

Port du Légué
**Étude de modélisation hydro-
sédimentaire relative aux
opérations de dragage de
l'avant-port**



**2eme rapport de la phase 3 :
Rechargement de la plage
du Valais**

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	8
2.	PRÉSENTATION DES SCENARIOS DE RECHARGEMENT	11
2.1	CARACTÉRISATION DES SABLES ENVISAGES POUR LE RECHARGEMENT	11
3.	MISE EN PLACE DES MODÉLISATIONS.....	15
3.1	MODÉLISATIONS 2D TELEMAC-TOMAWAC-SISYPHE.....	15
3.1.1	Codes de calcul et paramétrisation	15
3.1.2	Génération des MNTs pour les différents scénarios de rechargement à simuler	17
3.1.3	Maillages	25
3.1.4	Condition Hydrodynamique simulée.....	27
3.1.5	Mobilité du fond sédimentaire et paramétrage du modèle sédimentaire SISYPHE	30
3.2	MODÉLISATION 1D XBEACH.....	31
3.2.1	Présentation du Modèle et objectifs	31
3.2.2	Conditions simulées.....	32
4.	RÉSULTATS DU MODELÉ MORPHO DYNAMIQUE 2D (TELEMAC-TOMAWAC-SISYPHE).....	33
4.1.1	Simulations A : Mobilité uniquement des sédiments rechargés	33
4.1.2	Simulations B : Mobilité des sédiments dans tout le domaine de calcul	38
5.	RÉSULTATS DU modèle 1DH XBEACH.....	42
6.	SYNTHÈSE	48
7.	ANNEXES	51



Rapport de la phase n°3B : Rechargement
Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux
opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

7.1	TELEMAC 2D, SIMULATIONS A : ÉVOLUTIONS MORPHOLOGIQUES DES FONDS (ÉROSION/DEPOT) SANS EFFETS DE PENTE	51
7.2	XBEACH 1DH : RÉSULTATS POUR LA CONDITION HYDRODYNAMIQUE B	51

Table des illustrations

Figure 1-1. Localisation du port du Légué dans la baie de Saint-Brieuc.....	8
Figure 1-2. Port du Légué et localisation des zones de dragage dans l'avant-port (bleu) et de dépôt derrière la digue (jaune)	9
Figure 2-1 Localisation des prélèvements sédimentaires effectués sur site le 22 Août 2023	12
Figure 2-2 Photographies des différentes stations d'échantillonnage et des prélèvements sédimentaires.	12
Figure 2-3 Photographies des différentes stations d'échantillonnage et des prélèvements sédimentaires.	13
Figure 2-4 Résultats des analyses granulométriques aux différentes stations.....	14
Figure 2-5 Résultats des mesures de densité aux différentes stations.	14
Figure 3-1 Comparaison des hauteurs d'eau et des courants, prédits et mesurés (cf. phase 1).	16
Figure 3-2 Comparaison des hauteurs significatives des vagues, prédites et mesurées (cf. phase 1).16	
Figure 3-3 Vue en plan du projet de rechargement à 12 000 m ³ (scénarios 1 et 3) : cartes avant/après rechargement et localisation des lignes de contraintes utilisées en entrée de CDBeach.....	18
Figure 3-4 Rechargement de 12 000 m ³ : exemple de coupe-type (en échelles distordue et non-distordue) pour la section n°41. Rechargement en jaune, TN en vert. Localisation du profil sur la carte de gauche	19
Figure 3-5 Rechargement de 12 000 m ³ : exemple de coupe-type (en échelles distordue et non-distordue) pour la section n°18. Rechargement en jaune, TN en vert. Localisation du profil sur la carte de gauche	19
Figure 3-6 Vue en plan du projet de rechargement à 2 000 m ³ (scénario 2) : cartes avant/après rechargement et localisation des lignes de contraintes utilisées en entrée de CDBeach.	20
Figure 3-7 Rechargement de 2 000 m ³ : exemple de coupe-type (en échelles distordue et non-distordue) pour la section n°20. Rechargement en jaune, TN en vert. Localisation du profil sur la carte de gauche.....	21
Figure 3-8 Rechargement de 2 000 m ³ : exemple de coupe-type (en échelles distordue et non-distordue) pour la section n°10. Rechargement en jaune, TN en vert. Localisation du profil sur la carte de gauche.....	21
Figure 3-9 Topo-bathymétries avant et après arasement de la flèche sédimentaire pour le scénario 1 (prélèvement de 12 000 m ³ de sable).....	22
Figure 3-10 Topo-bathymétries avant et après arasement de la flèche sédimentaire pour le scénario 2 (prélèvement de 2 000 m ³ de sable).....	22

Figure 3-11 Comparaison du MNT de référence (levé CCI 02/2023) et de celui défini pour le scénario 1.	23
Figure 3-12 Comparaison du MNT de référence (levé CCI 02/2023) et de celui défini pour le scénario 2.	23
Figure 3-13 Comparaison du MNT de référence (levé CCI 02/2023) et de celui défini pour le scénario 3.	24
Figure 3-14. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation scénario 1 : zoom sur la zone d'étude.	25
Figure 3-15. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation scénario 2 : zoom sur la zone d'étude.	26
Figure 3-16. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation scénario 3 : zoom sur la zone d'étude.	26
Figure 3-17 Profil topo-bathymétrique utilisé pour la réanalyse de R2 à partir de la base de données RESOURCECODE (correspond au scénario de rechargement n°1).	28
Figure 3-18 Réanalyse de R2 calculée à partir de la base de données RESOURCECODE (point d'extraction des vagues et profil considéré illustrés sur la Figure 3-17)	29
Figure 3-19 Période de 15 jours sélectionnée pour les simulations morpho dynamiques TELEMAC 2D.	29
Figure 3-20 Réanalyse de R2 : période présentant la plus faible erreur quadratique moyenne sur l'ensemble des percentiles par rapport aux paramètres statistiques calculés sur l'ensemble de la période 1994-2022 (période sélectionnée pour les simulations morpho dynamiques TELEMAC 2D).	30
Figure 4-1 Transport solide résiduel sur les 15 jours de simulation pour les 3 scénarios de type A... 34	
Figure 4-2 Évolution de la bathymétrie entre l'instant initial (gauche), après 15 jours de simulation représentatifs d'une année (facteur morphologique de 25, milieu) et différentiel entre les deux états (droite) - Zoom sur la zone rechargée de la plage du Valais - Scénarios de type A.....	36
Figure 4-3 Transport solide résiduel sur les 15 jours de simulation pour les 3 scénarios de type B... 39	
Figure 4-4 Évolution de la bathymétrie entre l'instant initial (gauche), après 15 jours de simulation représentatifs d'une année (facteur morphologique de 25, milieu) et différentiel entre les deux états (droite) - Zoom large - Scénarios de type B.....	40
Figure 4-6 Évolution de la bathymétrie entre l'instant initial (gauche), après 15 jours de simulation représentatifs d'une année (facteur morphologique de 25, milieu) et différentiel entre les deux états (droite) - Zoom entre la plage du Valais et la flèche - Scénarios de type B.....	41
Figure 5-1 Condition hydrodynamique A simulée avec XBeach 1DH : vagues et niveaux d'eau.	43
Figure 5-2 XBeach 1H, condition A : Intensité et direction des flux solides (suspension et charriage) pour les 3 types de sable.....	44
Figure 5-3 XBeach 1H, condition A : Percentiles et maximums des flux solides orientés vers le large (suspension et charriage) pour les 3 types de sable	45

Figure 5-4 XBeach 1H, condition A : évolutions morphologiques potentielles calculées à partir des divergences de flux (équation d'Exner), pour les 3 types de sable.....	46
Figure 5-5 XBeach 1H, condition A : comparaison des flux en suspension et par charriage (rapports de percentiles ou de maximums), et des évolutions morphologiques potentielles (divergences de flux ; équation d'Exner) obtenus avec le sable de la flèche et de la CAN	47
Figure 7-1 TELEMAC 2D, Simulations A : différentiels bathymétriques obtenus sans effets de pente (critère à 10°) après 15 jours de simulation représentatifs d'une année (facteur morphologique de 25, milieu). Zoom sur la zone rechargée de la plage du Valais.....	51
Figure 7-2 Condition hydrodynamique B simulée avec XBeach 1DH : vagues et niveaux d'eau.	52
Figure 7-3 XBeach 1H, condition B : Intensité et direction des flux solides (suspension et charriage) pour les 3 types de sable.....	52
Figure 7-4 XBeach 1H, condition B : Percentiles et maximums des flux solides orientés vers le large (suspension et charriage) pour les 3 types de sable	53
Figure 7-5 XBeach 1H, condition B : évolutions morphologiques potentielles calculées à partir des divergences de flux (équation d'Exner), pour les 3 types de sable.....	54
Figure 7-6 XBeach 1H, condition B : comparaison des flux en suspension et par charriage (rapports de percentiles ou de maximums), et des évolutions morphologiques potentielles (divergences de flux ; équation d'Exner) obtenus avec le sable de la flèche et de la CAN	54

Suivi des modifications

Version	Modifications	Rédacteurs	Validation	Date
V1.0	Version initiale	Baptiste Mengual Aurélie Rivier Antoine Le Texier	Benoit Waeles / Olivier Raillard	15/11/23

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'enclosure 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 des besoins opérationnels. La technique de dragage telle que définie dans l'arrêté préfectoral consiste à prélever à marée basse les sédiments dans la zone de dragage de l'avant-port et 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 Briec 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 dans la configuration actuelle du port et en lien avec ses principales étapes de développement ;
- 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 ;
- Évaluer 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 ;

Rapport de la phase n°3B : Rechargement Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

- 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.

Dans la première partie de la phase 3, le fonctionnement hydrodynamique et hydro-sédimentaire du site d'étude a été analysé pour les différents scénarios de gestion des sédiments ou d'aménagement définis en réunions de concertation (après les deux premières phases du projet).

Dans la deuxième partie de la phase 3, le travail de modélisation vise à décrire le fonctionnement hydrodynamique et hydro-sédimentaire du site d'étude pour différents scénarios de rechargement de la plage du Valais.

Ce document qui constitue le 2eme rapport de la phase 3, est composé des volets suivants :

- Présentation des scénarios de rechargement de la plage ;
- Présentation du modèle hydro-sédimentaire (rappel et compléments) et des maillages mis en place pour les scénarios de rechargement ;
- Analyse des résultats des différents scénarios (transport sédimentaire, évolutions morphologiques) ;
- Synthèse.

2. PRÉSENTATION DES SCENARIOS DE RECHARGEMENT

Trois configurations de modélisation ont été créées afin de simuler les effets des différentes phases d'aménagement successives sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire et des environs.

