario 1 versus Scénario 0

Bilan (m3)	Dragage		Maritime		Global	
	SC0	SC1	SC0	SC1	SC0	SC1
ZD	1 986	4 213	8 953	9 752	10 939	13 965
V	126	97	700	768	826	865



### 4.1.2 MODIFICATION DU POURCENTAGE DE VALORISATION A TERRE : SCENARIO 2, 4 ET 5 VERSUS SCENARIO 1

#### 4.1.2.1 Dynamique sableuse

Les scénarios 2, 4, et 5 ont pour objectif d'évaluer les modifications des tendances d'évolutions morphologiques des fonds et des bilans sédimentaires sur les différents secteurs d'intérêt engendrées par une valorisation terrestre plus importante des sédiments dragués (passage de 10% valorisés à 25%, 50% et 100%).

Dans la zone de dragage, les variations observées sur le dépôt des sables sont faibles selon les scénarios (+/- 5%). Le long du môle à l'extérieur, l'érosion est plus forte de 30%, 57 % et 67% pour les scénarios 2, 4 et 5 par rapport au scénario 1. En effet, les tendances à l'érosion devant le môle augmentent avec le pourcentage de valorisation à terre, étant donné que les quantités déposées sur ce secteur sont de moins en moins importantes. A noter que cette érosion le long du môle est également liée à la reprise (par les courants et les vagues) de l'excédent sédimentaire résultant des dépôts de dragage de l'ancien arrêté. Il est possible qu'après plusieurs années, une fois l'excédent lié aux dépôts précédents totalement érodé, que cette tendance à l'érosion ne soit plus présente.

Dans le secteur de la flèche sableuse, la tendance à l'érosion augmente mais le changement par rapport au scénario 1 est faible pour les scénarios 2 et 4, de l'ordre de 4% et 6% respectivement, et de l'ordre de 9% pour le scénario 5.

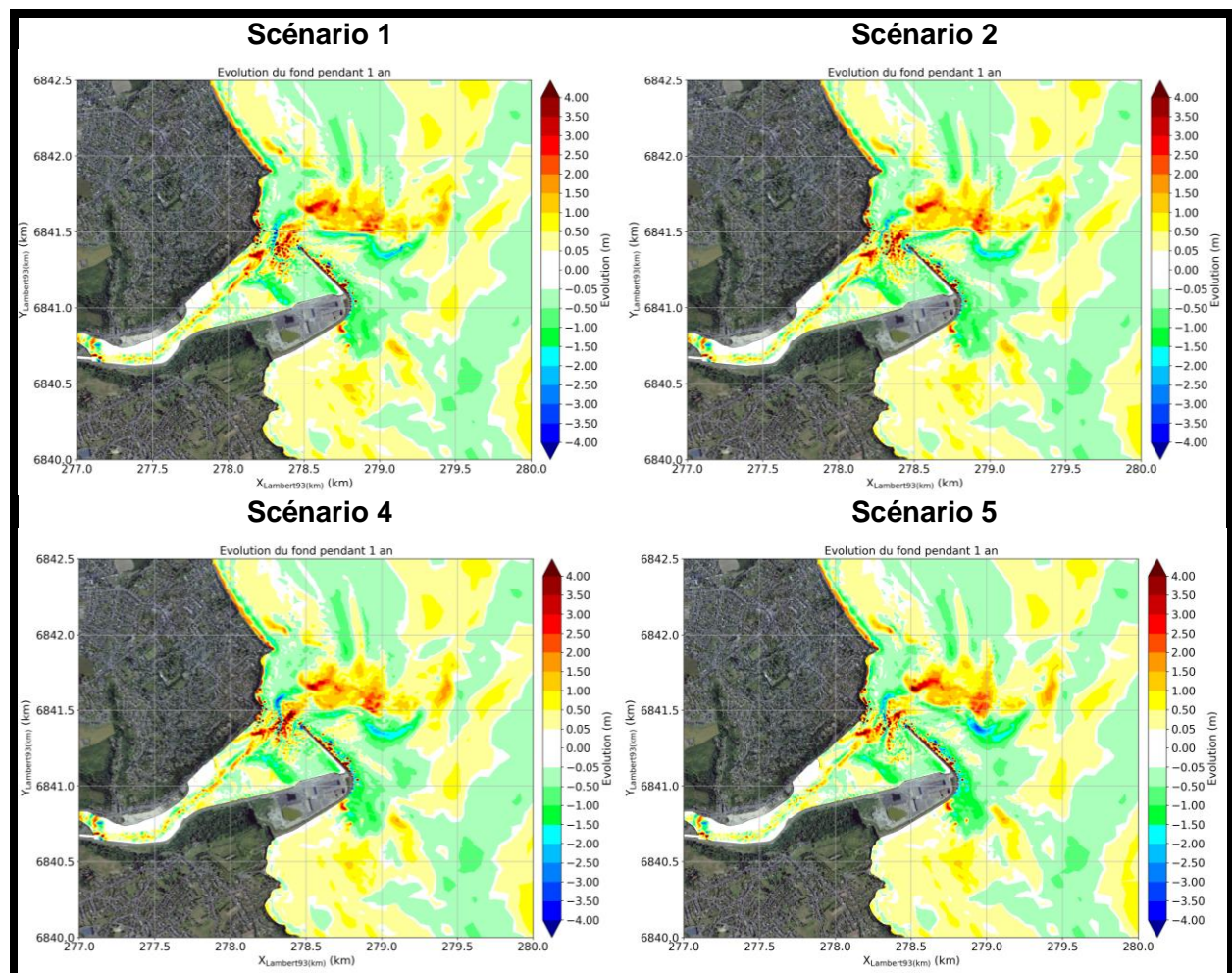


Figure 4-4 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation : Scénarios 1, 2, 4 et 5.



Tableau 4-3 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénarios 1, 2, 4 et 5

Bilan (m3)	SC1	SC2	SC4	SC5
<b>ZD</b>	84 987	91 326	82 866	78 402
<b>V</b>	15 995	15 590	15 976	15 853
<b>FS</b>	-45 248	-47 154	-48 068	-49 268
<b>M</b>	-23 025	-29 967	-36 124	-38 476

### 4.1.2.2 Dynamique des vases

Concernant les apports naturels maritimes, les modifications de dépôts entre les différents scénarios sont faibles. Les volumes déposés associés aux apports maritimes restent majoritaires par rapport à ceux liés aux dragages.

Concernant les dépôts associés aux activités de dragage dans la zone d'entretien de l'avant-port (ZD), ils sont diminués de 39%, 70% et de 100% par rapport au scénario 1 pour les scénarios 2, 4 et 5, respectivement. Sur le secteur du Valais, les dépôts sont également réduits à raison de 36%, 57% et 100% pour les scénarios 2, 4 et 5, en comparaison au scénario 1.

En raisonnant sur les bilans sédimentaires globaux (apports maritimes + dépôts de dragage), les tendances de diminution sont moins marquées : les dépôts sont diminués de 19%, 22% et de 41% par rapport au scénario 1 pour les scénarios 2, 4 et 5, respectivement, dans la zone de dragage, et de 8%, 4.5% et 13.5% sur le secteur du Valais.

Tableau 4-4 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénarios 1, 2, 4 et 5

Bilan (m3)	Dragage				Maritime				Global			
	SC1	SC2	SC4	SC5	SC1	SC2	SC4	SC5	SC1	SC2	SC4	SC5
<b>ZD</b>	4 213	2 573	1 404	0	9 752	8 789	9 372	8 208	13 965	11 362	10 776	8 208
<b>V</b>	97	62	41	0	768	735	785	748	865	796	826	748

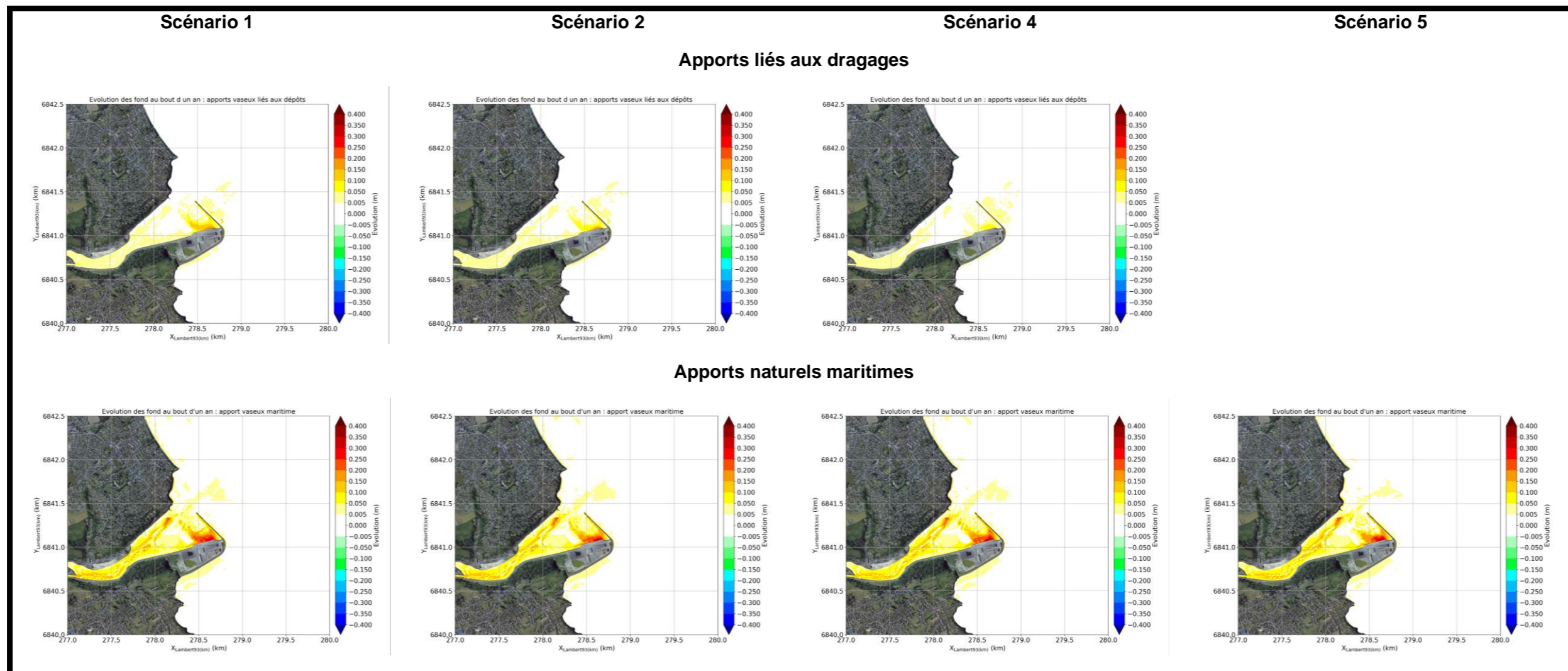


Figure 4-5 Dépôts de vase en 1 an : Scénarios 1, 2, 4 et 5

### 4.1.3 REFOULEMENT HYDRAULIQUE

#### 4.1.3.1 Dynamique sableuse

Le scénario 6 a pour objectif d'évaluer les modifications des tendances d'évolutions morphologiques des fonds et des bilans sédimentaires engendrées par une modification de la technique de dragage.

Dans la zone de dragage, au bout d'un an, les dépôts sont 27% plus importants que pour le scénario 1. Devant le môle, l'érosion est multipliée par 2 par rapport au scénario 1. Ceci peut notamment s'expliquer par l'absence de dépôts à proximité directe du môle en cas de refoulement. Dans le secteur de la flèche sableuse, la tendance à l'érosion augmente de l'ordre de 9%.

Un imposant amoncellement de sable (supérieur à 15 m de haut) se forme au point de refoulement. Les quantités de sédiments refoulés, ponctuellement et dans un temps relativement court (2 mois au lieu d'un an), ne sont pas suffisamment repris par les courants de marée et s'accumulent rapidement. Il y a donc nécessité d'un point de vue opérationnel de déplacer le point de refoulement fréquemment (plusieurs fois par semaine). A noter qu'au bout d'un an, cet amas est toujours présent.

De plus, l'avant-port se recomble rapidement et plusieurs zones dépassent la côte d'exploitation de 5,20 m CM en moins d'un an. Ceci indique que plusieurs interventions par an sont nécessaires en cas d'utilisation de cette technique.

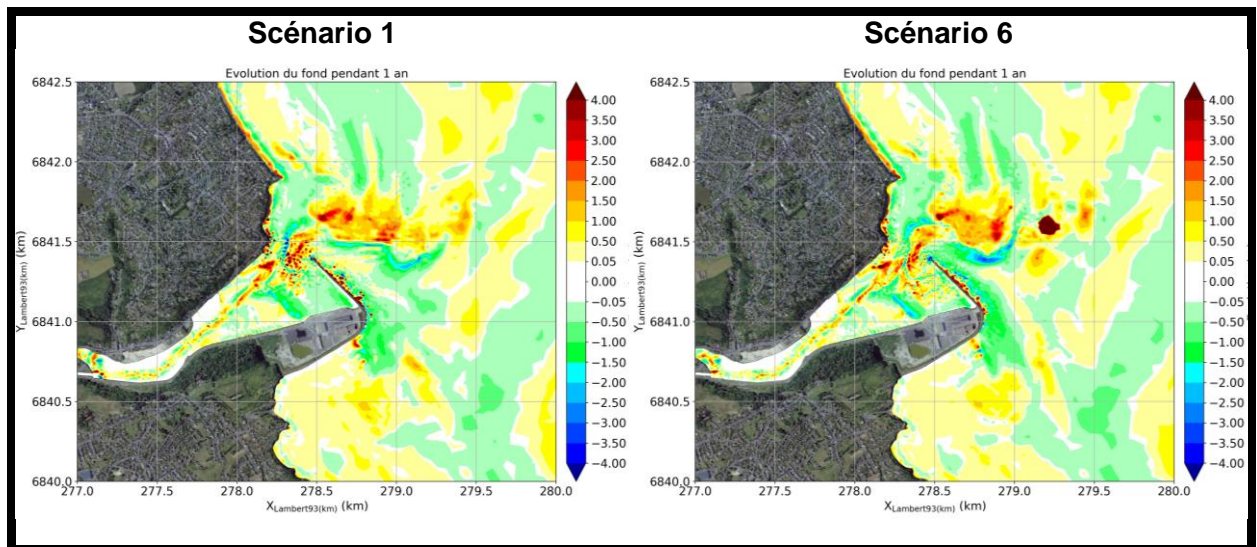


Figure 4-6 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse obtenues à l'issue d'un an de simulation : Scénario 6 versus Scénario 1

Tableau 4-5 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 6 versus Scénario 1

Bilan (m3)	SC1	SC6
ZD	84 987	108 220
V	15 995	13 046
FS	-45 248	-49 356
M	-23 025	-70 749