Les **trois configurations de rechargement** créées dans le cadre de cette étude sont :

- Scénario 1 : Arasement de la flèche et récupération de ce sable pour recharger la plage du Valais (Partie Nord et Sud, 12 000 m³)
- Scénario 2 : Récupération de 2000m³ de sable de la flèche pour recharger la partie Nord de la plage (partie en dehors de la RN), récupération des sables sur l'extrémité Est de la flèche
- Scénario 3 : Réensablement de la totalité de la plage à partir du sable dragué dans le port (moitié nord de la zone de dragage où la part sableuse est plus importante). Volume : 12 000 m³. La flèche n'est pas modifiée.

2.1 CARACTÉRISATION DES SABLES ENVISAGES POUR LE RECHARGEMENT

Afin de caractériser les sables qui seront potentiellement utilisés pour le rechargement (sables de l'avant-port « AVP » ou prélevé sur la flèche sédimentaire « FLECHE »), et afin de comparer leurs caractéristiques granulométriques et de densité et celles du sable qui avait été utilisé lors du précédent rechargement (prélevé par la CAN sur le banc de la Horaine « CAN »), des prélèvements ont été effectués sur site puis analysés.

Les localisations des stations de prélèvement sont illustrées sur la Figure 2-1, et des photographies des différents sites et échantillons sont présentées sur les Figure 2-2 et Figure 2-3.

Prélèvements sédimentaires, zones « CAN », « AVP », « Flèche » et « Valais » (22/08/2023)

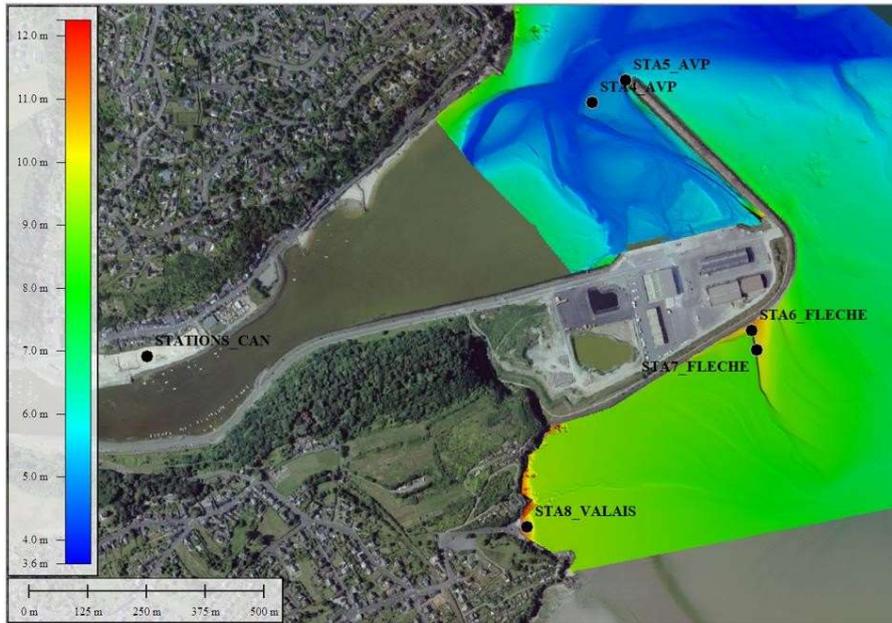


Figure 2-1 Localisation des prélèvements sédimentaires effectués sur site le 22 Août 2023.

Prélèvements sédimentaires, zones « CAN », « AVP », « Flèche » et « Valais » (22/08/2023)

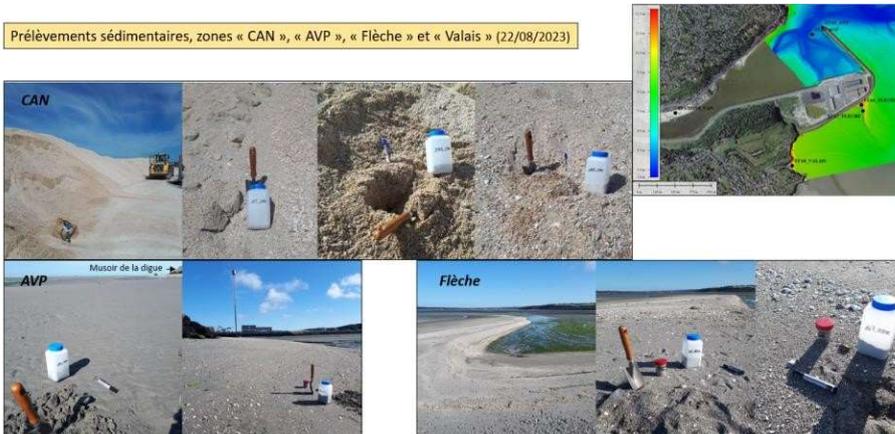


Figure 2-2 Photographies des différentes stations d'échantillonnage et des prélèvements sédimentaires.



Figure 2-3 Photographies des différentes stations d'échantillonnage et des prélèvements sédimentaires.

Les analyses sédimentaires réalisées sur les différents échantillons prélevés sont les suivantes :

- Analyse granulométrique par tamisage (Figure 2-4)
- Mesure de densité sur la fraction sédimentaire supérieure à 63 μm (i.e. fraction non-cohésive ; cf. Figure 2-5)

Les résultats d'analyse sont les suivants :

- Sable coquillier du banc de la Horaine, de la même provenance que celui utilisé pour le premier rechargement de 2019 (stations « CAN ») : densité faible de 1750 kg/m³ en moyenne et un D50 relativement grossier de 1 mm ;
- Sable de l'avant-port (stations « AVP ») : sable fin de 150 μm (D50) présentant une densité moyenne plus élevée de 2450 kg/m³ ;
- Sable de la flèche sédimentaire (stations « FLECHE ») : sable grossier de 1 mm (D50) présentant également une densité moyenne autour de 2450 kg/m³.

À noter qu'un prélèvement sédimentaire a également été réalisé sur la plage du Valais. Les analyses indiquant que ce sable présente des caractéristiques granulométriques et de densité proches de celles du sable de la flèche.

Rapport de la phase n°3B : Rechargement Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

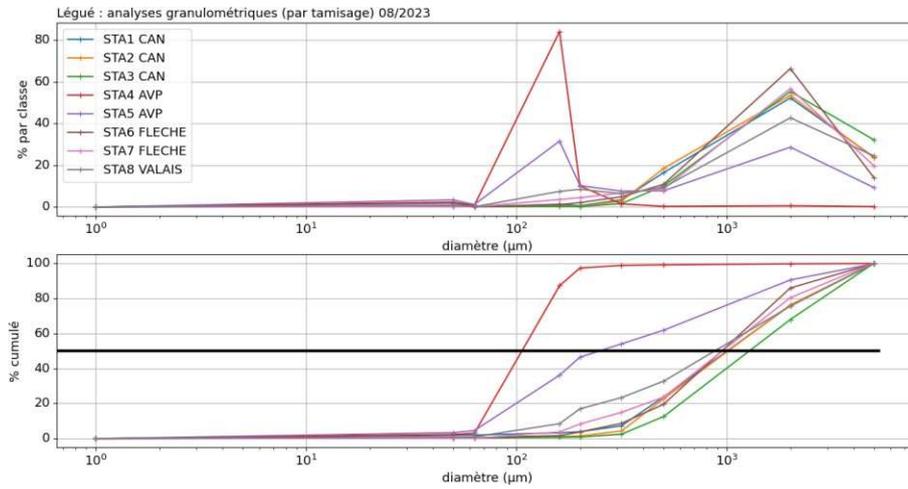


Figure 2-4 Résultats des analyses granulométriques aux différentes stations.

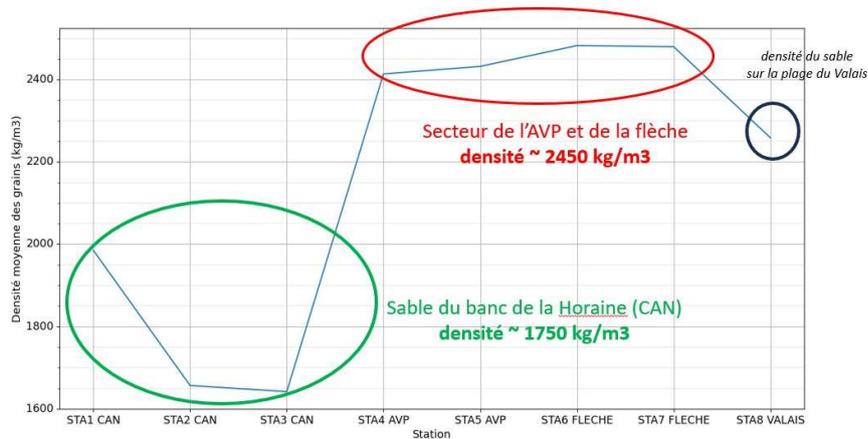


Figure 2-5 Résultats des mesures de densité aux différentes stations.

3. MISE EN PLACE DES MODÉLISATIONS

3.1 MODÉLISATIONS 2D TELEMAC-TOMAWAC-SISYPHE

3.1.1 CODES DE CALCUL ET PARAMÉTRISATION

Les codes de calculs, les conditions limites et les paramétrisations utilisées dans le cadre de cette phase 2 sont similaires à ceux utilisés en phase 1, seuls les maillages et les bathymétries associées diffèrent dans le but de représenter les configurations historiques. 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.

Rapport de la phase n°3B : Rechargement Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

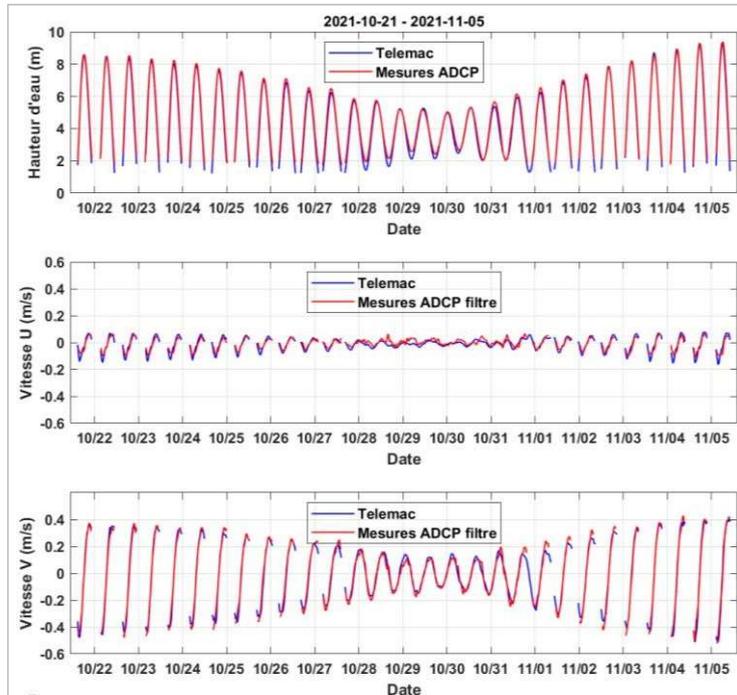
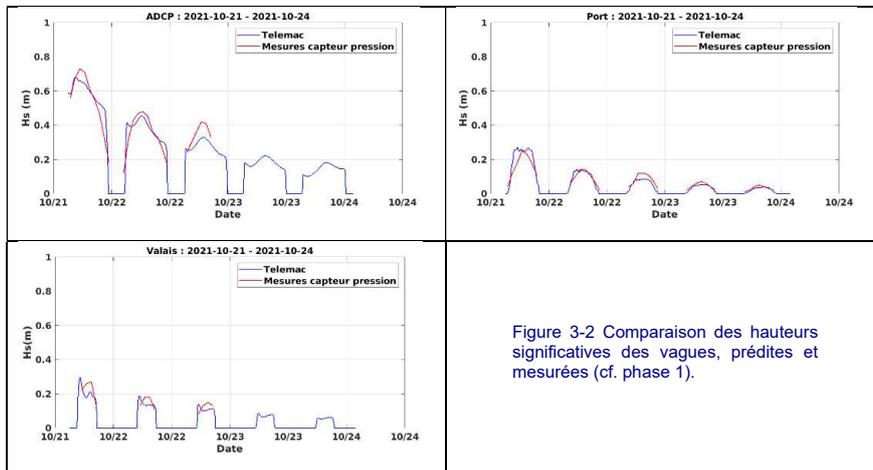


Figure 3-1 Comparaison des hauteurs d'eau et des courants, prédits et mesurés (cf. phase 1).



3.1.2 GÉNÉRATION DES MNTS POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE RECHARGEMENT À SIMULER

Le levé de référence utilisé comme base pour la génération des MNTs des différents scénarios correspond au levé de février 2023 réalisé par la CCI22, complété par le levé RGE Alti à la côte et le MNT HOMONIM au large.

3.1.2.1 Définition des projets de rechargement de la plage du Valais grâce à l'outil CDBeach

Les projets de rechargement ont été réalisés à partir de l'outil python CDBeach (Conception et Dimensionnement de plage), développé spécifiquement par la société BW-CGC. Cet outil permet notamment :

- D'itérer sur un grand nombre de profils cross-shore le long du linéaire de plage, pouvant être contraints par des zones ou des isobathes au large ou à la côte, et ainsi d'estimer précisément la topo-bathymétrie finale du projet et les volumes sédimentaires mis en jeu.
- La prise en compte de différents critères de pente, d'épaisseur de sable et de remblai le long de chaque profil.
- La mise en place d'une conception à plusieurs couches (e.g. remblai, couches filtres, carapace ; caractérisées par des blocométries et des épaisseurs spécifiques), avec la prise en compte d'ouvrages :
 - de confortement ou de butée (e.g. permettant de « percher » la plage sur des secteurs plus profonds) ;
 - de haut de plage (e.g. plans verticaux ou inclinés ; marches de type casiers ensablés).

Pour les 3 scénarios de rechargement (sans remblais et sans ouvrages additionnels), trois lignes de contraintes sont introduites :

- l'isobathe du haut de plage, fixée à la cote +12.5 m CM
- la nouvelle localisation de l'isobathe +11 m CM, plus ou moins éloignée vers le large en fonction du scénario (i.e. du volume de sable disponible pour le rechargement)
- la limite du bas de plage, également plus ou moins éloignée vers le large en fonction du scénario (i.e. du volume de sable disponible pour le rechargement)

Au-delà de l'isobathe +11 m CM, le profil de plage rechargé correspond à l'intersection de pentes à 8% et 1% partant respectivement de l'isobathe +11 m CM et de la limite de bas de plage (cf. coupes-types illustrées par la suite). La distance entre l'isobathe +12.5 m CM et la nouvelle isobathe +11 m CM variant latéralement, la pente du haut de plage varie de quelques pourcents à environ 10-15% sur l'ensemble du linéaire rechargé.

3.1.2.1.1 Scénarios 1 et 3 à 12 000 m³ de sable

Le projet de rechargement à 12 000 m³ a été dimensionné (72 profils espacés tous les 5 m) afin de :

- Permettre de recouvrir les affleurements rocheux. À noter que le rechargement vient cependant s'appuyer sur l'affleurement central séparant les secteurs Nord et Sud de la plage (ce qui contribue à maintenir le sable rechargé)

- Maximiser la largeur de plage sèche pour un niveau de PM moyenne.

Les topo-bathymétries avant et après rechargement sont illustrées sous forme de cartes et de coupes-types sur les figures ci-dessous.

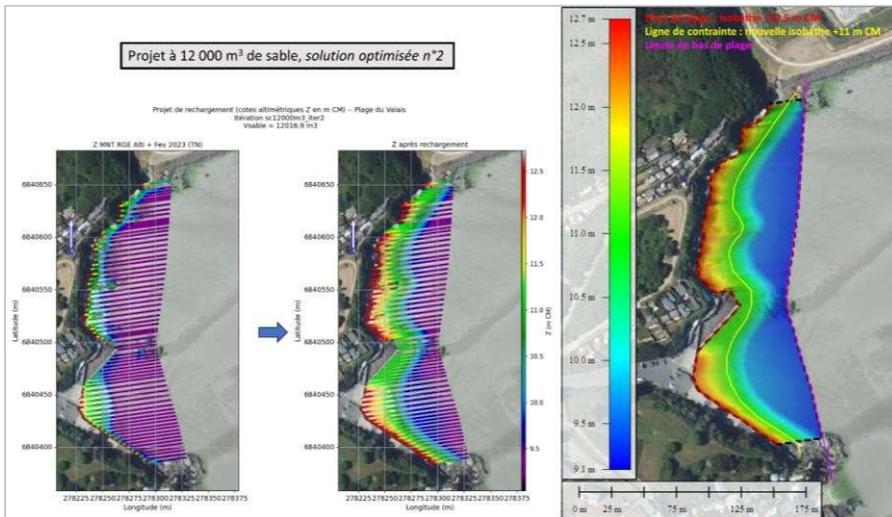


Figure 3-3 Vue en plan du projet de rechargement à 12 000 m³ (scénarios 1 et 3) : cartes avant/après rechargement et localisation des lignes de contraintes utilisées en entrée de CDBeach.

Rapport de la phase n°3B : Rechargement Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

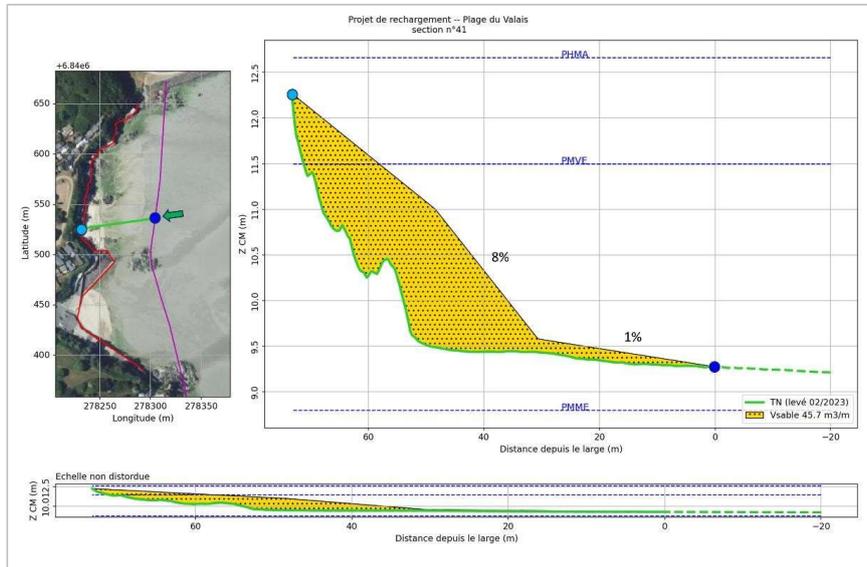


Figure 3-4 Rechargement de 12 000 m³ : exemple de coupe-type (en échelles distordue et non-distordue) pour la section n°41. Rechargement en jaune, TN en vert. Localisation du profil sur la carte de gauche.

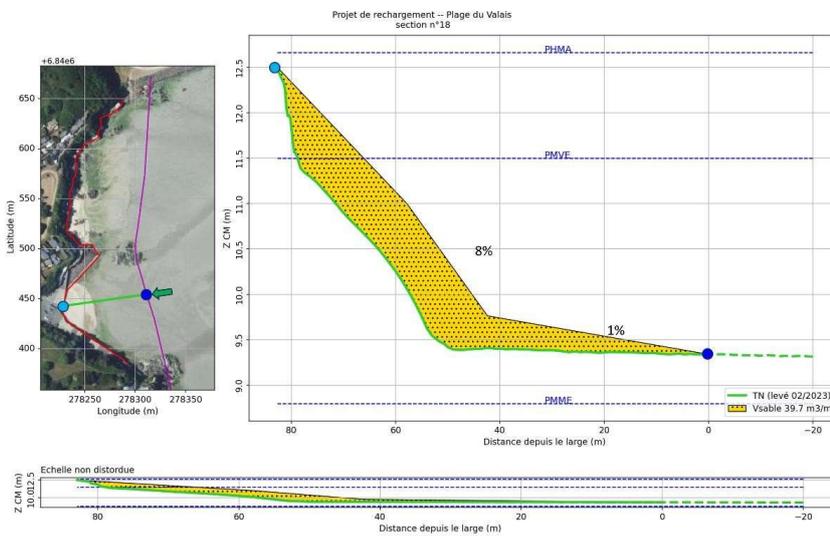


Figure 3-5 Rechargement de 12 000 m³ : exemple de coupe-type (en échelles distordue et non-distordue) pour la section n°18. Rechargement en jaune, TN en vert. Localisation du profil sur la carte de gauche.

3.1.2.1.2 Scénario 2 à 2 000 m³ de sable

Le projet de rechargement à 2 000 m³ a été dimensionné (42 profils espacés tous les 5 m) afin de :

- Permettre de recouvrir les affleurements rocheux ;
- Maximiser la largeur de plage sèche pour un niveau de PM moyenne.

Les topo-bathymétries avant et après rechargement sont illustrées sous forme de cartes et de coupes-types sur les figures ci-dessous.