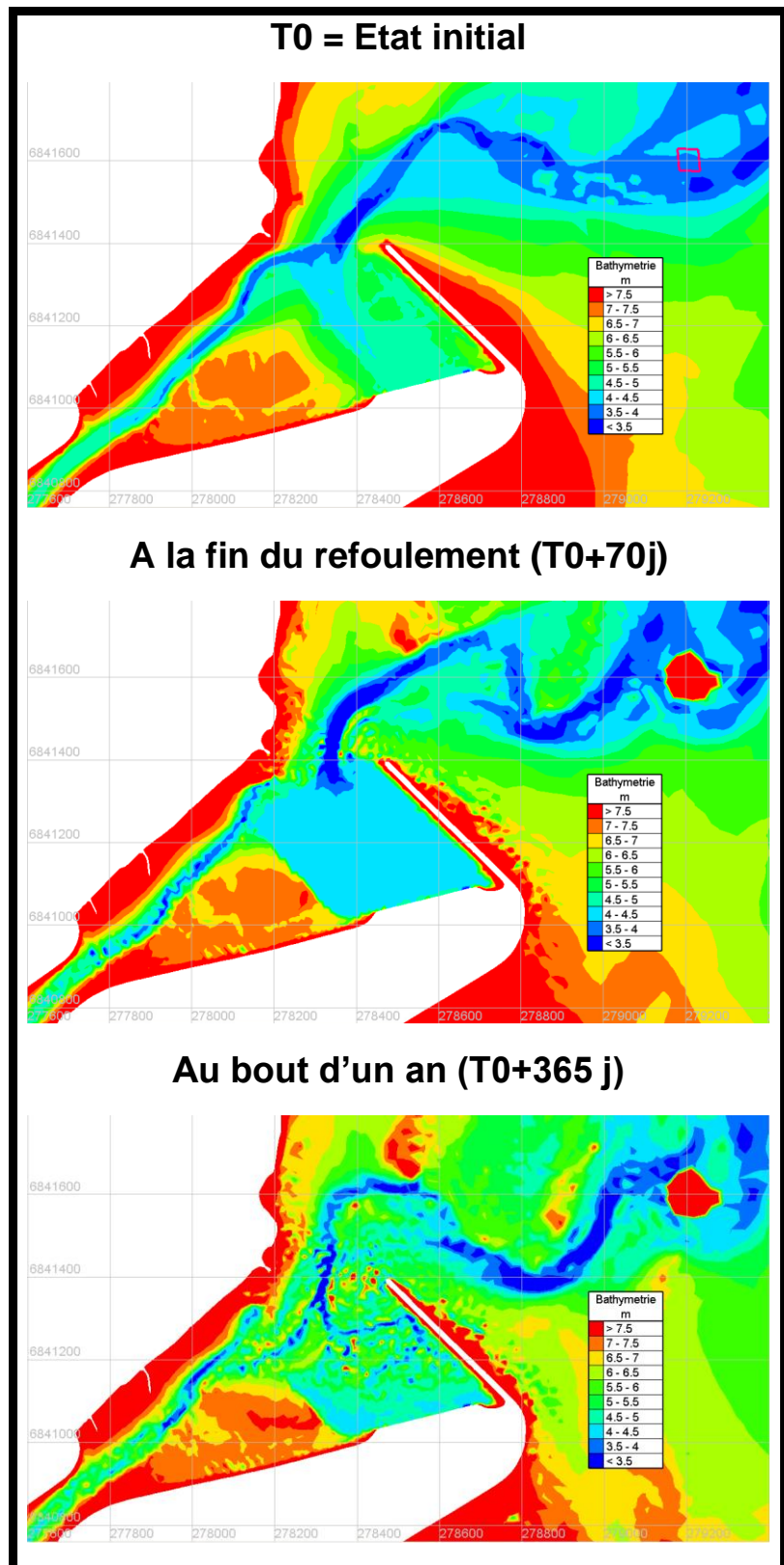


Figure 4-7 Bathymétrie modélisée de la zone d'étude à différents instants au cours de la simulation.



### 4.1.3.2 Dynamique des vases

Le sable formant un tas élevé à l'endroit du point de refoulement, il n'est pas possible d'utiliser les résultats hydrodynamiques et les états de mer issus de la simulation couplée Telemac/Tomawac/Sisyphé (dynamique sableuse) comme forçage pour la modélisation de la dynamique des vases : le point de rejet est rapidement hors de l'eau.

Afin de quantifier l'étendue du panache turbide que cette technique est susceptible de générer ainsi que les dépôts vaseux potentielles associés, la simulation pour le scénario 6 a été lancée à partir des mêmes forçages que ceux utilisés en phase 1 pour simuler la dispersion des sédiments dragués déposés sur l'estran (simulation A sans couplage morphodynamique).

Au cours du refoulement, l'orientation préférentielle du panache oscille entre le Nord et le Sud en suivant les courants de marée. Les concentrations les plus fortes sont localisées autour du point de rejet avec toutefois quelques concentrations significatives à proximité du littoral, liées à la remise en suspension de sédiments qui ont pu se déposer lorsque les conditions hydrodynamiques sont suffisamment peu énergétiques. Lorsque le rejet a lieu principalement pendant le jusant (de PM-1h à PM+2h30), le panache est plus dirigé vers le Nord. Au cours des travaux de refoulement, les niveaux de concentration de MES sont plus élevés qu'avec la technique actuelle de dragage. Cependant, rapportés à l'année, ces niveaux de concentration de MES (exprimés en valeur atteinte ou dépassée en moyenne 1h/jour) sont plus faibles dans le cas du refoulement. Mis à part à proximité immédiate du point de rejet, la concentration de 10 mg/l est dépassée moins d'une dizaine de jours par an (on rappelle qu'en hiver l'ordre de grandeur de la turbidité naturelle en baie de St-Brieuc est de 10 mg/l).

Dans la zone draguée, les dépôts associés à l'entretien de l'avant-port sont divisés par 7 par rapport à la situation actuelle ; autrement dit, le taux de retour des vases dragués dans l'avant-port est très largement diminué. Sur le secteur du valais, on note également que les vases issues du dragage ne s'y déposent plus en quantité sensible ; on rappelle toutefois que l'envasement du secteur du Valais (abrité en arrière du terre-plein) se très majoritairement par les apports naturels marins.

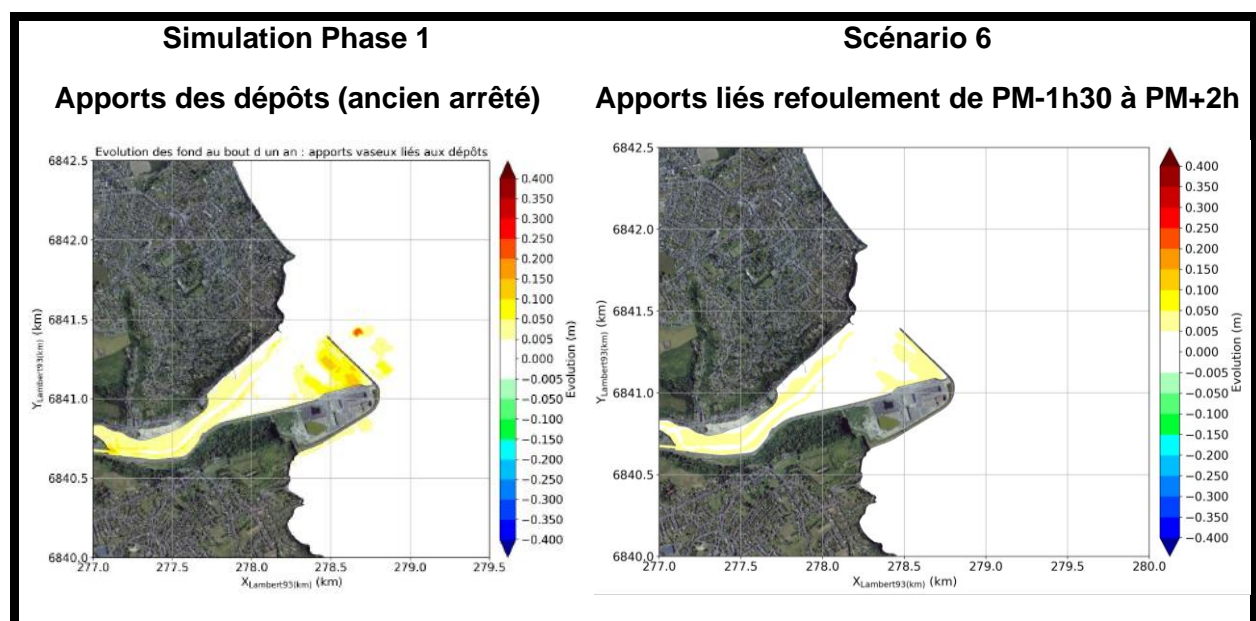


Figure 4-8 Dépôts de vase en 1 an : Scénario 6 versus simulation de phase 1 (dépôts suivant ancien arrêté préfectoral)

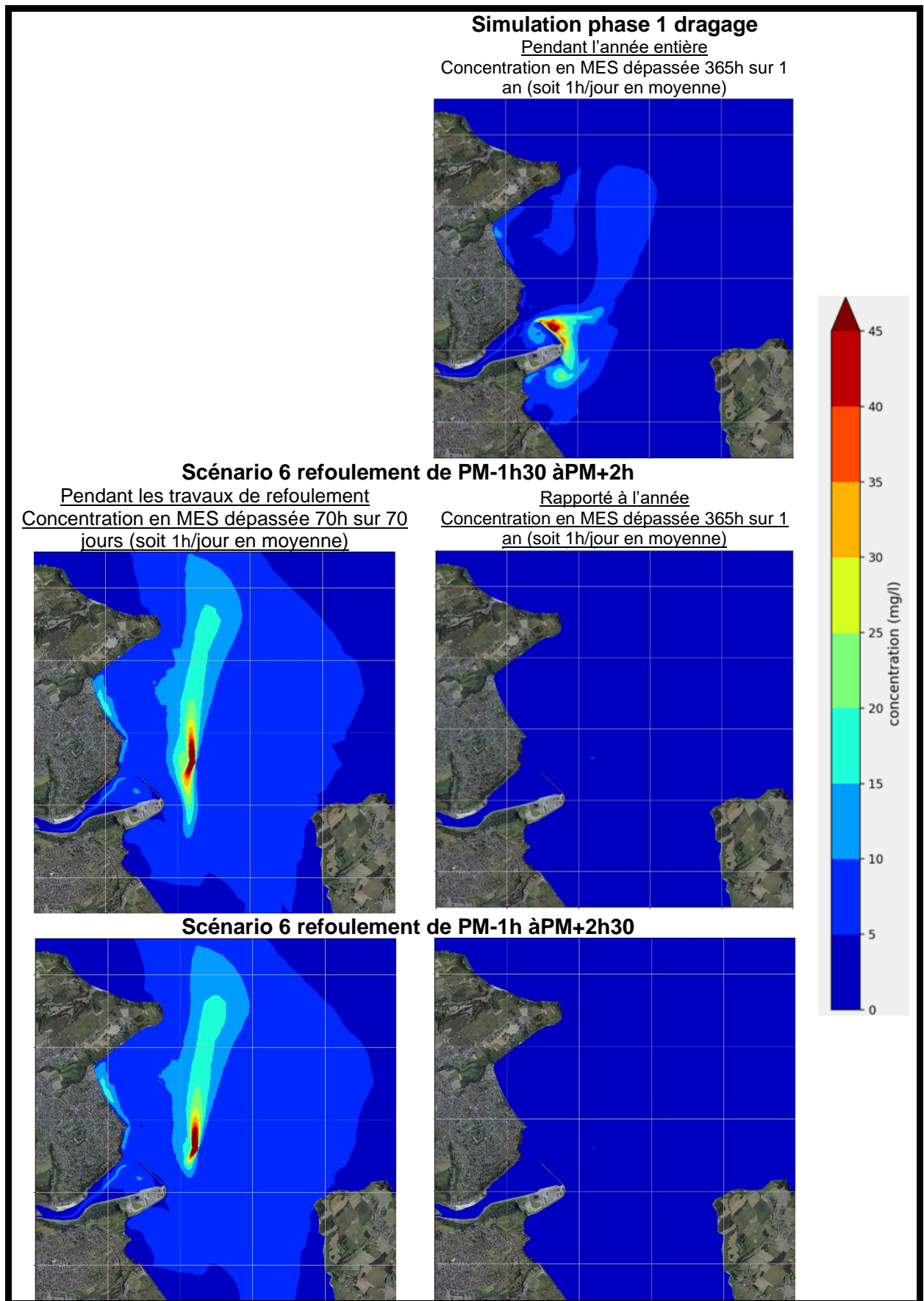


Figure 4-9 Concentration dépassée en moyenne une heure par jour pour la simulation de phase 1 et le scénario 6 sur différentes durées.

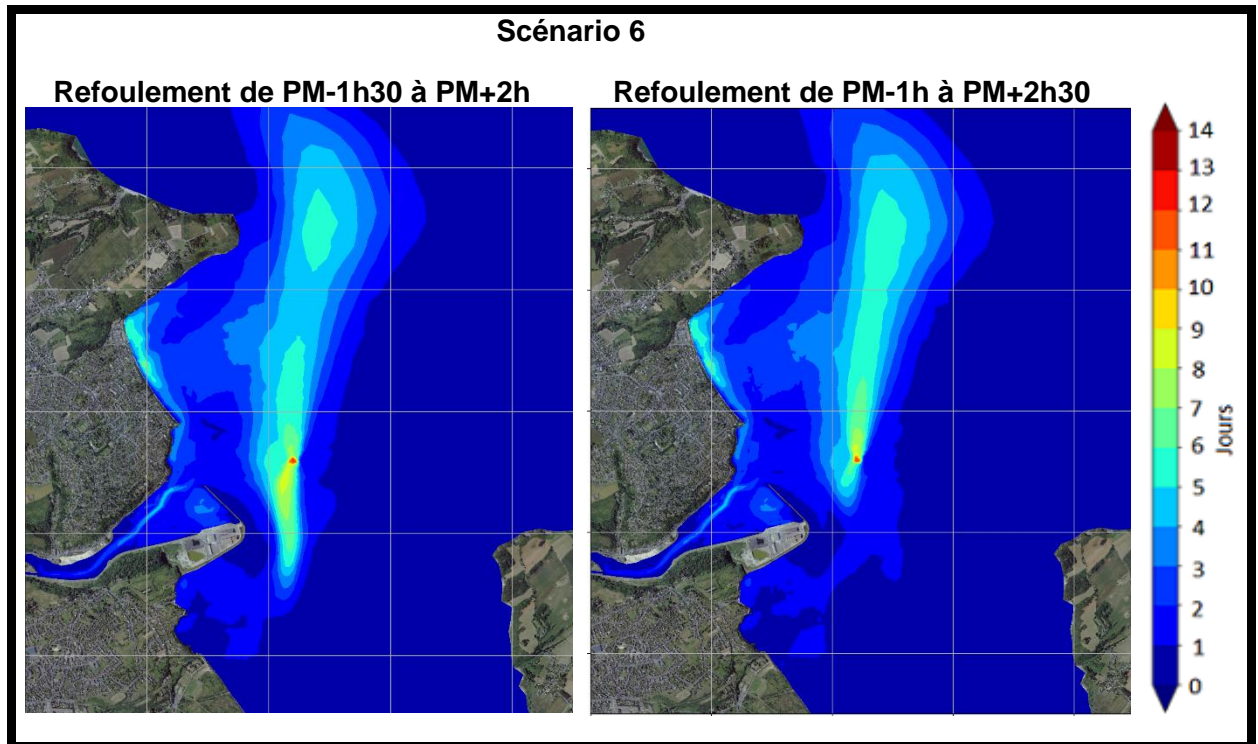


Figure 4-10 Temps de dépassement du seuil de 10mg/l pour le scénario 6.

#### 4.1.4 SYNTHÈSE

Concernant les scénarios de modification de la gestion des sédiments dragués, les principales conclusions sont les suivantes :

- En comparaison à l'ancien arrêté (scénario 0), la gestion des sédiments depuis fin 2022 (scénario 1, nouvel arrêté) conduit
  - ✓ a un effet faible sur la quantité de sable à draguer dans la zone de l'avant-port mais entraîne un taux de retour plus important des vases draguées.
  - ✓ au passage d'une tendance à l'accrétion (par accumulation des sédiments dragués déposés) à une tendance à l'érosion le long du môle, liée à la reprise (par les courants et les vagues) de l'excédent sédimentaire associé aux dépôts de dragage de l'ancien arrêté (concentrés sur ce secteur).
  - ✓ a peu d'effet sur les secteurs voisins, notamment celui du Valais.
- L'augmentation de la valorisation à terre (scénarios 2, 4 et 5) n'a pas d'effet significatif sur les quantités de sable à draguer dans l'avant-port. Ces scénarios montrent une diminution des dépôts de vases liés au dragage dans l'avant-port et sur le secteur du Valais. Cependant cette baisse reste mineure par rapport aux dépôts associés aux apports naturels maritimes, qui sont peu modifiés par les nouvelles stratégies de gestion.
- Le refoulement autour de la pleine-mer des sédiments dragués par aspiration sur une période de 70 jours a un effet bénéfique sur les taux de retour des vases (draguées dans l'avant-port) qui sont largement diminués. Le refoulement permet également que les vases draguées ne soient pas advectées vers le secteur du Valais (ceci est toutefois à relativiser, les apports naturels maritimes y étant majoritaires). Cependant, plusieurs interventions par an seraient nécessaires car l'avant-port se recomble de sable en moins d'un an. Il serait aussi nécessaire de déplacer fréquemment le point de rejet, les courants de jusant n'étant pas assez forts pour évacuer le volume important de sable déposé au point de rejet à chaque marée.