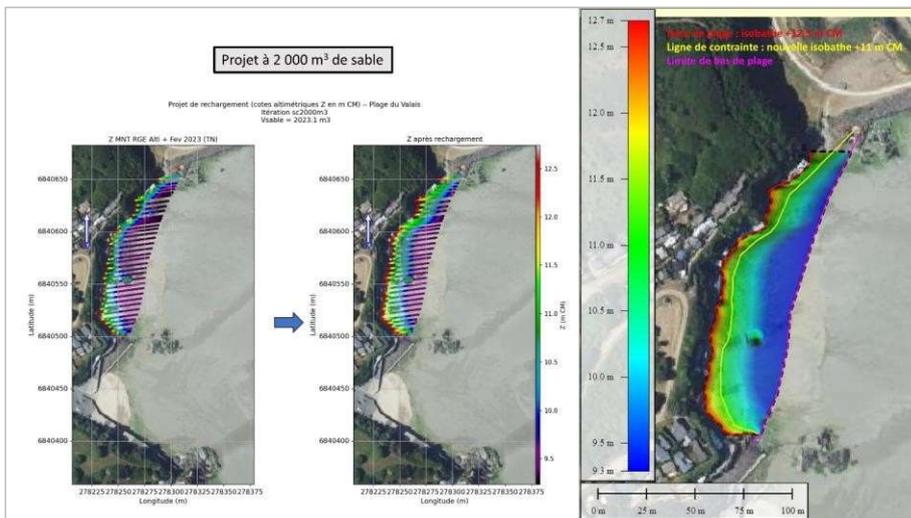


Figure 3-6 Vue en plan du projet de rechargement à 2 000 m³ (scénario 2) : cartes avant/après rechargement et localisation des lignes de contraintes utilisées en entrée de CDBeach.

Rapport de la phase n°3B : Rechargement Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

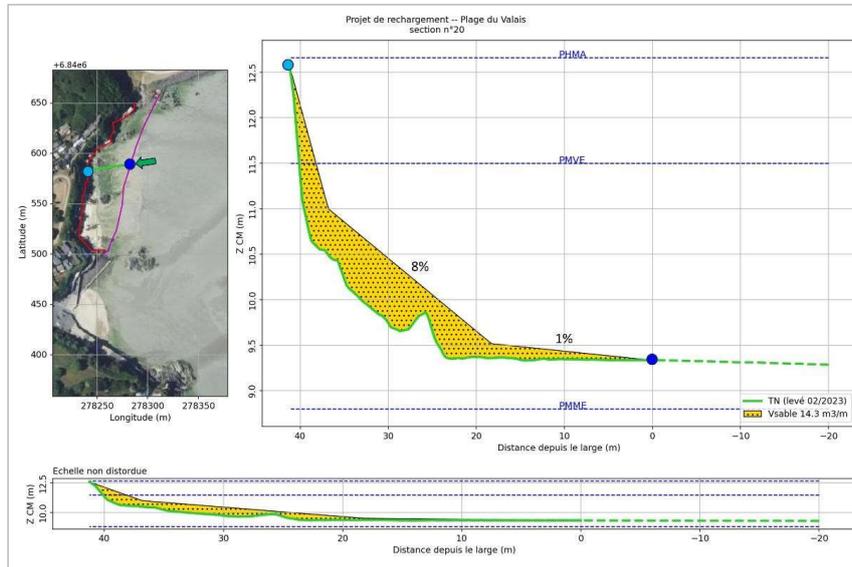


Figure 3-7 Rechargement de 2 000 m³ : exemple de coupe-type (en échelles distordue et non-distordue) pour la section n°20. Rechargement en jaune, TN en vert. Localisation du profil sur la carte de gauche.

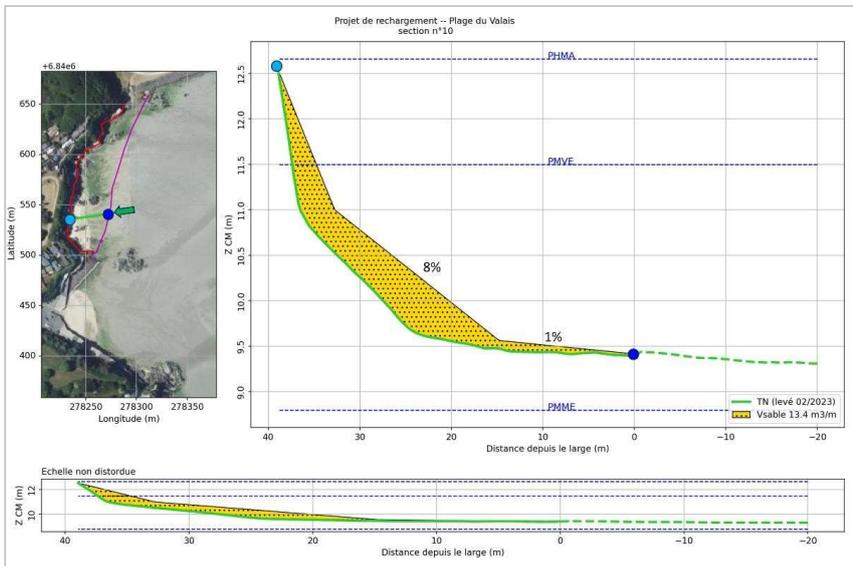


Figure 3-8 Rechargement de 2 000 m³ : exemple de coupe-type (en échelles distordue et non-distordue) pour la section n°10. Rechargement en jaune, TN en vert. Localisation du profil sur la carte de gauche.

3.1.2.2 Arasement de la flèche sédimentaire

Les figures ci-dessous présentent les topo-bathymétries après arasement de la flèche sédimentaire pour le scénario 1 (prélèvement de 12 000 m³ de sable) et le scénario 2 (prélèvement de 2 000 m³ de sable). La zone d'arasement de la flèche est délimitée par l'isobathe +8.65 m CM (partie distale de la flèche uniquement dans le cas d'un transfert de sable de 2000 m³ vers la plage).

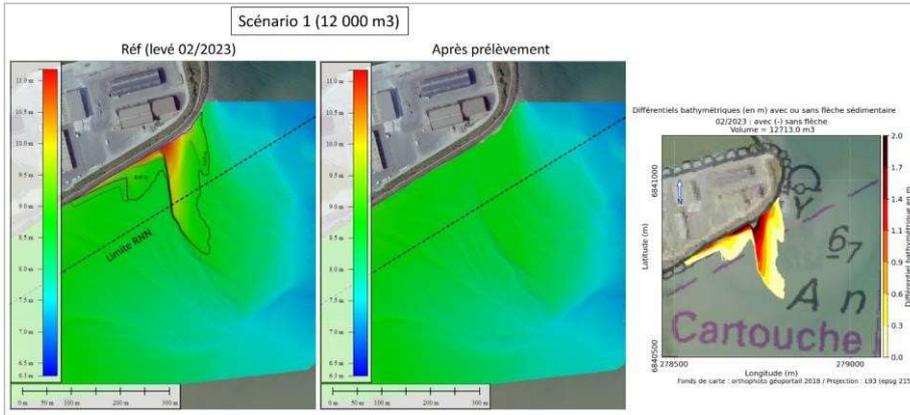


Figure 3-9 Topo-bathymétries avant et après arasement de la flèche sédimentaire pour le scénario 1 (prélèvement de 12 000 m³ de sable)

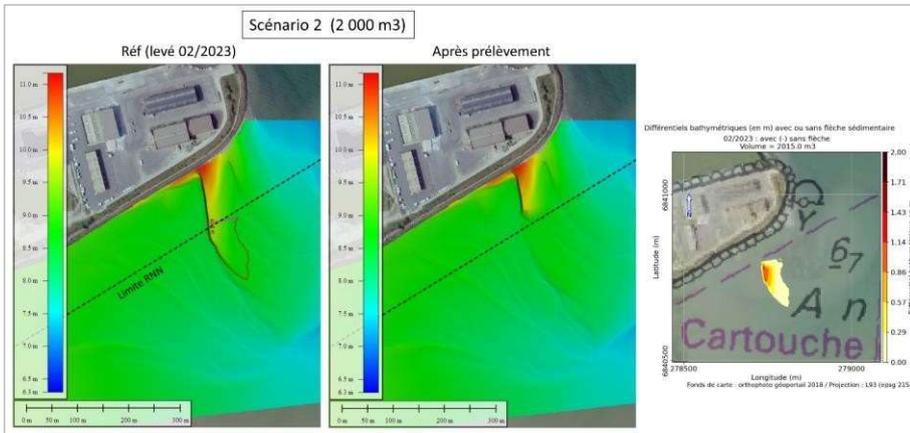


Figure 3-10 Topo-bathymétries avant et après arasement de la flèche sédimentaire pour le scénario 2 (prélèvement de 2 000 m³ de sable)

3.1.2.3 Constitution des MNTs

Les MNTs relatifs à chaque scénario après prélèvement et rechargement sont présentés sur les figures ci-dessous.

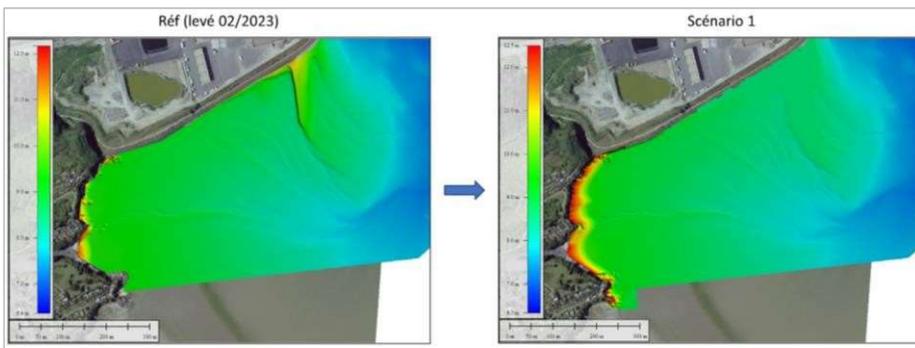


Figure 3-11 Comparaison du MNT de référence (levé CCI 02/2023) et de celui défini pour le scénario 1.

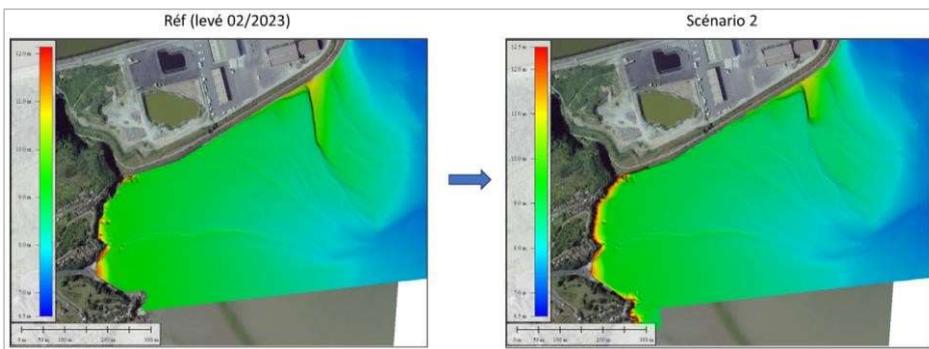


Figure 3-12 Comparaison du MNT de référence (levé CCI 02/2023) et de celui défini pour le scénario 2.

Rapport de la phase n°3B : Rechargement Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

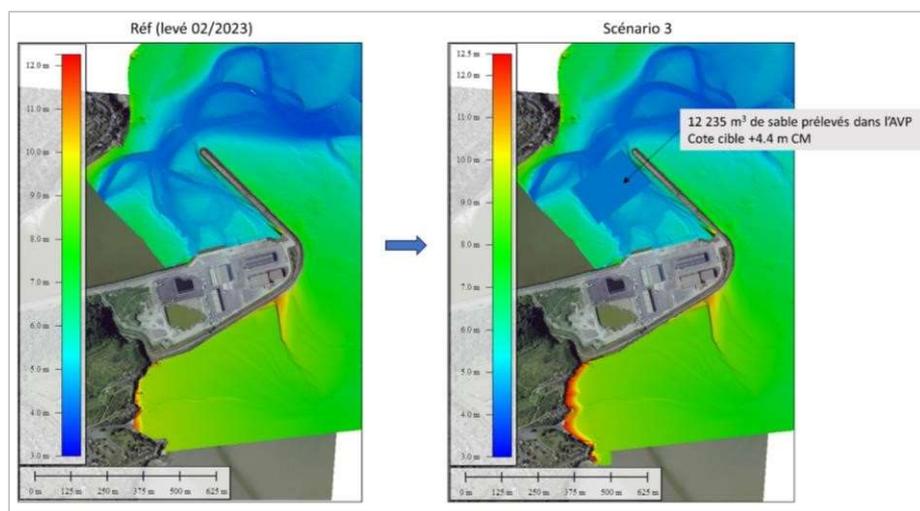


Figure 3-13 Comparaison du MNT de référence (levé CCI 02/2023) et de celui défini pour le scénario 3.

3.1.3 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.

Pour les trois configurations de rechargement, la résolution du modèle peut atteindre quelques kilomètres au large et s'affine 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, de 5 m entre la flèche et la plage du Valais, 2 m au niveau de la flèche sableuse et 1 m au niveau de la plage du Valais. Le maillage est composé de 58 112 nœuds.

Le choix de la résolution du maillage dans la zone d'étude est fait en fonction de la résolution des données bathymétriques, 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.

Les bathymétries prises en compte pour les différents maillages correspondent aux MNTs assemblés (cf. section précédente).

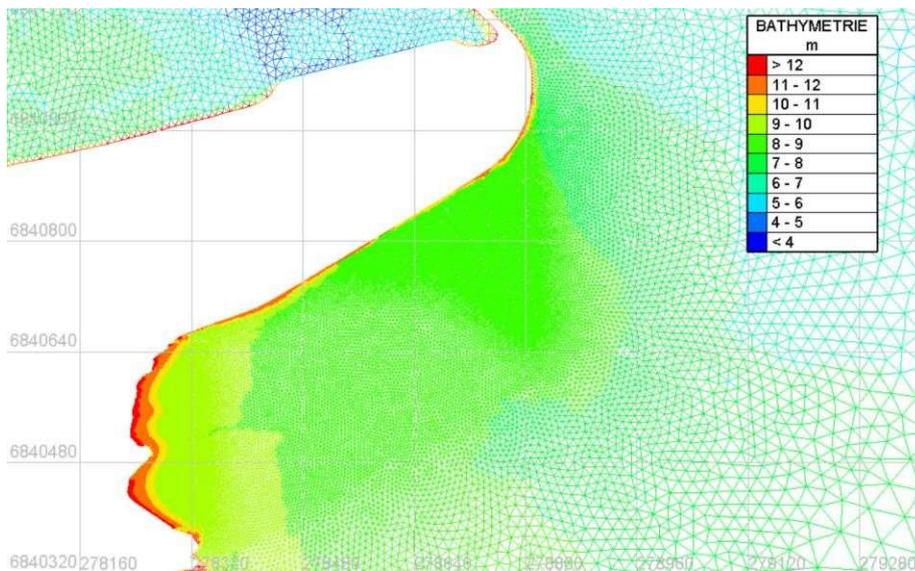


Figure 3-14. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation scénario 1 : zoom sur la zone d'étude.

Rapport de la phase n°3B : Rechargement
Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux
opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

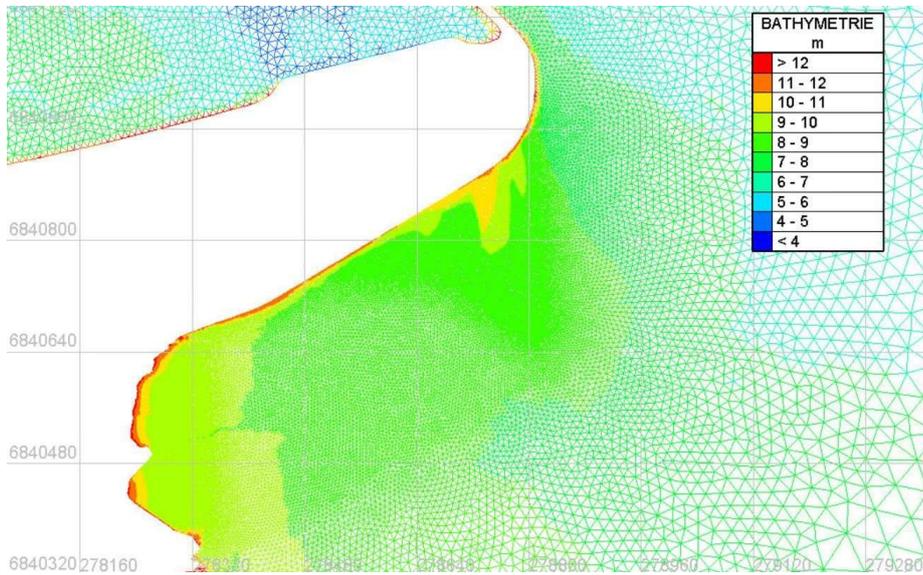


Figure 3-15. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation scénario 2 : zoom sur la zone d'étude.

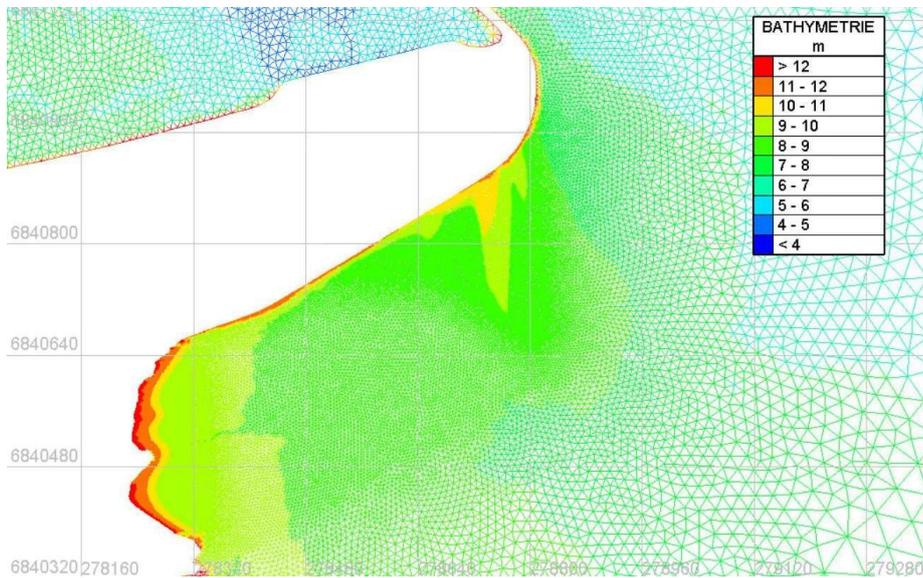


Figure 3-16. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation scénario 3 : zoom sur la zone d'étude.

3.1.4 CONDITION HYDRODYNAMIQUE SIMULÉE

La stratégie de modélisation consiste à simuler 15 jours avec un facteur morpho dynamique de 25 permettant ainsi d'obtenir des évolutions morphologiques à l'échelle annuelle (meilleur compromis entre les processus physiques pris en compte par le modèle tout en garantissant des temps de calcul acceptables). Il est cependant nécessaire d'identifier au préalable la période de 15 jours dont les conditions hydrodynamiques (vagues incidentes et niveaux d'eau) sont les plus représentatives d'une distribution statistique moyenne annuelle. La grandeur physique retenue ici afin d'identifier cette période correspond au runup R2, particulièrement pertinent afin de traduire la capacité d'un événement donné à éroder une plage. Le R2 correspond au niveau atteint par le jet de rive pour n'importe quelle combinaison de condition de vagues au large, de niveau d'eau, et de pente de plage (formulation de Stockdon et al., 2006, modifiée pour le cas d'un profil de plage bilinéaire). La méthodologie mise en place afin d'identifier cette période a été la suivante :

- 1) Extraction d'un profil topo-bathymétrique cross-shore à partir du MNT relatif au scénario 1 (prélèvement de 12 000 m³ au niveau de la flèche pour recharger l'ensemble du linéaire de la plage du Valais). L'extrémité maritime du profil correspond à un point de sortie de la réanalyse RESOURCECODE (Ifremer) fournissant les conditions de vagues incidentes sur la période 1994-2022 (cf. Figure 3-17).
- 2) Extraction des conditions de vagues au point RESOURCECODE et calcul d'une prédiction de marée sur la même période à partir de l'atlas FES2014.
- 3) Réanalyse du runup R2 selon une approche itérative (cf. Figure 3-18). Pour une combinaison donnée de vagues au large et de niveau d'eau, un premier calcul est réalisé en considérant la pente moyenne à l'échelle du profil, puis une seconde estimation est effectuée en intégrant la pente de haut de plage effectivement vue par le jet de rive pour le niveau d'eau considéré (i.e. pente entre le haut du profil et le niveau de R2 calculé lors de la première itération).
- 4) Calcul des percentiles 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 et du max. de R2 pour chaque période de 15 jours entre 1994 et 2022 (période décalée de 1 jour à chaque itération, soit un découpage de la série en 10 546 échantillons de 15 jours) en respectant les critères suivants :
 - seuls les échantillons de 15 jours possédant au moins 5 niveaux de PM supérieurs à +11 m CM sont conservés ;
 - les calculs de percentiles ne sont réalisés que pour un niveau de marée supérieur à +10 m CM (soit approximativement le bas de la pente sableuse en configuration rechargée)
- 5) Identification de la période présentant la plus faible erreur quadratique moyenne sur l'ensemble des percentiles par rapport aux paramètres statistiques calculés sur l'ensemble de la période 1994-2022 (Note : le calcul d'erreur est pondéré en fonction des percentiles : coefficient 0.5 pour les p10 et p25 ; 1 pour les p50, p75 et p90 ; 2 pour le p95 ; 3 pour le p99 et le max ; cf. Figure 3-20)

La période de 15 jours présentant la distribution la plus représentative de R2 par rapport à celle calculée sur la période 1994-2022 est la suivante : du 13 au 28 février 2017 (Figure 3-19 ; Figure 3-20).