## 4.2 ANALYSE DE L'EFFET DE NOUVEAUX AMENAGEMENTS

### 4.2.1 ARASEMENT DE LA FLECHE SABLEUSE : SCENARIO 3 VERSUS SCENARIO 2

#### 4.2.1.1 Dynamique sableuse

Au début de la simulation, le transport solide résiduel sur une marée est différent dans le secteur de la flèche sableuse entre le scénario 2 et le scénario 3 :

- En présence de la flèche sableuse (Scénario 2), les flux sédimentaires résiduels décrivent une cellule de transport en faveur du flot sur la bordure extérieure de la flèche, et au contraire un transport dominé par le jusant sur son flanc orienté du côté de la plage du Valais.
- En l'absence de cette flèche sableuse (Scénario 3), le transport résiduel sur le secteur du Valais est nettement moins influencé par le jusant. Globalement le transport résiduel est orienté vers la plage entre l'ancienne localisation de la flèche et la plage.

Cependant, lors du premier évènement de vagues énergétiques de l'année simulée, le 07/01/2018, la cellule de recirculation qui alimente la flèche sableuse est visible sur les cartes de transport solide résiduel. Ceci se traduit par une évolution substantielle de la morphologie des fonds et par une amorce de création de flèche au cours de cet évènement tempétueux. Des travaux de terrassement de la langue de sable seraient à réaliser annuellement si l'on souhaitait prévenir son développement. Le volume à terrasser est difficile à évaluer étant donné qu'il est très fortement lié aux épisodes de vagues énergétiques. A partir des analyses morpho-sédimentaires réalisées en phase 1, on peut toutefois estimer que la flèche mettrait quelques années (2-3 ans) pour se recréer et que, par conséquent, le volume à terrasser serait de l'ordre de 2 000 à 5000 m<sup>3</sup> par an (compte tenu des estimations de volumes sédimentaires associés à la flèche, réalisées à partir des levés topo-bathymétriques de mars 2020 et 2021, comprises entre 10 000 et 15 000 m<sup>3</sup>).

Dans la zone draguée, les dépôts diminuent de 25% pour le scénario 3 par rapport au scénario 2. En première hypothèse, ceci pourrait s'expliquer par la divergence plus marquée de la lame d'eau très énergétique (arrivée du flot, caractérisée par de forts courants et une tranche d'eau peu épaisse) en arrivant sur la zone portuaire du fait de l'absence de flèche, et donc à un flux plus faible dirigé vers l'avant-port. La bathymétrie dans la zone en 2005, avant que la flèche ne se forme, permet d'appuyer cette hypothèse avec la présence d'un chenal secondaire orienté en direction de l'anse d'Yffiniac.

Toutefois, le calcul du transport cumulé au cours de l'année à travers une section entre le musoir du môle et le phare de Pointe-à-l'Aigle semble contredire cette hypothèse : mise à part en fin d'année, le transport solide entrant vers l'avant-port est assez similaire entre les scénarios 2 et 3. La présence ou non de la flèche sableuse semble influencer les évolutions morphologiques des fonds à l'entrée de l'avant-port, en particulier au niveau de chenal principal (cf. figures ci-dessous). En effet, le méandrement, la continuité, et la profondeur de ce dernier varient sensiblement en fonction des scénarios 2 et 3. Malgré un bilan équivalent sur les flux (entrant + sortant) lors de la 1<sup>ère</sup> marée de vive-eau d'octobre (i.e. après 9 mois simulés), les évolutions morphologiques de fonds dans le scénario 2 apparaissent contrastées au niveau du chenal à l'entrée de l'avant-port. L'effet de chasse par le jusant est probablement moins efficace du fait d'alternances plus marquées d'érosion/dépôt et d'un chenal en moyenne moins profond en comparaison au scénario 3. Cela permet d'expliquer le transport sortant plus intense obtenu dans le scénario 3 entre mi-octobre et fin décembre, et la diminution des dépôts de 25% au niveau de la zone d'entretien au terme de l'année simulée. En revanche, ces différences ne sont probablement pas significatives vis-à-vis des problématiques d'ensablement de la zone d'entretien, car :

- Les bilans sur les flux entrants sont très proches entre les 2 scénarios à la fin de l'année simulée ;
- Les différences sur les flux sortants sont probablement liées à des gradients bathymétriques importants associés des redistributions localisées de sable, dont le réalisme est discutable compte tenu de la résolution du modèle et plus généralement des limites actuelles des systèmes de modélisation morphodynamique à l'état de l'art.

Tableau 4-6 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénarios 1, 2 et 3

Bilan (m3)	SC1	SC2	SC3
ZD	84 987	91 326	82 326
V	15 995	15 590	13 023
FS	-45 248	-47 154	-42 159
M	-23 025	-29 967	-23 720

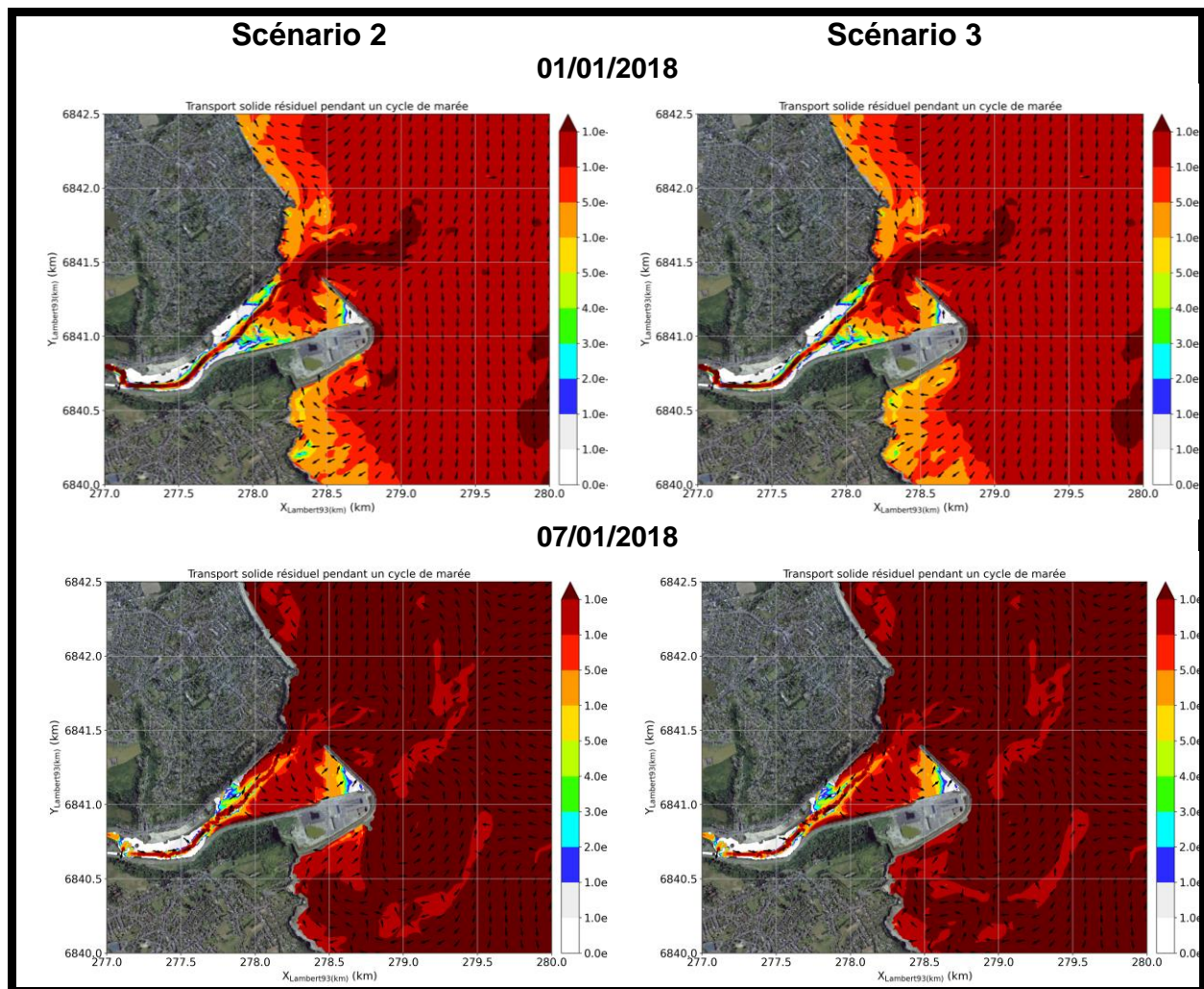


Figure 4-11 Comparaison des flux résiduels de sable (en m3/m) au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 01/01/2018 à 05:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes) et du 07/01/2018 à 22:13 UT0 (marée moyenne, conditions de vagues énergétiques) pour différentes configurations d'aménagement : Scénario 3 versus Scénario 2

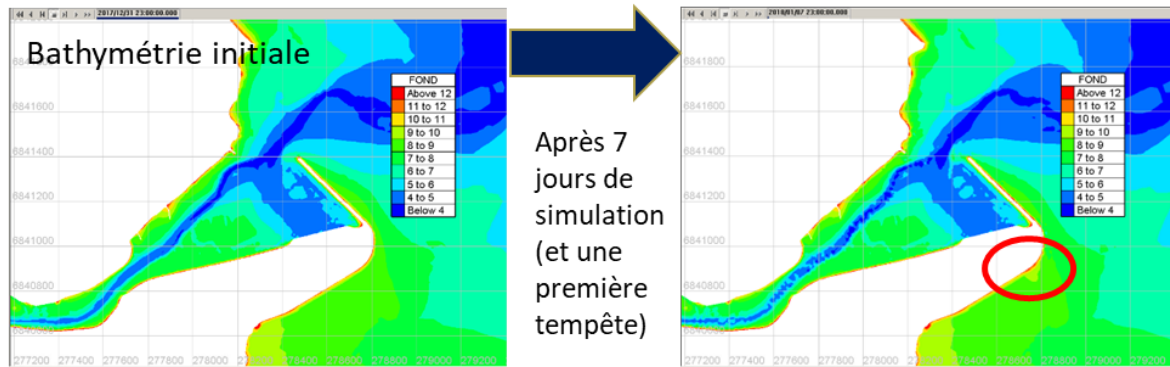


Figure 4-12 Amorce de création de flèche sableuse simulée au cours de l'évènement énergétique du 07/01/2018 (scénario 3).

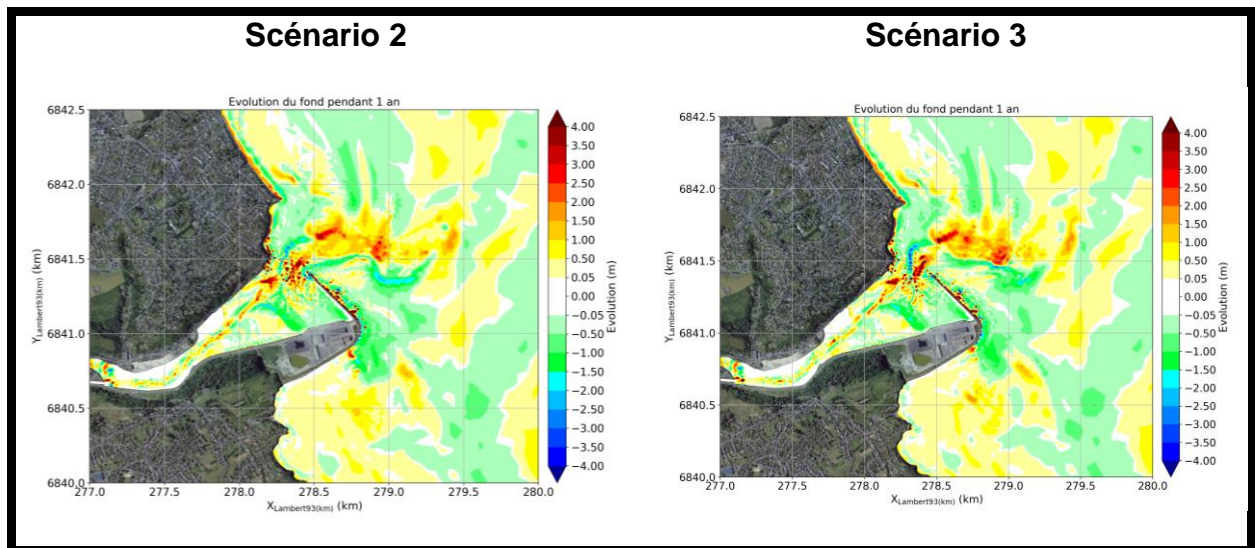


Figure 4-13 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse obtenues à l'issue d'un an de simulation : Scénario 3 versus Scénario 2

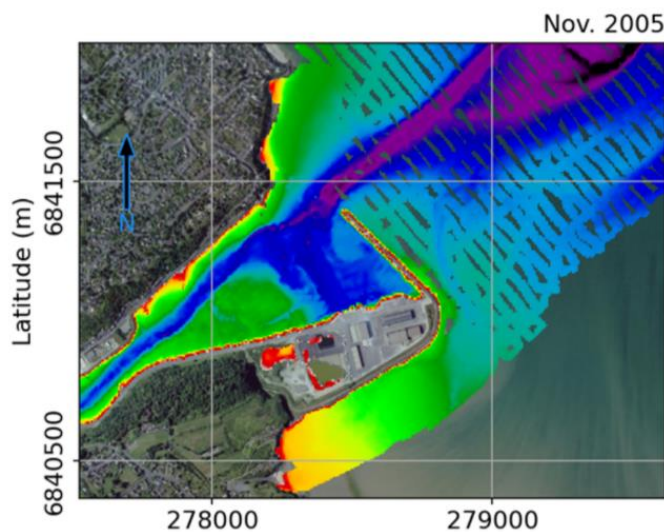


Figure 4-14 Levé topo-bathymétrique (CCI) de novembre 2005.