Rapport de la phase n°3B : Rechargement
Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux
opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

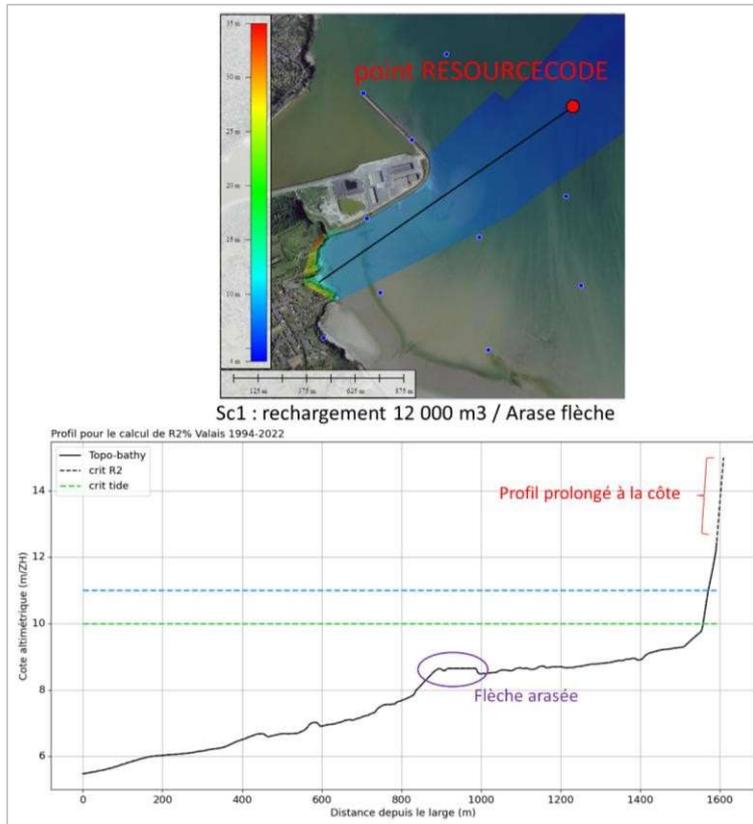


Figure 3-17 Profil topo-bathymétrique utilisé pour la réanalyse de R2 à partir de la base de données RESOURCECODE (correspond au scénario de rechargement n°1).

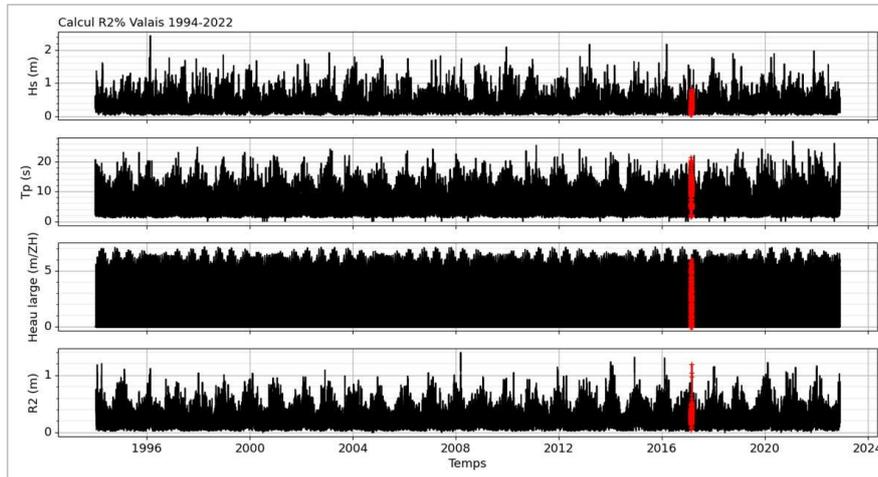


Figure 3-18 Réanalyse de R2 calculée à partir de la base de données RESOURCECODE (point d'extraction des vagues et profil considéré illustrés sur la Figure 3-17)

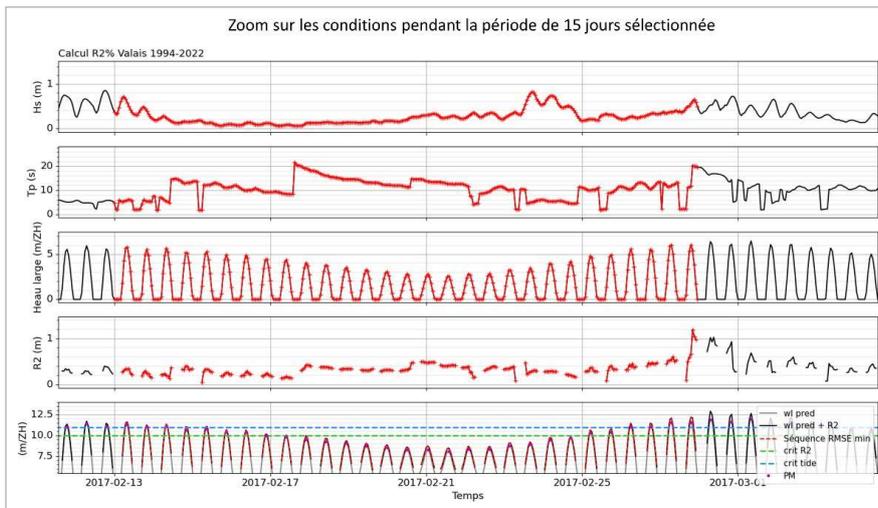


Figure 3-19 Période de 15 jours sélectionnée pour les simulations morpho dynamiques TELEMAC 2D.

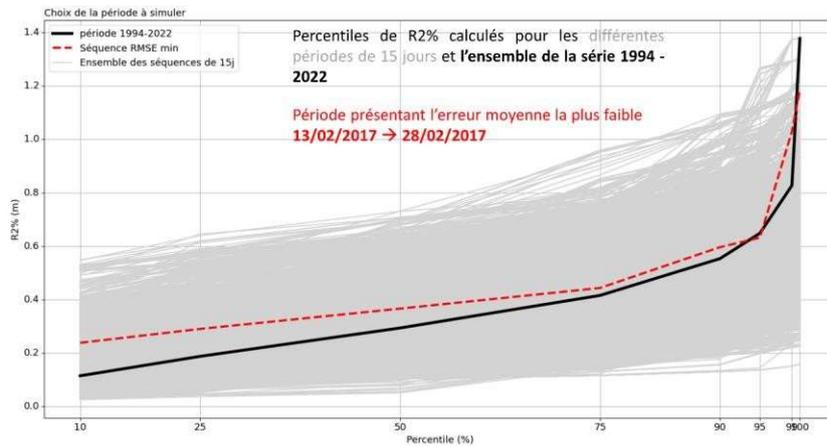


Figure 3-20 Réanalyse de R2 : période présentant la plus faible erreur quadratique moyenne sur l'ensemble des percentiles par rapport aux paramètres statistiques calculés sur l'ensemble de la période 1994-2022 (période sélectionnée pour les simulations morpho dynamiques TELEMAC 2D).

3.1.5 MOBILITÉ DU FOND SÉDIMENTAIRE ET PARAMÉTRAGE DU MODELÉ SÉDIMENTAIRE SISYPHE

Pour chacun des scénarios de rechargement, deux types de simulations morpho dynamiques ont été réalisées :

- Simulations A : Seul le sédiment rechargé est mobile (fond dur à la base du rechargement et en dehors de la zone rechargée)
- Simulations B : Le sable est mobile sur l'ensemble du domaine de calcul

Les simulations ont été réalisées en appliquant un facteur morpho dynamique de 25 pour représenter 1 an à partir d'une simulation de 15 jours. Afin de prévenir le développement d'instabilités numériques (du fait du facteur morpho dynamique relativement élevé), les pentes supérieures à 10° sont lissées de façon itérative jusqu'à respecter ce critère.

Différentes classes de sables sont considérées selon les simulations.

Les simulations A tiennent compte des caractéristiques granulométriques (D50) et de densité (ρ_s) des sources de sables potentiellement identifiées pour le rechargement de la plage du Valais (déduites des analyses réalisées à partir des échantillons prélevés sur site) :

- Simulation « 1A » relative au scénario de rechargement 1 : D50= 1mm et $\rho_s=2450 \text{ kg/m}^3$ (sable de la flèche)
- Simulation « 2A » relative au scénario de rechargement 2 : D50= 1mm et $\rho_s=2450 \text{ kg/m}^3$ (sable de la flèche)
- Simulation « 3A » relative au scénario de rechargement 3 : D50= 150 μm et $\rho_s=2450 \text{ kg/m}^3$ (sable de l'avant-port)

Les simulations B sont quant à elles initialisées avec un sable de 125 μm de 2650 kg/m^3 de densité (20 m de disponible sédimentaire), conformément au paramétrage sédimentaire adopté lors des phases précédentes de l'étude.

3.2 MODÉLISATION 1D XBEACH

3.2.1 PRÉSENTATION DU MODELÉ ET OBJECTIFS

XBEACH (eXtrem Beach behaviour ; Roelvink et al., 2009) est un modèle hydro-morpho-sédimentaire résolvant les équations à deux dimensions horizontales pour la propagation des vagues, les circulations, le transport sédimentaire (capacité de transport par charriage et en suspension) et l'évolution de la morphologie. Ce code communautaire a été initialement développé pour reproduire les processus hydro- et morpho dynamiques du haut de plage et notamment l'érosion des dunes soumises à des contraintes hydrodynamiques extrêmes (overwash, submersion). Un des avantages de XBEACH est sa capacité à modéliser les processus physiques à différentes échelles temporelles. En effet, suivant le choix de l'utilisateur, des simulations stationnaires (modèle à phase moyennée négligeant la dynamique à l'échelle infragravitaire) ou instationnaires en mode « surf-beat » (modèle à phase moyennée prenant en compte la dynamique à l'échelle infragravitaire) ou « à résolution de phase » (terme de pression non-hydrostatique) sont possibles.

À la différence du système de modélisation TELEMAC, le modèle XBeach permet de rendre compte implicitement des circulations cross-shore induites par les vagues, en particulier le courant de retour par le fond (ou « undertow ») responsable du transport des sédiments vers le large en conditions de vagues énergétiques. Ce modèle est ici implémenté en mode « surfbeat » en configuration 1DH le long du profil cross-shore illustré sur la Figure 3-17 (relatif au scénario 1). À noter que le profil cross-shore sélectionné est identique à celui utilisé pour la réanalyse de R2 (cf. section relative au choix de la période à simuler avec TELEMAC). En complément des simulations morpho dynamiques TELEMAC, ce modèle XBeach vise à :

- Caractériser le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques susceptibles d'intervenir « dans le profil » pour des conditions de vagues énergétiques potentiellement érosives (valeurs de R2 élevées associées à des niveaux d'eau défavorables supérieurs à +10.5 m CM ; cf. section suivante présentant les conditions simulées).
- Apporter des éléments de réponse sur la mauvaise tenue du premier rechargement de la plage du Valais réalisé en 2019, et fournir des éléments complémentaires permettant de statuer sur la meilleure source de sable pour le futur rechargement (i.e. sable en provenance de l'avant-port ou de la flèche sédimentaire).

Le modèle est configuré de la manière suivante :

- 1DH, mode « surfbeat » :
- Résolution horizontale fixée à 1 m au « large » et raffinée à 0.5 m sur la plage (i.e. $z > +9.5$ m CM) ;
- Forçage à l'extrémité maritime du profil : conditions de vagues issues de la réanalyse RESOURCECODE (cf. section suivante relative aux conditions simulées).
- Formules de transport sédimentaire utilisée (suspension et charriage) : Van Thiel et Van Rijn (Van Rijn, 2007a, 2007b ; Van Thiel de Vries, 2009).
- Pas de couplage morpho dynamique : les évolutions dans le profil sont analysées en relatif, à partir des divergences de flux issues du modèle.

3.2.2 CONDITIONS SIMULÉES

Les conditions de vagues potentiellement les plus érosives ont été recherchées dans la base de données RESOURCECODE (période 1994-2022 ; cf. Figure 3-18).

Les deux périodes différentes sélectionnées sont :

- **Condition A**, période post 2019 (R2 max = 1.22 m)

Date : 2020-02-11 08h

- **Hs : 0.89 m**
- **Tp : 14.93 s**
- **Niveau de marée : 12.02 m ZH Légué**

- **Condition B**, période 1994-2022 (R2 max = 1.4 m)

Date : 2008-03-10 22h (date considérée uniquement pour les conditions de vagues)

- **Hs : 0.98 m**
- **Tp : 17.86 s**
- Niveau de marée : même niveau que le cas A

Pour chaque condition hydrodynamique, 3 types de sable sont testés :

- **Cas 1** : $d_{50}=150 \mu\text{m}$ et $\rho_{\text{hos}}=2450 \text{ kg/m}^3$, représentatif du sable de l'**AVP (avant-port)**
- **Cas 2** : $d_{50}=1 \text{ mm}$ et $\rho_{\text{hos}}=2450 \text{ kg/m}^3$, représentatif du sable de la **flèche**
- **Cas 3** : $d_{50}=1 \text{ mm}$ et $\rho_{\text{hos}}=1750 \text{ kg/m}^3$, représentatif du sable de la **CAN (sable coquillier prélevé au large au niveau du banc de la Horaine)**

Le sable de la CAN, relativement grossier et très peu dense (cas 3), a été utilisé en 2019 pour recharger la plage du Valais. Le volume rechargé a rapidement été repris par les courants de marée et les vagues. **L'objectif est ici d'évaluer si un sable plus dense, en provenance de l'AVP ou de la flèche, permettrait une meilleure tenue du rechargement.**

4. RÉSULTATS DU MODELÉ MORPHO DYNAMIQUE 2D (TELEMAC-TOMAWAC-SISYPHE)

4.1.1 SIMULATIONS A : MOBILITÉ UNIQUEMENT DES SÉDIMENTS RECHARGES

Les simulations morpho dynamiques A se concentrent uniquement sur le devenir du volume de sable rechargé pour chaque scénario (fond « dur » prescrit à la base du rechargement, i.e. TN de Février 2023, et partout en dehors de la zone rechargée). L'évolution du stock sableux à l'échelle de la zone rechargée peut donc être analysée spécifiquement en fonction de la granulométrie du sable.

4.1.1.1 Transport solide résiduel

Les cartes de transport solide résiduel des simulations 1A et 2A (i.e. volumes rechargés de 12 000 m³ et 2000 m³, respectivement, avec le sable de la flèche de 1 mm) présentent des gradients et des intensités de flux sableux relativement similaires, passant de 10⁻² à 10⁻³ m³/m entre le bas et le haut de plage. On peut cependant noter que les flux sont légèrement plus importants sur le haut de plage dans la simulation 1A, probablement du fait de l'arasement total de la flèche et donc de la protection moindre vis-à-vis des vagues incidentes. Cependant, les flux en question restent faibles (< 5.10⁻³ m³/m). L'orientation des flux solides est principalement cross-shore et vers la côte pour ces deux scénarios.

Avec le scénario 3A correspondant à un rechargement de 12 000 m³ de sable fin (issu de l'AVP), les flux sont un ordre de grandeur plus importants. Sur l'essentiel du linéaire, les flux atteignent 10⁻² m³/m sur le haut de plage et sont orientés vers le Sud (composante longshore dominante). En partie Sud de la plage, un transport résiduel longshore convergent est modélisé, avec des flux orientés vers le SO le long de la cale et vers le NO sur le dernier quart Sud du linéaire. Ce transport longshore convergent sur le haut de plage tend à forcer une dynamique orientée vers le large dans l'axe de la plage Sud. À la différence des scénarios 1A et 2A, les résultats de la simulation 3A indiquent que le sable fin rechargé serait préférentiellement transporté vers le Sud depuis la plage Nord, puis vers le large depuis la plage Sud. Sur la base de ces résultats, la tenue du rechargement est donc largement réduite en utilisant le sable fin de l'AVP, en comparaison d'un sable provenant de la flèche.

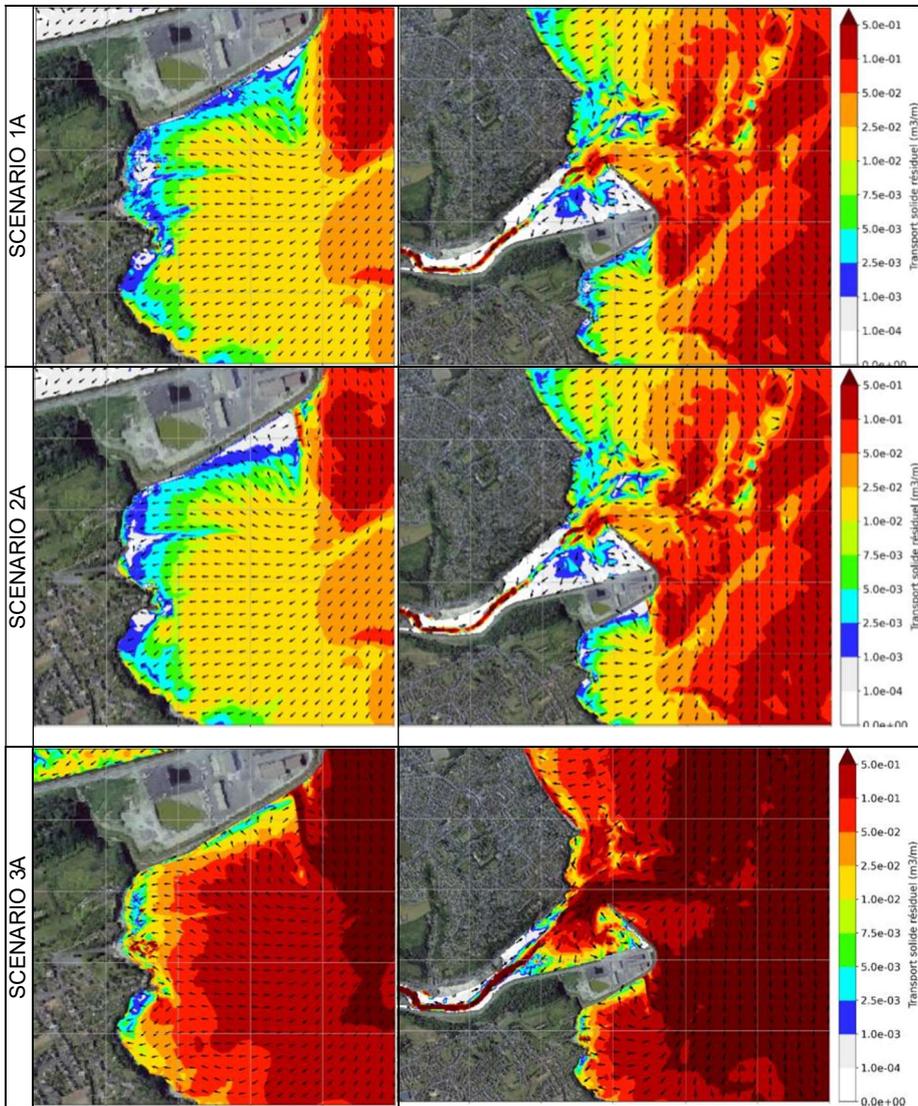


Figure 4-1 Transport solide résiduel sur les 15 jours de simulation pour les 3 scénarios de type A.

4.1.1.2 Évolution des fonds

La comparaison des évolutions morphologiques des fonds entre les simulations 1A/2A (sable de 1 mm prélevé sur la flèche) et 3A (sable de 150 µm issu des dragages de l'AVP) permet de mettre en évidence :

- Des alternances d'érosion/dépôt 2 à 3 fois plus marquées (environ +/- 0.5 m) avec le sable fin de l'AVP, qui interviennent également sur une bande cross-shore plus large, couvrant la quasi-totalité de la zone rechargée. Avec le sable plus grossier prélevé sur la flèche, les évolutions morphologiques, qui se concentrent plus sur le haut de plage sont relativement modestes (+/- 0.1-0.2 m), et ce malgré l'arasement de la bathymétrie sur le secteur de la flèche et donc la plus forte exposition aux conditions hydrodynamiques potentiellement érosives.
- Sur le secteur Sud, une érosion du haut de plage au profit d'une zone de dépôt marquée en bas de plage (et donc plus facilement repris par les courants longshore) pour la simulation 3A, cohérente par rapport au transport sédimentaire résiduel orienté vers le large dans l'axe de cette zone. Ce dépôt préférentiel n'apparaît pas dans la simulation 1A utilisant le sable plus grossier de la flèche.