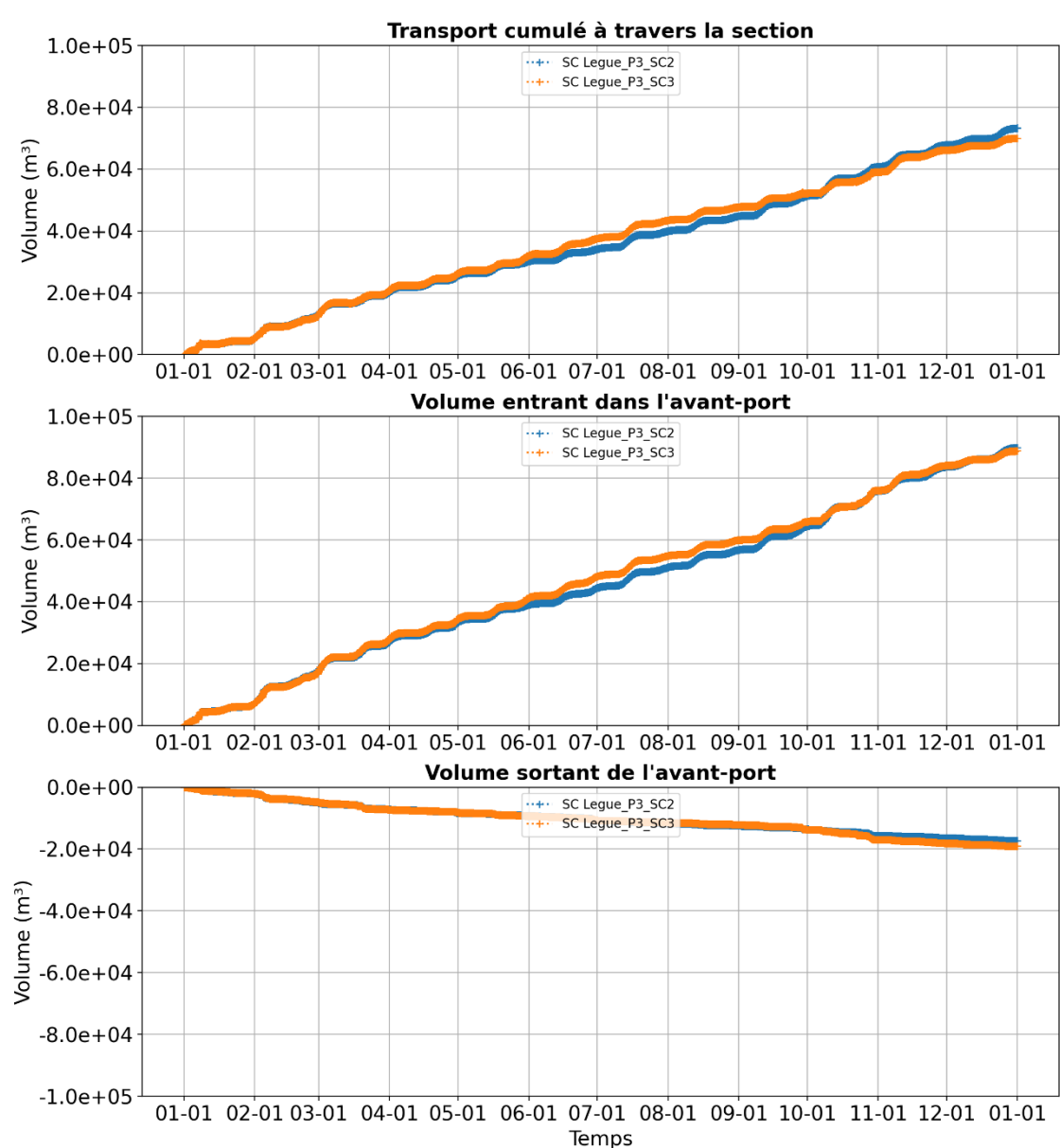


Figure 4-15 Intégration des flux sableux (entrant, sortant, ou total) au travers d'une section entre le musoir du môle et le phare de la Pointe-à-l'Aigle : comparaison des scénarios 2 et 3 (avec ou sans flèche sableuse dans le prolongement de la digue de l'avant-port).

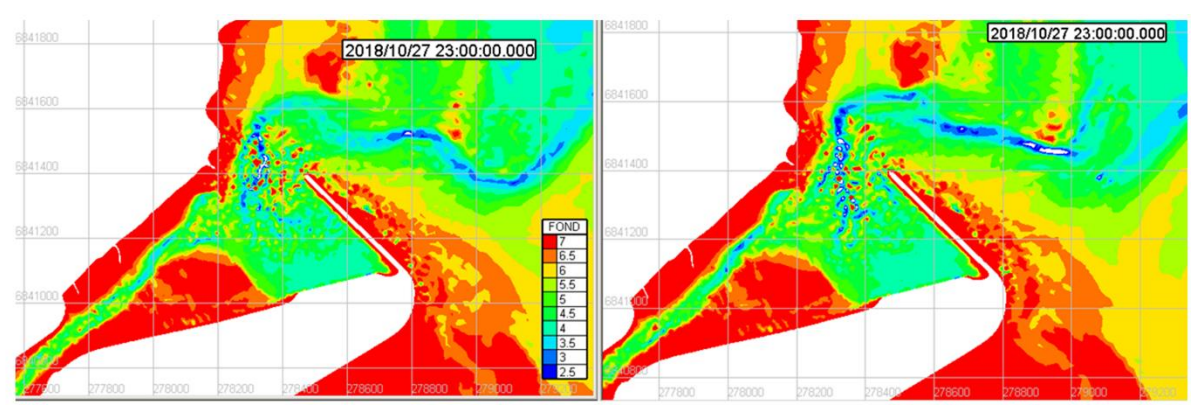


Figure 4-16 Comparaison des bathymétries extraites le 27/10/2018 à 23h des simulations morphodynamiques relatives aux scénarios 2 (à gauche) et 3 (à droite).



### 4.2.1.2 Dynamique des vases

Du point de vue de la dynamique des vases, les effets induits par l'arasement de la flèche sableuse sont les suivants (i.e. scénario 3 par rapport au scénario 2) :

- Concernant les apports maritimes, les dépôts augmentent de 13% dans la zone draguée et diminuent de 42 % dans le secteur du Valais.
- Concernant les dépôts associés aux activités de dragage, ils augmentent de 23% dans la zone draguée et diminuent de 58 % dans le secteur du Valais.
- D'une manière globale (en incluant à la fois les dépôts d'origine naturelle et ceux liés aux dragages), cela correspond à une augmentation des dépôts vaseux de 15% dans l'avant- port et à une diminution de 44% dans le secteur du Valais, les apports maritimes étant toujours majoritaires.

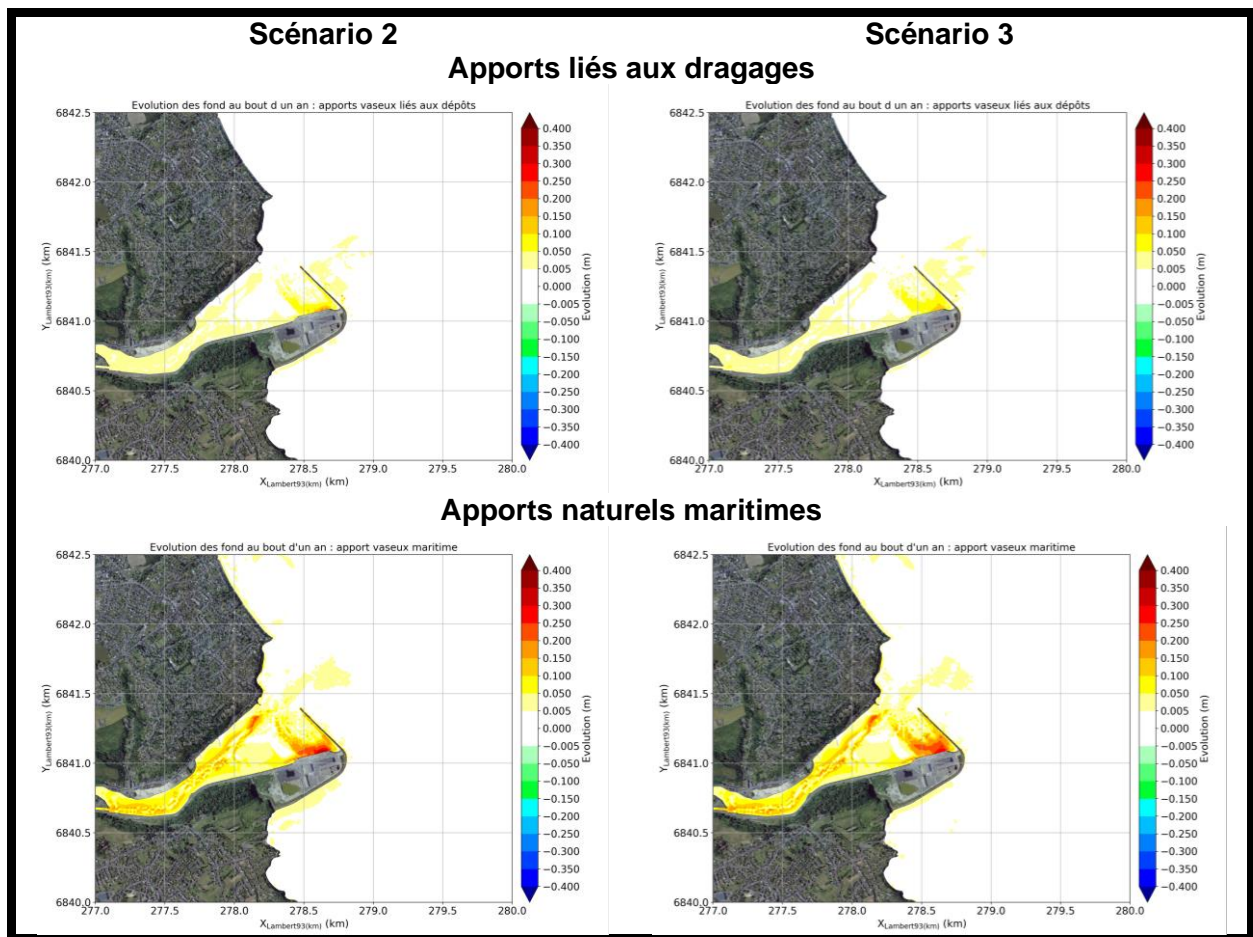


Figure 4-17 Dépôts de vase en 1 an : Scénarios 3 versus scénario 2.

Tableau 4-7 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénarios 1, 2 et 3

Bilan (m3)	Dragage			Maritime			Global		
	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3	SC1	SC2	SC3
ZD	4 213	2 573	3 176	9 752	8 789	9 889	13 965	11 362	13 065
V	97	62	26	768	735	423	865	796	449

### 4.2.2 OUVERTURE DU MOLE (SCENARIO 7)

#### 4.2.2.1 Dynamique sableuse

Les ouvertures dans le môle n'ont pas d'effet visible sur le transport résiduel pendant un cycle de marée.

Concernant les évolutions morphologiques des fonds, les dépôts sont augmentés de 10% dans la zone de dragage, l'érosion augmente de 10% le long du mole et il n'y a pas de changements significatifs dans les autres secteurs.

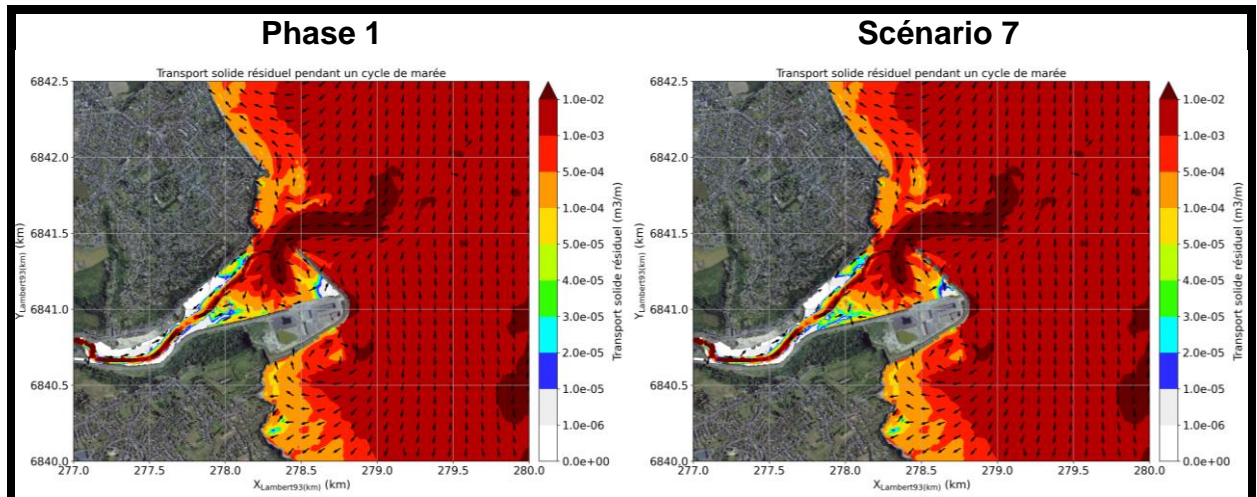


Figure 4-18 Comparaison des flux résiduels de sable au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 01/01/2018 à 05:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes) pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 7

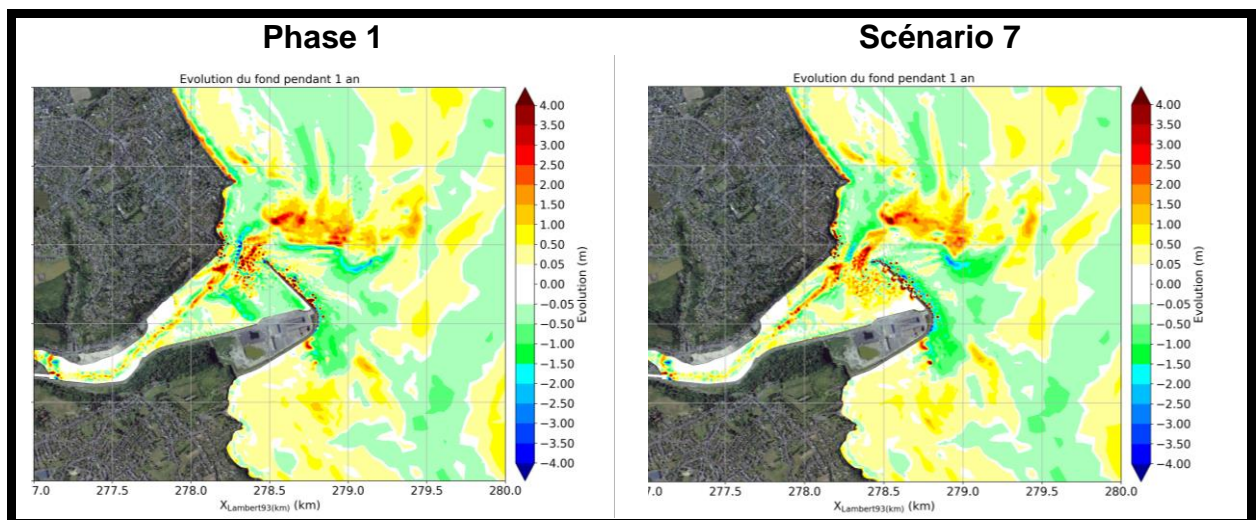


Figure 4-19 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 7

Tableau 4-8 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 7 versus simulation B de la phase 1.

Bilan (m3)	Simu B	SC7
ZD	41 483	46 041
V	16 419	16 669
FS	-50 853	-50 654
M	-37 958	-47 105



4.2.2.2 Dynamique des vases

Les modifications des dépôts de vase liés aux apports maritimes sont dans l'ensemble faibles avec une diminution de 2% dans la zone draguée et une augmentation de 6% dans le secteur du Valais.

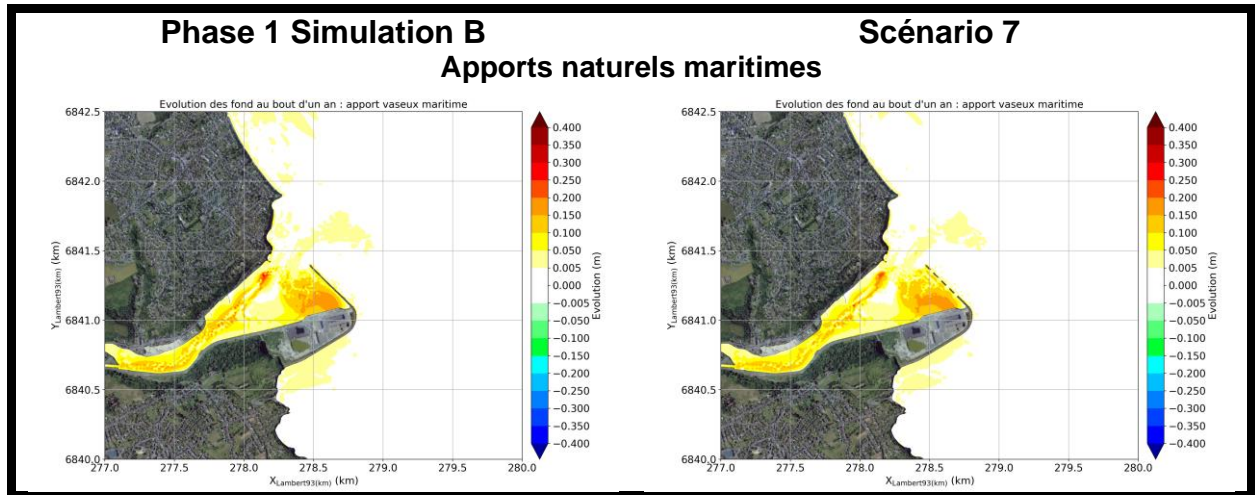


Figure 4-20 Dépôts de vase en 1 an : Scénario 7 versus simulation B de la phase 1.

Tableau 4-9 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénario 7 versus simulation B de la phase 1.

Bilan (m3)	Maritime	
	Simu B	SC7
ZD	12 326	12 069
V	882	932

4.2.2.3 Etats de mer

Les ouvertures dans le môle entraînent une augmentation de l'agitation dans l'avant-port : le môle ne permet plus d'assurer totalement sa protection contre l'agitation, ce qui dégrade les conditions d'accessibilité des navires de commerce au quai de l'avant-port et des navires empruntant le chenal vers l'amont.

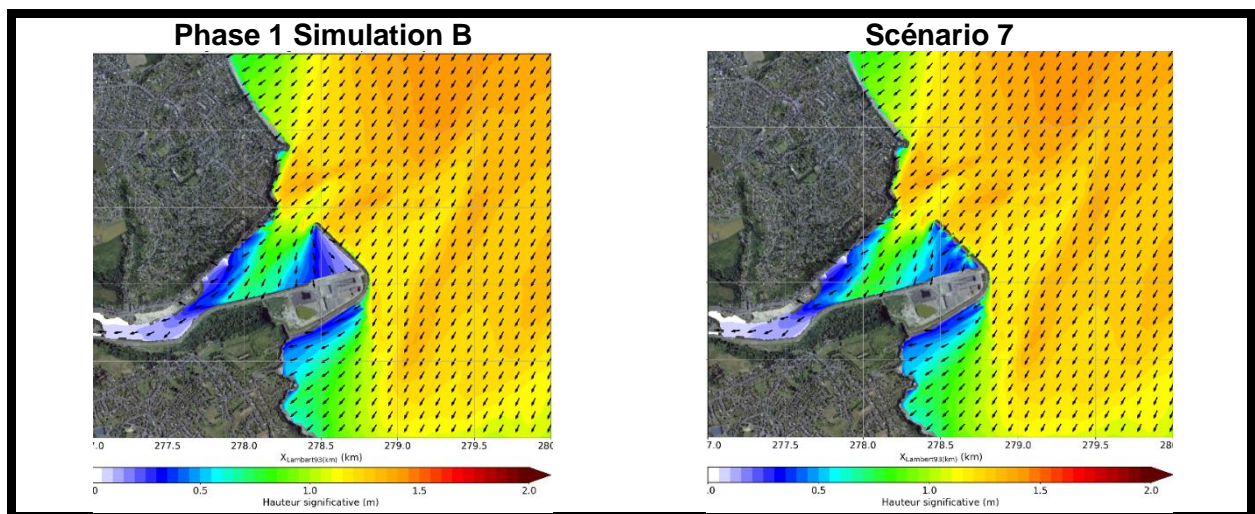


Figure 4-21 Hauteur significative des vagues maximale pendant le cycle de marée du 04/02/2018 autour de la pleine mer de 08:00 : Scénario 7 versus simulation B de la phase 1

### 4.2.3 MISE EN EAU DE L'AVANT-PORT (SCENARIO 8)

#### 4.2.3.1 Dynamique sableuse

La mise en place d'une écluse à l'entrée de l'avant-port modifie fortement la dynamique sédimentaire dans la zone d'étude. En présence de l'écluse, le sable est stoppé et n'est plus en mesure d'entrer dans l'avant-port. Par conséquent, l'ensablement dans la zone draguée devient négligeable. Le long du môle (extérieur), l'érosion augmente de 38%. Sur les autres secteurs, les changements sur les bilans sédimentaires sont faibles :

- érosion plus forte de 4% sur le secteur de la flèche sableuse ;
- dépôt réduit de 13.5% sur le secteur du Valais.

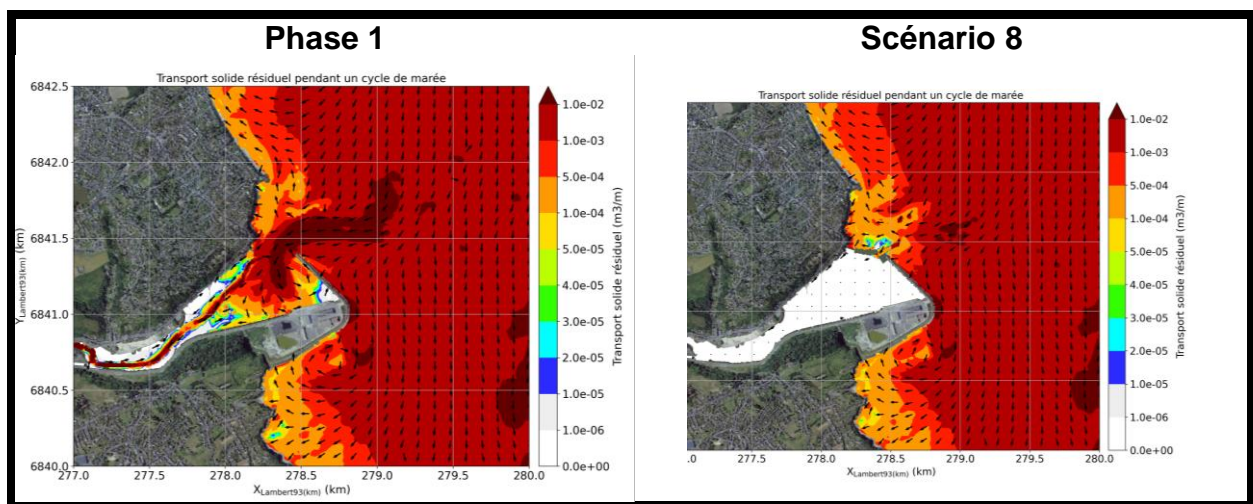


Figure 4-22 Comparaison des flux résiduels de sable au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 01/01/2018 à 05:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes) pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 8

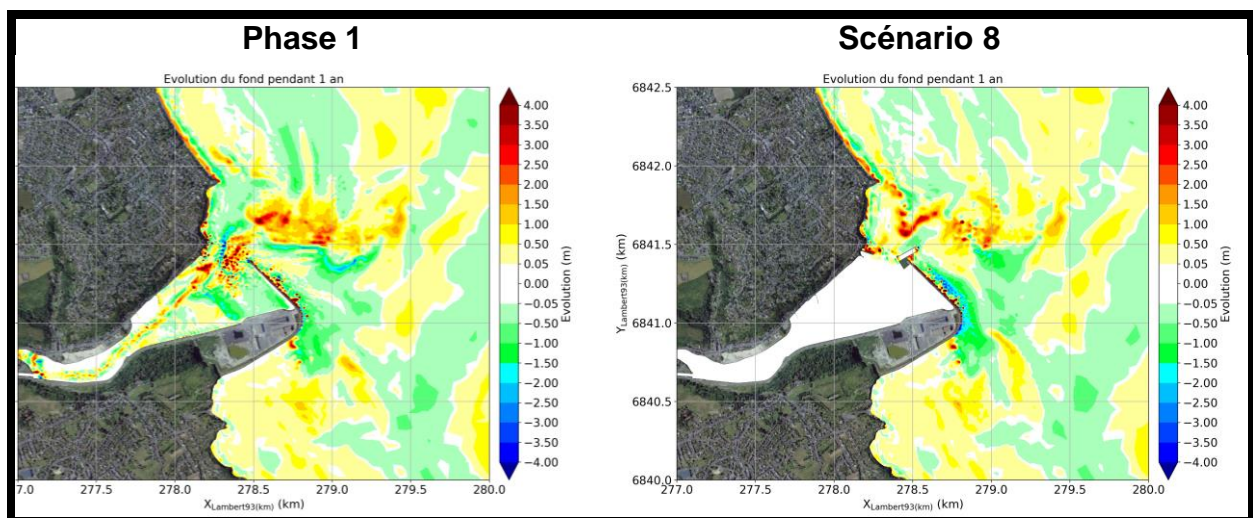


Figure 4-23 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 8



Tableau 4-10 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 8 versus simulation B de la phase 1.

Bilan (m3)	Simu B	SC8
ZD	41 483	42
V	16 419	14 197
FS	-50 853	-52 995
M	-37 958	-60 994

#### 4.2.3.2 Dynamique des vases

Du fait de la présence de l'écluse, les dépôts dans la zone de dragage deviennent négligeables (de 12 000 m<sup>3</sup> à 500 m<sup>3</sup>) : les eaux turbides maritimes entrent dans le port uniquement lors de l'ouverture de l'écluse. Les volumes d'eau (entrants) et les quantités de fines susceptibles de décanter dans l'avant-port sont donc très fortement réduits.

Sur le secteur du Valais, les dépôts augmentent de 29%. A noter que cette différence, de l'ordre de 250 m<sup>3</sup> par an, est supérieure aux dépôts associés aux activités de dragage de l'avant-port (de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/an).

L'avant-port étant fermé pour ce scénario, la contribution des apports naturels du Gouët sur la dynamique d'envasement de la zone d'entretien (ZD) est ici analysée spécifiquement (concentration de 10 mg/l en amont et vitesse de chute de 0.1 mm/s). Pour rappel, les apports du Gouët n'ont pas été pris en compte dans les autres scénarios suite à une analyse en phase 1 montrant que ces apports étaient négligeables par rapport à ceux d'origine maritime. Les résultats montrent que les apports du Gouët restent faibles dans cette configuration avec des dépôts inférieurs à 2mm/an dans la zone draguée (~50 m<sup>3</sup>), et inférieurs à 1 mm/an dans le secteur du Valais.

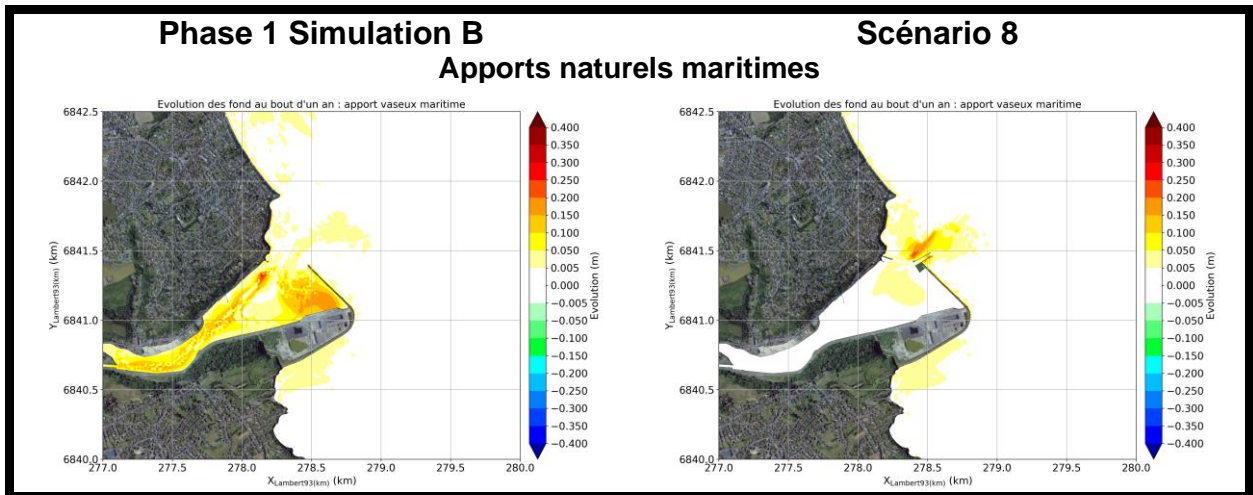


Figure 4-24 Dépôts de vase en 1 an : Scénario 8 versus simulation B de la phase 1.

Tableau 4-11 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénario 8 versus simulation B de la phase 1.

Bilan (m3)	Maritime	
	Simu B	SC8
ZD	12 326	511
V	882	1 140

### 4.2.4 CHENAL RECANALISE (SCENARIO 9)

#### 4.2.4.1 Dynamique sableuse

La mise en place d'un épi pour recanaliser le Gouët n'a qu'un effet limité dans le chenal et n'a pas d'effet significatif sur le transport résiduel dans l'avant-port pendant un cycle de marée.

Concernant les évolutions morphologiques des fonds, la modification des dépôts est faible dans la zone de dragage (-3%). Sur les autres secteurs, les effets sont modérés à faibles :

- Augmentation de l'érosion de 13% le long du môle ;
- Diminution de l'érosion de 6% sur le secteur de la flèche sableuse ;
- Diminution des dépôts de 3% sur le secteur du Valais.

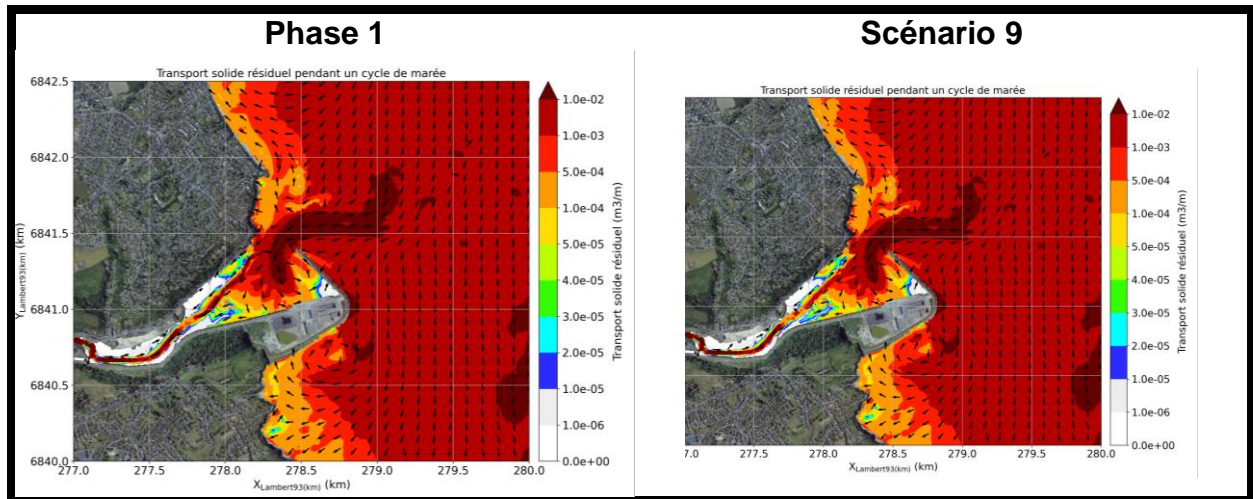


Figure 4-25 Comparaison des flux résiduels de sable au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 01/01/2018 à 05 :00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes) pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 9

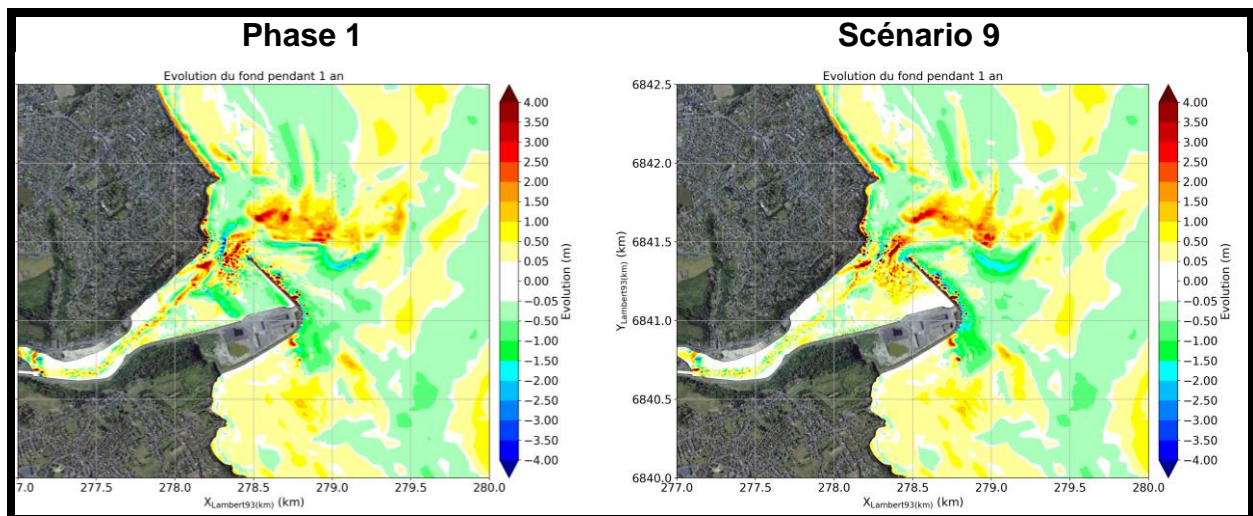


Figure 4-26 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse, obtenues à l'issue d'un an de simulation pour différentes configurations d'aménagement : Actuel versus Scénario 9

Tableau 4-12 Comparaison des bilans sédimentaires de sable dans les zones d'intérêt : Scénario 9 versus simulation B de la phase 1.

Bilan (m3)	Simu B	SC9
ZD	41 483	40 303
V	16 419	15 903
FS	-50 853	-47 422
M	-37 958	-42 792

### 4.2.4.2 Dynamique des vases

Les modifications des dépôts de vases liés aux apports maritimes sont dans l'ensemble faibles avec une augmentation inférieure à 1% dans la zone draguée et une augmentation de 4% sur le secteur du Valais.

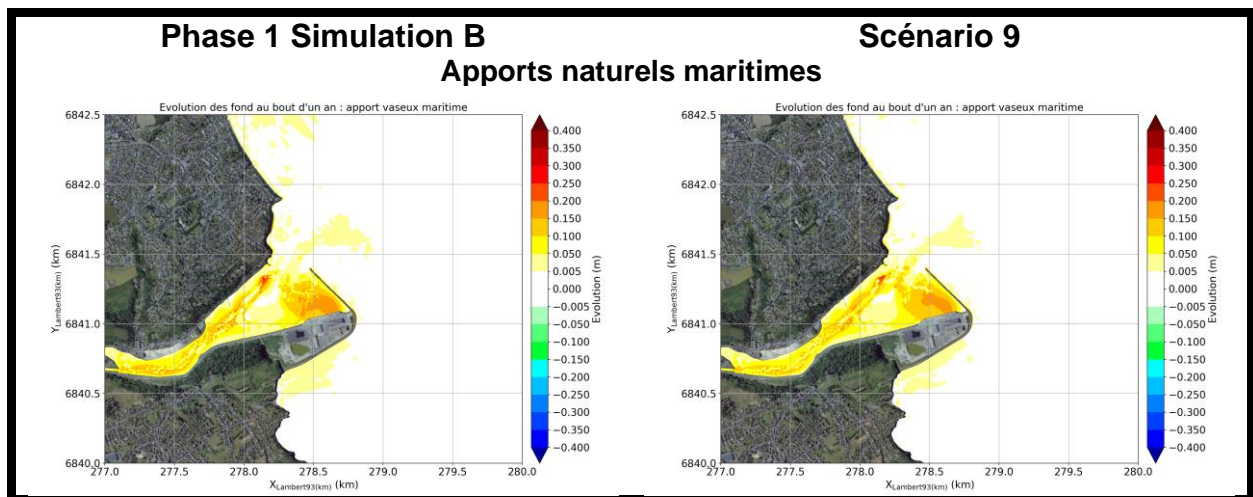


Figure 4-27 Dépôts de vase en 1 an : Scénario 9 versus simulation B de la phase 1.

Tableau 4-13 Comparaison des bilans sédimentaires de vase dans les zones d'intérêt : Scénario 9 versus simulation B de la phase 1.

Bilan (m3)	Maritime	
	Simu B	SC9
ZD	12 326	12 374
V	882	920

#### 4.2.5 SEUIL INCLINABLE (SCENARIO 10)

##### 4.2.5.1 Dynamique sableuse

###### 4.2.5.1.1 Modélisation en champ proche (à haute résolution autour de l'ouvrage)

Pour le transport de sable, le système de modélisation TELEMAC 2DH repose sur une formulation en capacité de transport (en l'occurrence celle de Wu et Lin, 2014). Pour la suspension, cette approche repose sur la notion d'équilibre entre l'érosion et le dépôt lorsqu'un sable d'une certaine granulométrie est soumis à un régime de forçage donné (dont l'intensité est exprimée par la contrainte de cisaillement près du fond). Cet équilibre se traduit par un profil de concentration type, permettant ainsi d'exprimer un flux intégré à l'échelle de la colonne d'eau. Dans le cas du scénario avec le seuil inclinable, le système de modélisation présente certaines limitations vis-à-vis des estimations de flux passant au-dessus de l'ouvrage. En particulier, il ne permet pas de :

- Reproduire explicitement la dynamique du sable en suspension, et en particulier les gradients de concentrations très importants à l'échelle de la colonne d'eau, le sable étant majoritairement concentré près du fond (d'autant plus que son diamètre augmente). En effet, les sédiments de fond à proximité du site du Légué sont majoritairement constitués de sables fins, dont le transport se fait essentiellement en suspension (contrairement à des sables plus grossiers pour lesquels le mode de transport dominant est le charriage).
- Tenir compte des effets d'accélération sur la verticale ainsi que de potentiels ressauts hydrauliques générés au contact du seuil, susceptibles *in fine* d'influencer la quantité de sable franchissant le seuil. Pour être appréhendés, ces phénomènes nécessitent la mise en place d'une modélisation à haute résolution, tant horizontalement que verticalement, et préférentiellement avec une prise en compte d'un terme de pression non-hydrostatique.

Afin d'apporter une expertise plus précise sur l'efficacité du seuil à limiter les flux sableux entrants dans l'avant-port (80% des sédiments dragués étant sableux), des simulations numériques complémentaires ont été réalisées avec le modèle SWASH (<http://swash.sourceforge.net/> ; Zijlema et al., 2011). Ce modèle à résolution de phase est basé sur les équations du mouvement en eau peu profonde avec un terme de pression non-hydrostatique permettant de résoudre la structure verticale de l'écoulement (à la différence d'autres modèles de vagues déterministes de type Berkhoff ou Boussinesq). Outre son application principale dédiée à la propagation des vagues, SWASH permet également d'étudier les circulations (e.g. prescription de courants ou débits aux limites du modèle) et le transport en suspension de sédiments non-cohésifs et cohésifs en 3D. En effet, le code permet la résolution d'une équation de transport (advection/diffusion) par le biais de méthodes numériques sophistiquées (schéma TVD), tenant compte des échanges à l'interface eau/sédiment (érosion, dépôt), de l'advection par les courants et les gradients de densité, et de la diffusion par la turbulence.

###### 4.2.5.1.1.1 Méthodologie : conditions simulées et paramétrage du modèle

Des séries temporelles de niveaux d'eau et de courants ont été extraites des sorties TELEMAC à proximité du seuil afin de déterminer les combinaisons intéressantes à simuler (dynamique d'ensablement importante) avec le modèle SWASH (cf. Figure 4-28). Cinq conditions représentatives intervenant au cours du flot d'une marée de vive-eau ont ainsi été sélectionnées et simulées (cf. Tableau 4-14). Ces 5 conditions sont simulées pour deux sables de granulométries différentes dont les caractéristiques (diamètre :  $d_{50}$  ; vitesse de chute :  $W_s$  ; contrainte critique de dépôt :  $\tau_{cd}$ ) sont les suivantes :



- $d_{50}=125 \mu\text{m}$  ;  $W_s=10.85 \text{ mm/s}$  ;  $\tau_{cd}=0.1 \text{ N/m}^2$ .
- $d_{50}=175 \mu\text{m}$  ;  $W_s=19.50 \text{ mm/s}$  ;  $\tau_{cd}=0.15 \text{ N/m}^2$ .

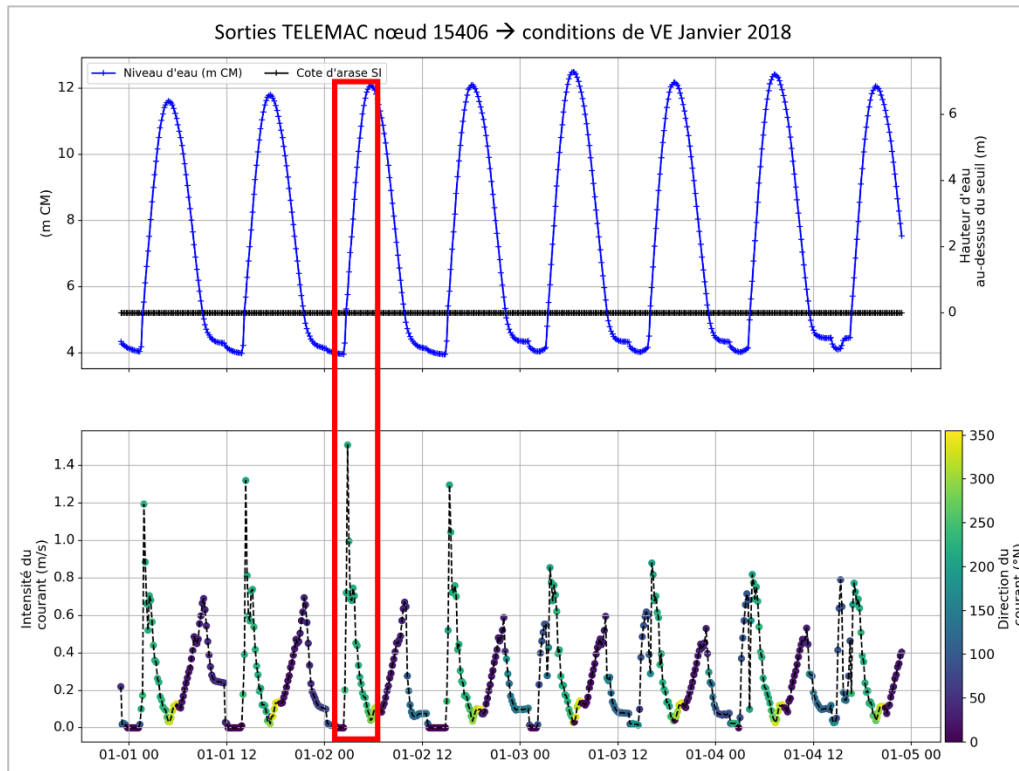


Figure 4-28 Sorties TELEMAC de niveaux d'eau et de courants du 1<sup>er</sup> au 5 janvier 2018 au nœud 15 406, situé environ 20 m devant le seuil dans l'axe du chenal. La période d'intérêt pour les analyses relatives aux flux sableux pour le scénario 10 est encadrée en rouge et correspond au flot de la première marée de vive-eau du 2 janvier (pic de courant à 1.5 m/s).

Courant (m/s)	Hauteur d'eau au-dessus de l'arase du seuil (m)
1.5	0.55
1	1.25
0.75	2
0.75	3.5
0.5	4

Tableau 4-14 Combinaisons de niveaux d'eau/courants extraits de TELEMAC pendant le flot du 2 janvier 2018, qui seront utilisées comme conditions aux limites pour les simulations SWASH.

La configuration SWASH mise en place est 2DV, avec une résolution horizontale de 0.25 m et 10 couches sur la verticale. Un canal de 600 m de longueur est considéré, le forçage de courant étant prescrit en  $x=0$  m et le seuil étant positionné en  $x=150$  m (cf. Figure 4-29a ; note : une condition initiale de courant est également imposée sur les 150 premiers mètres précédant le seuil).

Afin de rester dans des gammes de concentrations en suspension cohérentes par rapport à la formulation en capacité de transport utilisée dans TELEMAC, les profils théoriques de concentration associés aux 5 conditions hydrodynamiques ont été calculés à partir du formalisme de Wu et Lin (2014), puis ont été imposés dans le modèle sur les 15 mètres précédents le seuil (entre  $x=135$  et  $x=150$  m ; cf. Figure 4-29b,c) en désactivant par ailleurs l'érosion des sédiments de fond. Autrement dit, le devenir de la charge de sable en suspension associée à chaque combinaison de niveau d'eau/courant a été étudié, leur dynamique résultant de l'advection par le courant, de la turbulence, des gradients de densité, et de leur vitesse de chute.

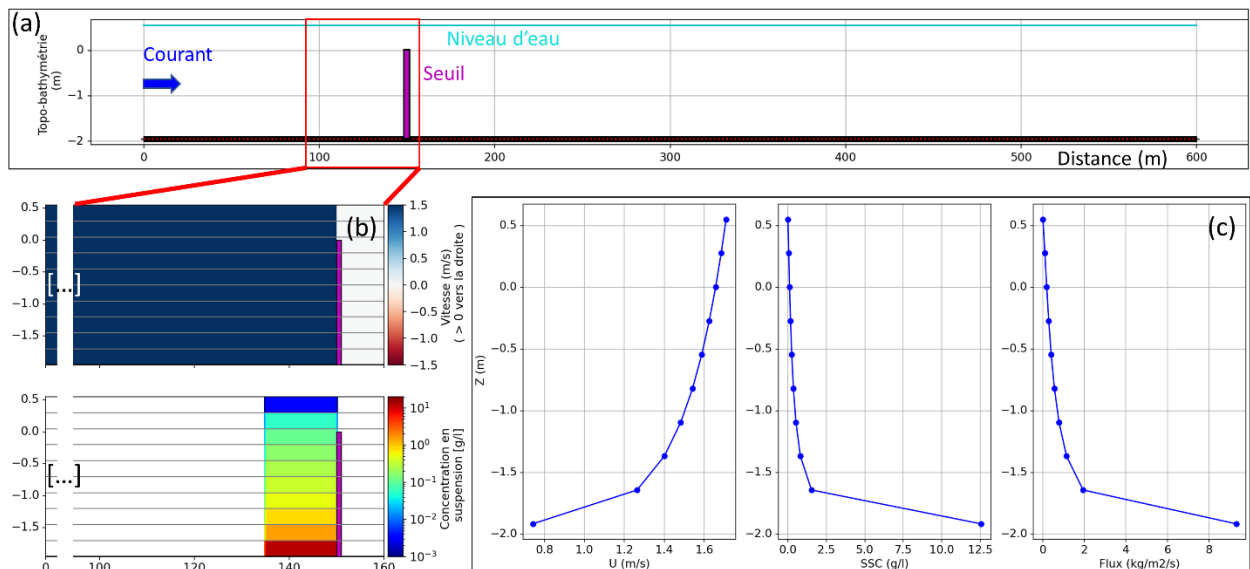


Figure 4-29 (a) Configuration SWASH 2DV, (b) exemple de condition initiale de concentration en suspension de sable (175  $\mu\text{m}$ ) devant le seuil pour un courant de 1.5 m/s et une tranche d'eau d'environ 50 cm au-dessus de l'arase de l'ouvrage, et (c) détail des profils théoriques associés de courant, concentration en suspension, et flux (formalisme de Wu et Lin, 2014).

#### 4.2.5.1.1.2 Résultats : comparaison des flux avec ou sans seuil

##### 4.2.5.1.1.2.1 Pour les différentes conditions simulées

Les différentes combinaisons de niveaux d'eau/courants de la marée de vive-eau du 2 janvier 2018 ont été simulées avec SWASH pour les deux sables. Les résultats de concentrations en suspension simulées sont par exemple illustrés pour les différentes conditions au même instant pour le sable de 175  $\mu\text{m}$  (Figure 4-30). Même pour le courant le plus fort de 1.5 m/s intervenant au début du flot, lorsque la tranche d'eau au-dessus de l'arase du seuil n'est que de 55 cm, la majorité du sable est bloquée par le seuil. A mesure que la tranche d'eau au-dessus du seuil augmente et que l'intensité du courant diminue, le sable tend à se concentrer près du fond et la proportion de sable passant au-dessus du seuil décroît fortement.

Pour les différentes conditions hydrodynamiques, les flux de sable passant au-dessus du seuil, «  $q_{s\_SI}$  », sont calculés sur la bordure de l'ouvrage située du côté de l'avant-port (Figure 4-31), et sont comparés aux flux actuels en l'absence du seuil, «  $Q_{act}$  », correspondant à la somme des flux en suspension ( $q_s$ ) et par charriage ( $q_b$  ; également calculé en suivant le formalisme de Wu et Lin, 2014).

Pour une granulométrie de 125  $\mu\text{m}$ , le flux de sable au-dessus du seuil, «  $q_{s\_SI}$  », ne représente que 10 à 20% du flux actuel «  $Q_{act}$  » pour les conditions de courant les plus fortes de 1 à 1.5 m/s, 5% pour un courant de 0.75 m/s, et moins de 1% lorsque le courant est inférieur ou égal à 0.5 m/s (Figure 4-32). Le flux de sable est donc réduit de 80% au minimum grâce au seuil sur l'ensemble des conditions testées.

Pour une granulométrie de 175  $\mu\text{m}$ , le flux de sable au-dessus du seuil, «  $q_{s\_SI}$  », ne représente que 2 à 10 % du flux actuel «  $Q_{act}$  » pour les conditions de courant les plus fortes de 1 à 1.5 m/s, et moins de 1% lorsque le courant est inférieur ou égal à 0.75 m/s (Figure 4-33). Le sable étant de plus en plus concentré près du fond lorsque sa granulométrie augmente, l'efficacité du seuil devient ainsi plus importante, d'où la réduction de 90% minimum des flux pour les conditions simulées avec un sable de 175  $\mu\text{m}$ .

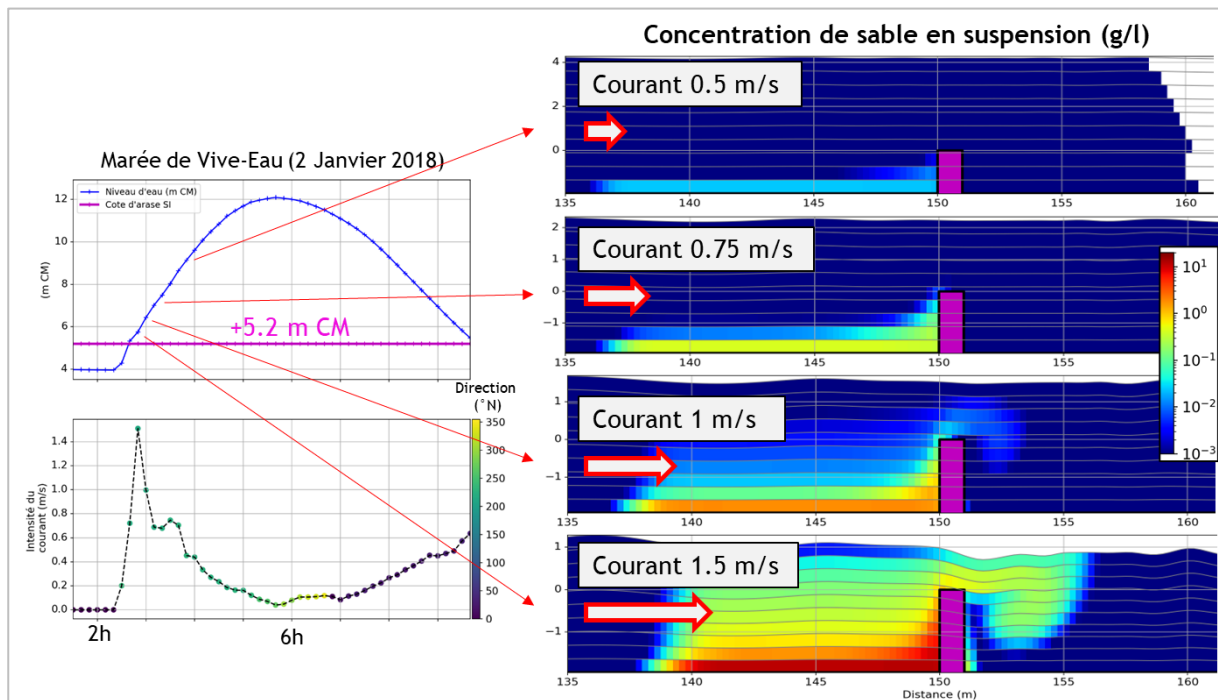


Figure 4-30 Concentrations en suspension de sable (en g/l) obtenues avec SWASH après 5 secondes de simulation pour un sable de 175  $\mu\text{m}$  et pour les différentes combinaisons de niveaux d'eau et de courants (cf. Tableau 4-14).

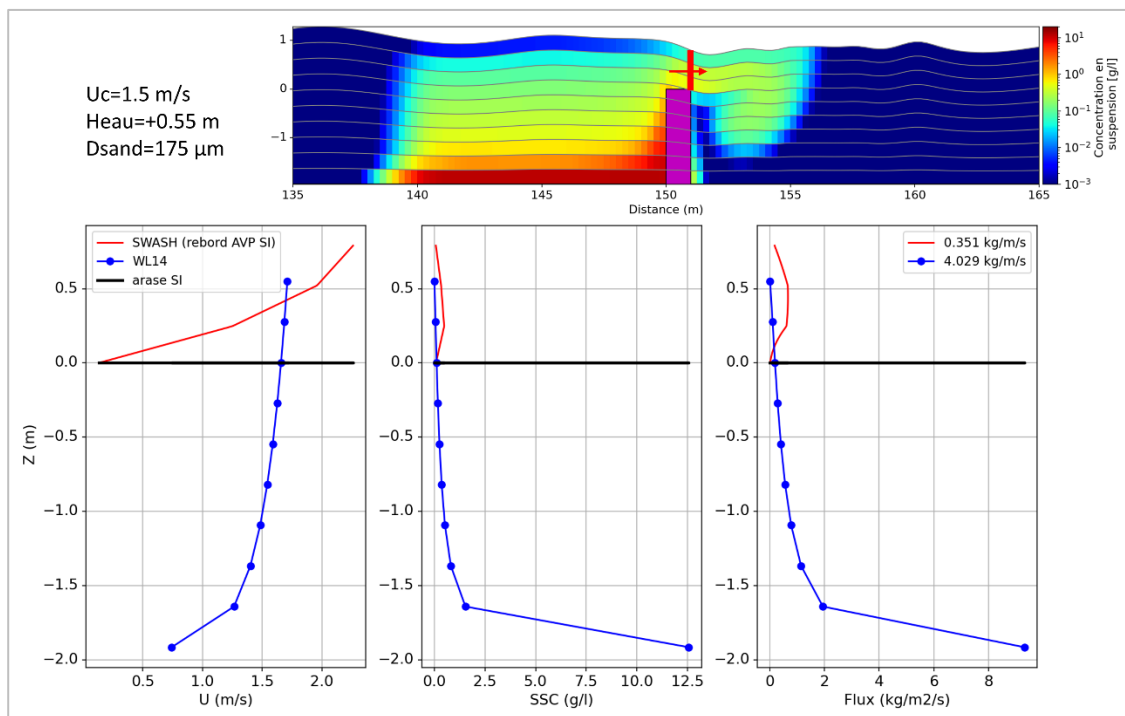


Figure 4-31 Comparaison des flux en suspension avec (en rouge) ou sans la présence du seuil inclinable (en bleu ; d'après Wu et Lin, 2014), pour un sable de 175  $\mu\text{m}$ , un courant de 1.5 m/s, et une tranche d'eau de 55 cm au-dessus de l'arase de l'ouvrage. Les valeurs indiquées en kg/m<sup>2</sup>/s correspondent à l'intégration des flux en kg/m<sup>2</sup>/s sur les épaisseurs de tranche d'eau contraintes ou non par la présence du seuil.



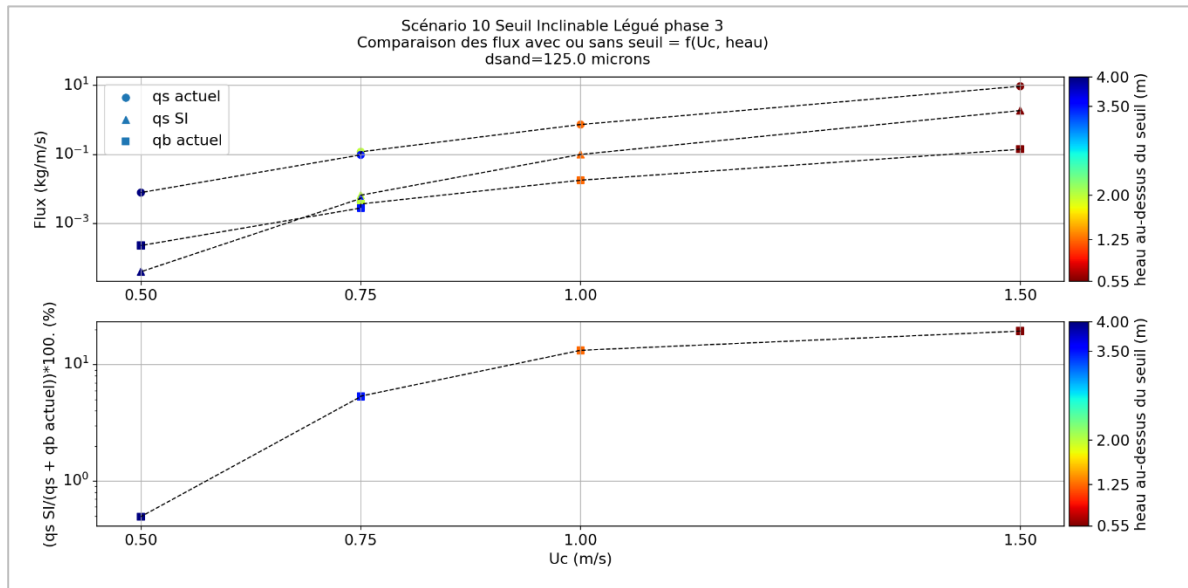


Figure 4-32 Synthèse des flux en suspension obtenus au-dessus du seuil inclinaible (qs SI) avec le modèle SWASH pour un sable de 125 µm et pour les différentes combinaisons de niveaux d'eau et de courants (cf. Tableau 4-14), et comparaison aux flux théoriques calculés en l'absence de seuil à partir du formalisme de Wu et Lin (2014) (suspension : « qs actuel » ; charriage : « qb actuel »). La figure du bas illustre le ratio  $qs\ SI / (qs + qb\ actuel)$  exprimé en pourcentage.

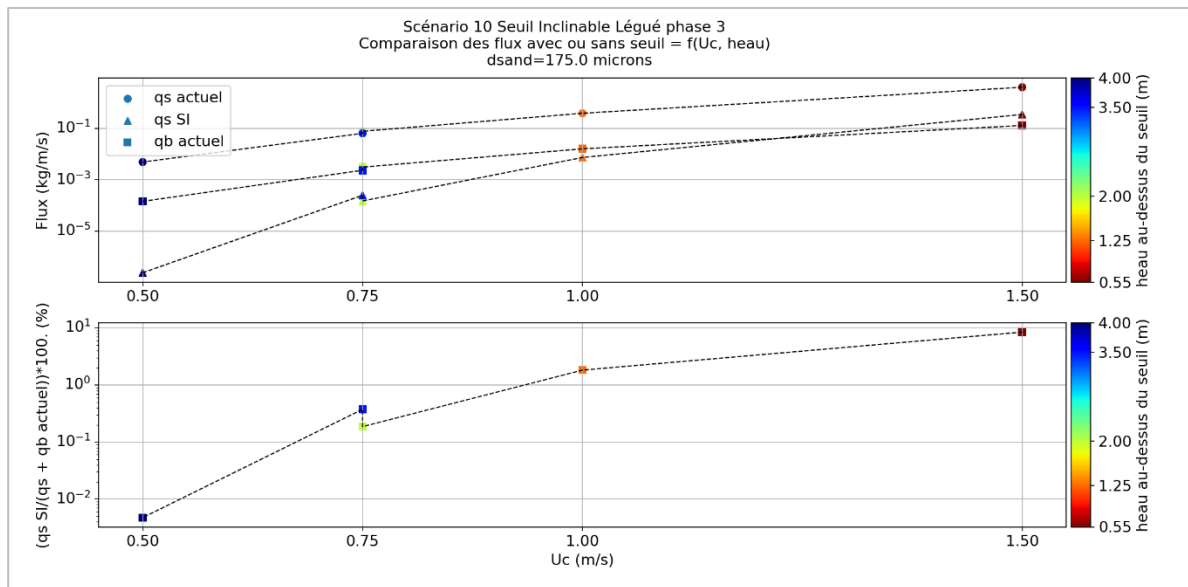


Figure 4-33 Synthèse des flux en suspension obtenus au-dessus du seuil inclinaible (qs SI) avec le modèle SWASH pour un sable de 175 µm et pour les différentes combinaisons de niveaux d'eau et de courants (Tableau 4-14), et comparaison aux flux théoriques calculés en l'absence de seuil à partir du formalisme de Wu et Lin (2014) (suspension : « qs actuel » ; charriage : « qb actuel »). La figure du bas illustre le ratio  $qs\ SI / (qs + qb\ actuel)$  exprimé en pourcentage.

#### 4.2.5.1.1.2.2 Bilan sur l'ensemble du flot

A partir des relations entre les flux (suspension avec ou sans seuil, et charriage) et l'intensité du courant déduites des résultats de simulations, les flux ont été intégrés sur toute la durée du flot (marée de vive-eau du 2 janvier 2018). Ces flux en présence du seuil ( $q_{s\_SI}$ , uniquement en suspension) sont ainsi comparés avec les flux « actuels » résultant à la fois du transport en suspension et par charriage ( $Q_{act}=q_s+q_b$ ).

L'intégration des flux montre que sur l'ensemble du flot, le flux  $q_{s\_SI}$  ne représente que 18.4% et 7.4% du flux « actuel » ( $Q_{act}$ ) pour les sables de 125 et 175  $\mu m$ , respectivement (cf. Figure 4-34 ; Figure 4-35). Autrement dit, les flux intégrés à l'échelle du flot (en  $kg/m$ ) sont réduits de 80 à 90% grâce à la mise en place du seuil (Tableau 4-15). A noter que les résultats confirment que la dynamique d'ensablement résulte majoritairement des flux intervenant au tout début du flot.

**En conclusion, l'ensablement de l'avant-port serait réduit de 80 à 90% grâce à la mise en place du seuil inclinable.**

Flux de sable intégré à l'échelle du flot			
Diamètre ( $\mu m$ )	Flux sans seuil (kg/m)	Flux avec seuil (kg/m)	Réduction
125	6505	1195	-82%
175	2925	216	-93%

Tableau 4-15 Synthèse des simulations SWASH : comparaison des flux de sable (diamètres de 125 et 175  $\mu m$ ) intégrés à l'échelle du flot de la marée de vive-eau du 2 janvier 2018, avec ou sans la présence du seuil inclinable.

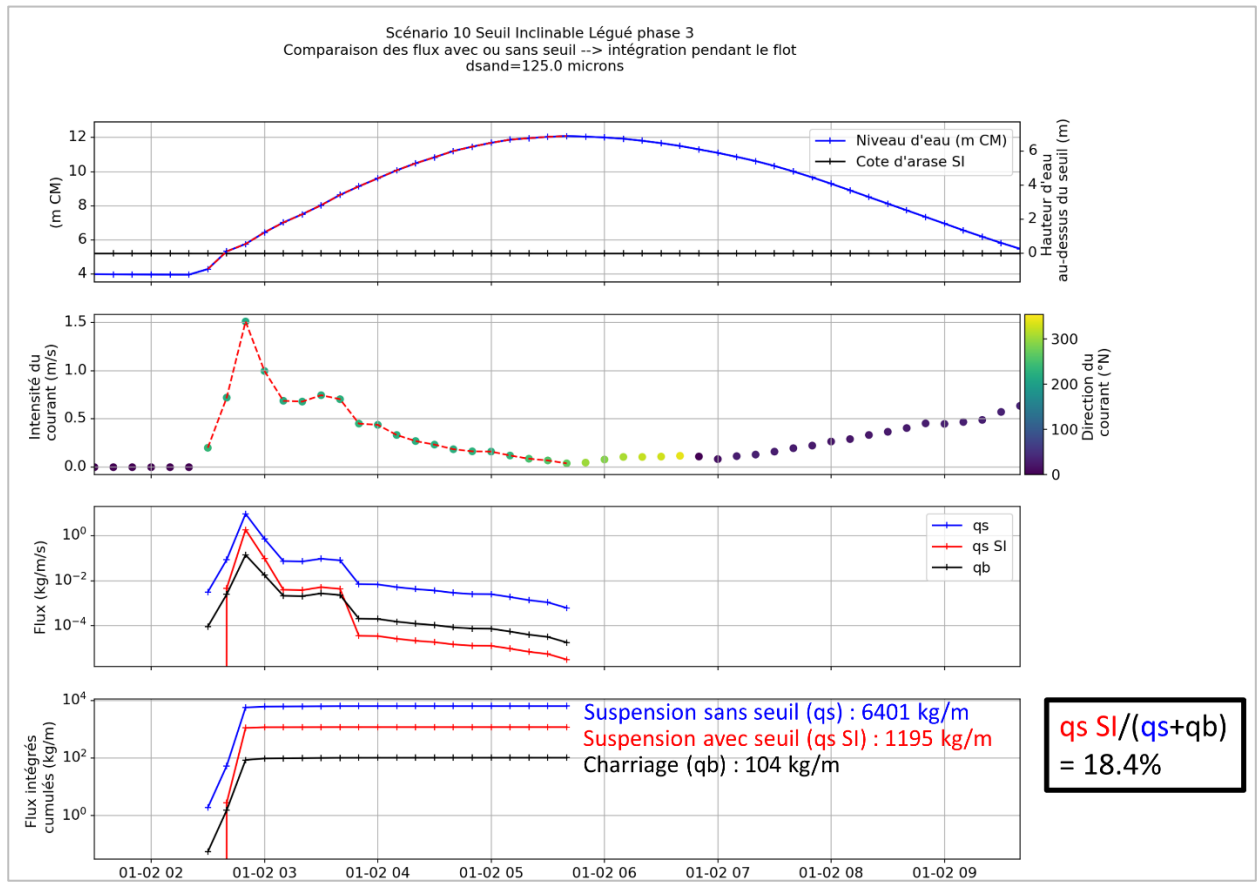


Figure 4-34 Analyse à l'échelle du flot de la marée de vive-eau du 2 janvier 2018 : comparaison des flux (en kg/m/s ou intégrés en kg/m et cumulés dans le temps) en suspension obtenus au-dessus du seuil inclinable ( $q_s SI$ ) avec le modèle SWASH pour un sable de 125  $\mu m$ , avec les flux théoriques calculés en l'absence de seuil à partir du formalisme de Wu et Lin (2014) (suspension : «  $q_s$  » ; charriage : «  $q_b$  »).

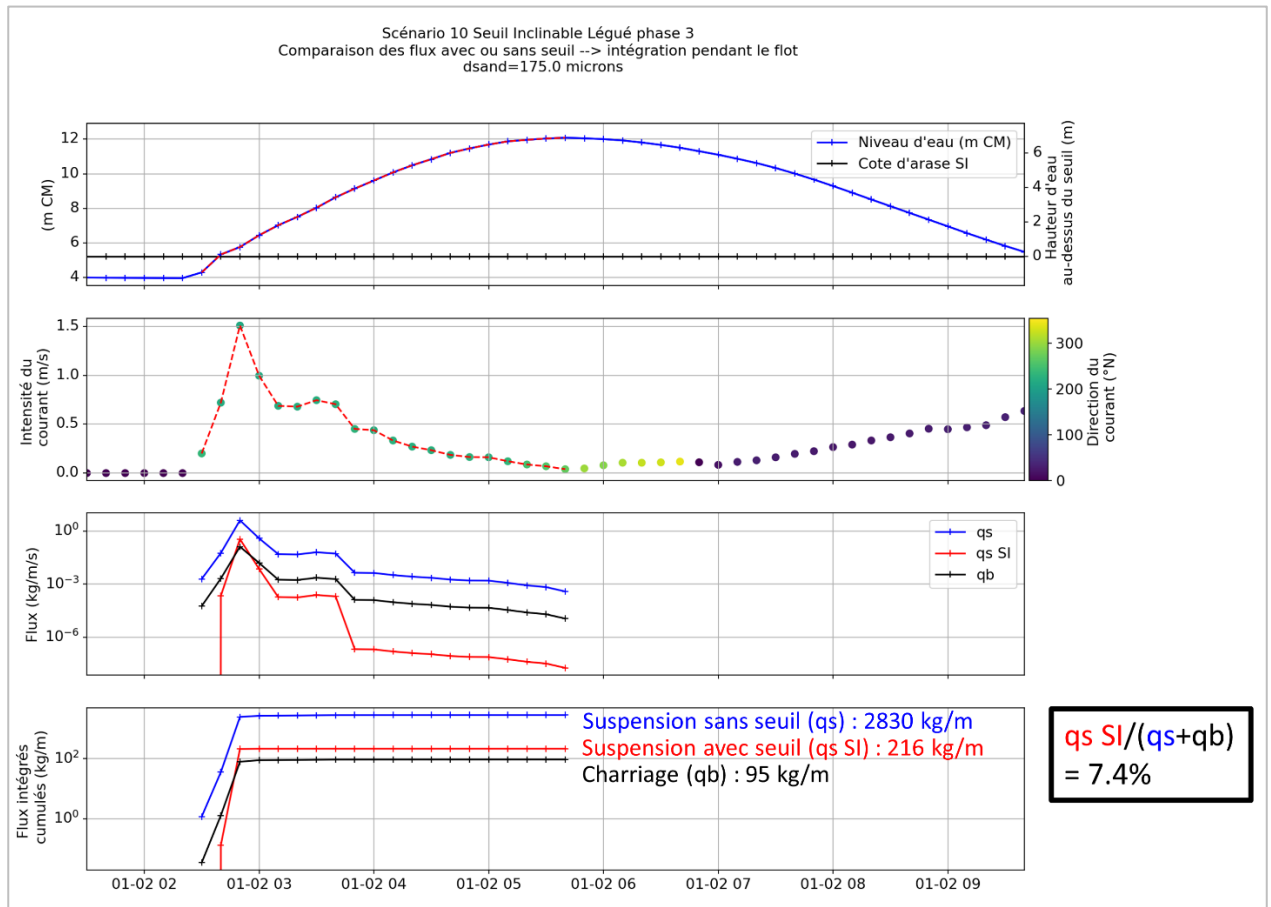


Figure 4-35 Analyse à l'échelle du flot de la marée de vive-eau du 2 janvier 2018 : comparaison des flux (en kg/m/s ou intégrés en kg/m et cumulés dans le temps) en suspension obtenus au-dessus du seuil inclinable (qs SI) avec le modèle SWASH pour un sable de 175 µm, avec les flux théoriques calculés en l'absence de seuil à partir du formalisme de Wu et Lin (2014) (suspension : « qs » ; charriage : « qb »).



#### 4.2.5.1.2 Modélisation 2D TELEMAC (sur l'ensemble de la zone d'étude)

##### Simulations pour une ouverture du seuil de PM à BM (seuil ouvert pendant toute la durée du jusant) :

Le seuil inclinable a été paramétré dans le modèle Telemac/Tomawac/Sisyphe, pour des simulations de la dynamique sableuse. Au bout de quelques jours de simulation, les sédiments (sable) s'amassent devant le seuil côté extérieur (i.e. côté Baie) : les courants de jusant ne sont pas assez forts pour reprendre les sables accumulés devant le seuil. Au bout de quelques jours, l'ouvrage est obstruée par la présence d'amas de sable.

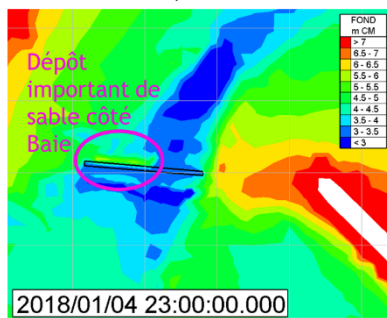
##### Simulations pour une ouverture du seuil à marée basse (effet de chasse escompté) :

Pour y remédier, les heures d'ouverture et de fermeture du seuil ont été modifiées pour créer un effet de chasse (2 tests réalisés : « chasse 1 » et « chasse 2 » ; cf. figure ci-dessous). Pour cela, l'abaissement du seuil est réalisé au moment où la différence de niveau d'eau est la plus importante entre chaque côté de l'ouvrage, et avant que les courants ne redeviennent entrants vers l'avant-port (i.e. avant la bascule de flot).

Cet effet de chasse est efficace (en particulier « chasse 2 » pour lequel la retenue d'eau est plus importante) et permet de limiter l'accumulation de sable devant la porte. Toutefois, au bout de quelques mois, une certaine accumulation de sable devant le seuil est simulée. A noter que le modèle est proche de ses limites d'utilisation dans ce cas, avec notamment des processus de type « champs proche » qui ne peuvent être reproduits, en particulier avec une résolution de quelques mètres à proximité de l'ouvrage.

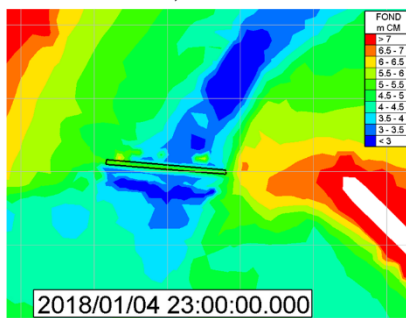
##### Proposition 1 :

- Seuil levé à 5,20m CM de BM à PM
- Seuil baissé à 3,25m CM de PM à BM



##### Proposition 2 avec chasse 1 :

- Seuil levé à 5,20m CM de BM à BM-2
- Seuil baissé à 3,25m CM de BM-2 à BM



##### Proposition 3 avec chasse 2 :

- Seuil levé à 5,20m CM de BM+1 à BM
- Seuil baissé à 3,25m CM de BM à BM+1

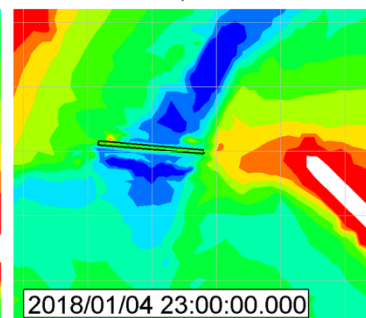


Figure 4-36 Bathymétrie à proximité du seuil inclinable dans le modèle au bout de 4 jours de simulation pour 3 propositions d'ouverture et de fermeture du seuil.

### 4.2.5.2 Dynamique des vases

Le sable s'accumulant près de la porte, il n'est rapidement plus possible d'utiliser les résultats hydrodynamiques et d'états de mer issus de la simulation couplée Telemac/Tomawac/Sisyph (dynamique sableuse) comme forçage pour la modélisation de la dynamique des vases. Le modèle a donc tourné en configuration couplée Telemac/Tomawac/Sisyph (dynamique des vases) sur un mois pour évaluer les modifications des zones de dépôts des vases avec ce scénario. A noter que pour ce scénario, il n'y a pas de dragage. Les horaires d'ouverture et de fermeture modélisés correspondent à la proposition 3 (avec « chasse 2 »).

Il ressort de cette simulation que les dépôts liés aux apports naturels maritimes sont du même ordre de grandeur entre le scénario 10 et les simulations de phase 1. Il n'est donc pas attendu de changement significatif d'envasement avec la présence de ce seuil inclinable.

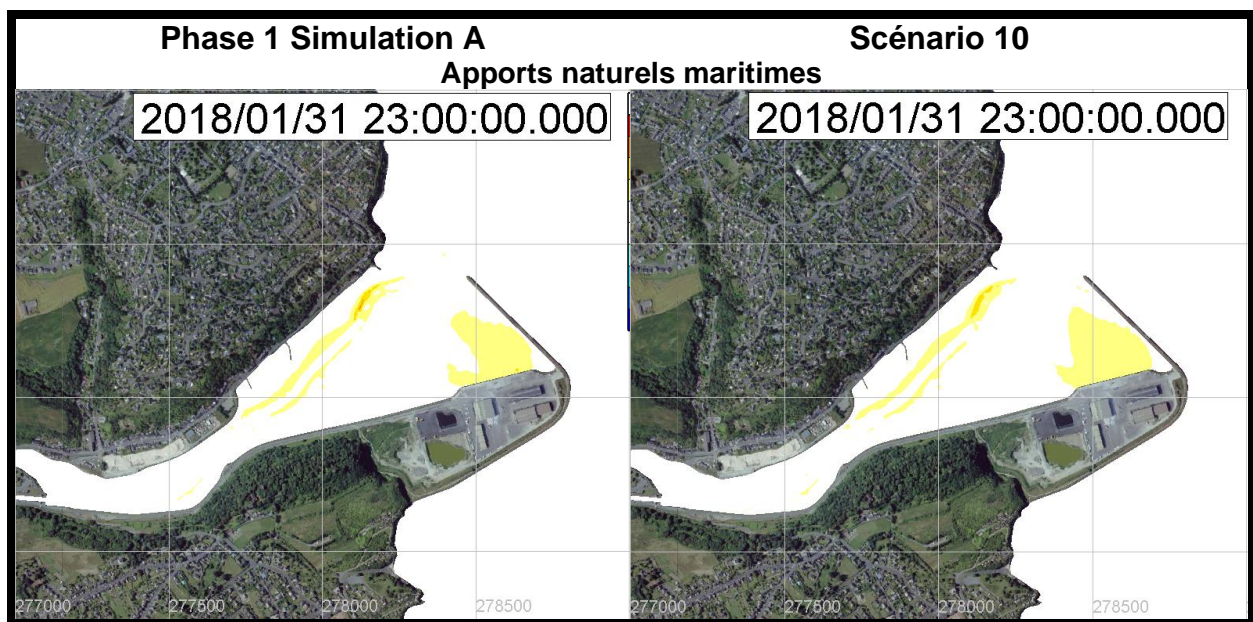


Figure 4-37 Dépôts de vase en 1 mois : Scénario10 versus simulation A de la phase 1.

#### 4.2.6 SYNTHÈSE

Concernant les scénarios de modification des aménagements, les principales conclusions sont les suivantes :

- L'ouverture du môle (scénario 7) et la recanalisation (scénario 9) modifient peu la dynamique sédimentaire de la zone et ne permettraient pas de limiter le recours au dragage.
- L'arasement de la flèche sableuse (scénario 3) entraîne une diminution des dépôts de vase dans le secteur du Valais. Cependant, cette flèche a une tendance à se recréer lors des événements tempétueux et il serait nécessaire d'entreprendre au bout de quelques années (estimation : environ tous les 2-3 ans) de nouveaux travaux d'arasement. On peut souligner que ces volumes de sables pourraient être utilisés pour recharger régulièrement la plage du Valais (ce point sera étudié spécifiquement dans une prochaine phase du projet).
- Dans le cas d'un système de mise en eau du port (i.e. système de bassin à flot, scénario 8), tel que prévu par le projet initial (cf. rapport CNEXO-COB, 1981, et projet plus abouti de 2006), les quantités de sable entrantes et donc à draguer deviendraient négligeables. Ce système permettrait aussi de diminuer fortement la quantité de vase à draguer. Globalement, même si les dépôts dans l'avant-port auraient une composition principalement vaseuse, cela ne devrait pas contraindre davantage les opérations de dragage par pelle mécanique. En effet, les épaisseurs de vase attendues sont relativement faibles (ou du moins pas plus importantes) en comparaison des accumulations actuelles de vase dans les zones les moins hydrodynamiques de l'avant-port.
- La mise en place d'un seuil inclinable (scénario 10) présente des résultats encourageants avec une diminution substantielle de 80 à 90% des volumes de sables entrants dans l'avant-port, sans pour autant y favoriser les dépôts de vase. Des accumulations de sable devant l'ouvrage (coté baie) sont attendues mais des chasses générées en adaptant les heures d'ouverture et de fermeture du seuil pourraient résoudre, au moins en grande partie, ce problème. De plus, une piste intéressante pourrait être de combiner l'effet de chasse d'ouverture du seuil (à marée basse) avec celui du déversoir situé plus en amont. Des investigations plus poussées seraient nécessaires pour décrire plus précisément la dynamique sédimentaire à l'échelle d'une année.