Les évolutions morphologiques des fonds à l'issue des simulations 1A et 2A, i.e. scénarios à 12 000 m³ et 2 000 m³ de sable en provenance de la flèche, sont très proches. Cela traduit que l'arasement plus ou moins prononcé de la flèche a peu d'incidence sur la tenue du rechargement avec un sable relativement grossier de 1 mm. À noter que si un arasement quasi-total de la flèche a peu d'influence sur la stabilité du rechargement, il pourrait permettre de limiter l'envasement sur le secteur du Valais en favorisant la remise en suspension des fines par les vagues (ou du moins en limitant les séquences de dépôt).

En complément, les évolutions morphologiques des fonds sans effets de pente (critère à 10°) sont présentées en Annexes et permettent de souligner :

- Les contrastes sur les tendances d'érosion/dépôt entre les simulations 1A et 3A ;
- La formation de dépôts en bas de plage uniquement dans la simulation 3A

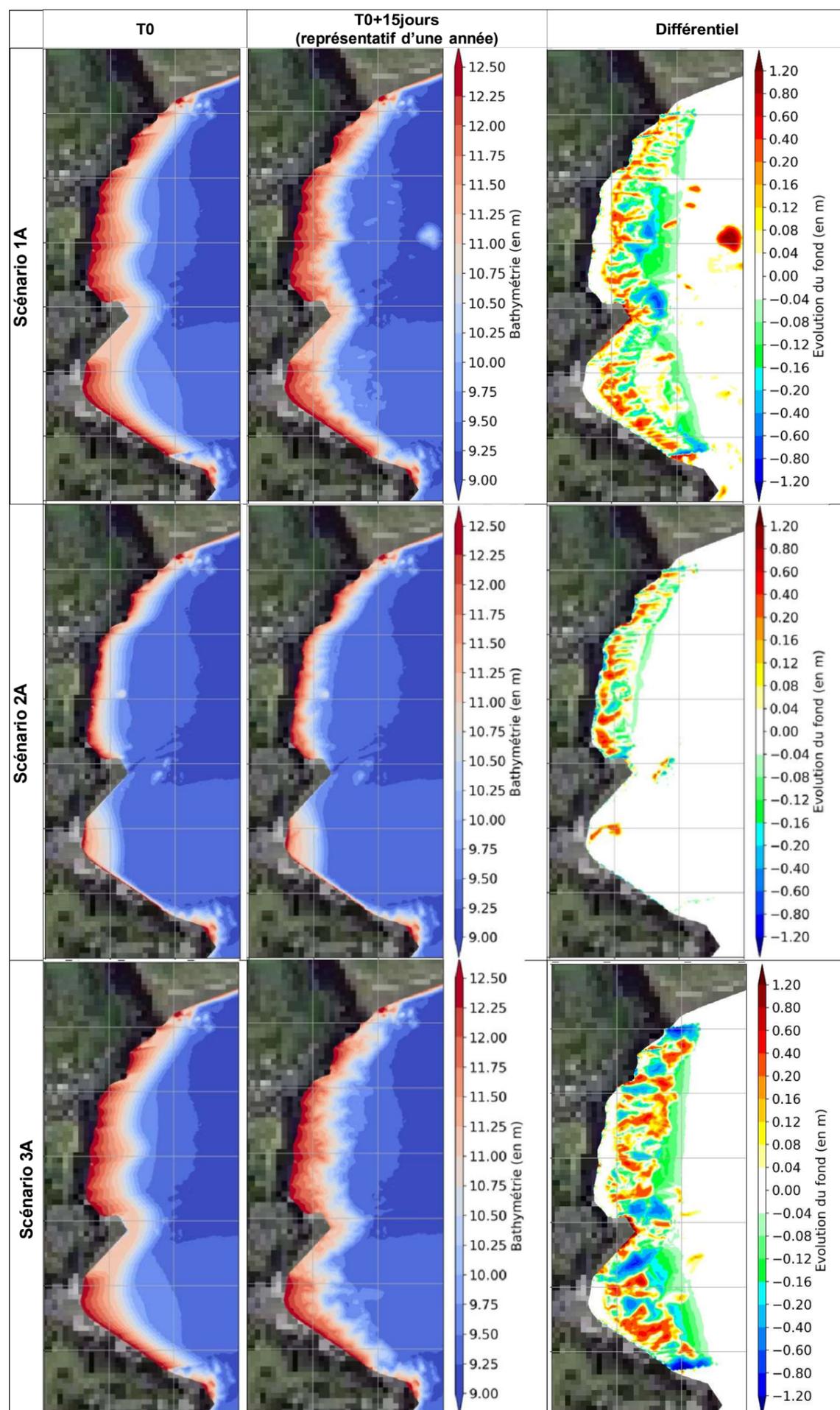


Figure 4-2 Évolution de la bathymétrie entre l'instant initial (gauche), après 15 jours de simulation représentatifs d'une année (facteur morphologique de 25, milieu) et différentiel entre les deux états (droite) - Zoom sur la zone rechargée de la plage du Valais - Scénarios de type A.

4.1.1.3 Évolution du volume de sédiment dans la zone rechargée

À l'issue des simulations morpho dynamiques A représentatives des évolutions intervenant à l'échelle annuelle (facteur morpho dynamique de 25), le volume sédimentaire à l'échelle de la zone rechargée (Tableau 4-1) est réduit de 3.3% et de 0.5% avec le sable de la flèche (1A et 2A) et de 5% avec le sable de l'AVP (3A). Il est important de souligner que malgré le volume comparable et relativement faible de sédiment « perdu » pour les simulations 1A et 3A, les bilans sédimentaires ne permettent ici pas de se prononcer pleinement sur la tenue du rechargement. En effet, contrairement à la simulation 1A, les résultats de transport résiduel et d'évolutions morphologiques des fonds pour la simulation 3A suggèrent :

- Une mauvaise tenue du rechargement sur le secteur Nord du fait d'une dynamique résiduelle longshore sur le haut de plage orientée vers l'anse d'Yffiniac ;
- Une redistribution importante du sable rechargé sur le secteur Sud du fait d'un transport résiduel orienté vers le large dans l'axe de la plage.

Il est également important de rappeler que le système de modélisation TELEMAC ne permet ici pas de reproduire les circulations tridimensionnelles induites par les vagues en conditions énergétiques, et en particulier le courant de retour près du fond orienté vers le large. En prenant en compte ce type de circulation (nécessiterait un modèle 3D avec un formalisme différent pour les forces induites par les vagues), les dépôts sableux sur le bas de plage obtenus avec la simulation 3A seraient probablement transportés plus vers le large, i.e. en dehors de la zone de rechargement, en conditions de vagues énergétiques. Le volume final dans la zone rechargée serait donc probablement significativement réduit pour la simulation 3A. Cette hypothèse est confirmée par les simulations XBeach 1DH présentés dans la section 5.

Tableau 4-1 Évolution des volumes dans la zone rechargée pour les 3 scénarios de type A

Scénario	Volume initial (m ³)	Volume final (m ³)	Évolution
1A	12 000	11 600	-3.3%
2A	2 115	2 105	-0.5%
3A	12 000	11 400	- 5%

4.1.2 SIMULATIONS B : MOBILITÉ DES SÉDIMENTS DANS TOUT LE DOMAINE DE CALCUL.

Les simulations B permettent ici d'évaluer l'influence de l'arasement de la flèche sédimentaire (prélèvement plus ou moins conséquent selon les scénarios 1B et 2B) sur les évolutions morphologiques des fonds des secteurs adjacents.

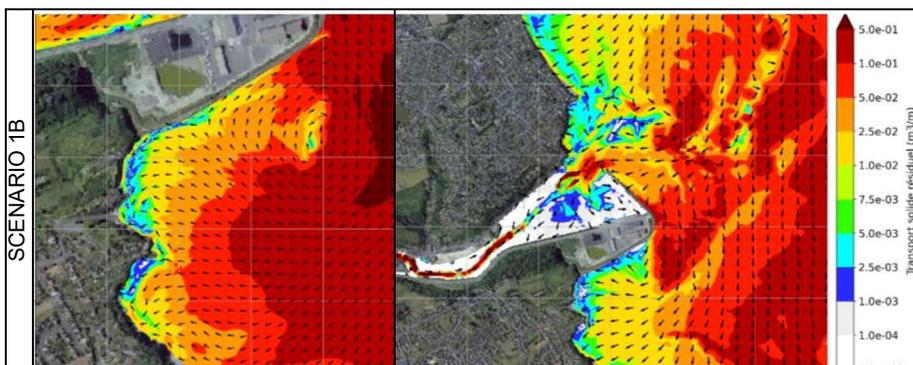
Les évolutions morphologiques les plus contrastées sont obtenues au niveau de la zone de prélèvement ainsi que sur le secteur attenante située dans le prolongement du môle. Pour les simulations 2B et 3B présentant une morphologie de flèche complète ou partiellement arasée, cette dernière est totalement érodée (localisation correspondant au levé de février 2023), tandis qu'un nouveau dépôt se forme à l'extrémité du terre-plein dans le prolongement de l'enracinement du môle en direction du Sud-Est. Pour la simulation 1B pour laquelle la flèche est totalement arasée, seule la zone de dépôt préférentielle dans le prolongement du môle est visible.

Sur les secteurs environnants et en particulier au Sud du terre-plein, les tendances d'évolutions morphologiques, i.e. répartition et intensité des érosions/dépôts, sont très proches pour les 3 simulations. Sur la zone d'estran du Valais localisée entre la flèche et la plage, une tendance à l'accrétion est notamment visible. À noter que ces évolutions morphologiques sont intéressantes en relatif pour réaliser une analyse comparative des simulations, mais ne doivent pas être surinterprétées en absolue. En effet, le diamètre de sable considéré pour les simulations B est de 125 μm (cohérent avec les phases antérieures de l'étude). Afin de simuler des évolutions morphologiques réalistes, et en particulier sur le secteur de la flèche, il serait nécessaire de mettre en place une modélisation sédimentaire multi-classe avec la prise en compte a minima d'une classe de sable supplémentaire plus grossière (1 mm).

Ces résultats nous indiquent cependant que :

- Les prélèvements sédimentaires sur le secteur de la flèche n'ont pas d'influence significative sur les évolutions morphologiques des secteurs environnants.
- La tendance à la régénération de la flèche sédimentaire est simulée quel que soit le scénario. Ce résultat indique qu'il sera possible d'effectuer de futurs rechargements de la plage du Valais, avec un même approvisionnement depuis la flèche, dans le cas où des rechargements d'entretien seraient projetés.

4.1.2.1 Transport solide résiduel



Rapport de la phase n°3B : Rechargement

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

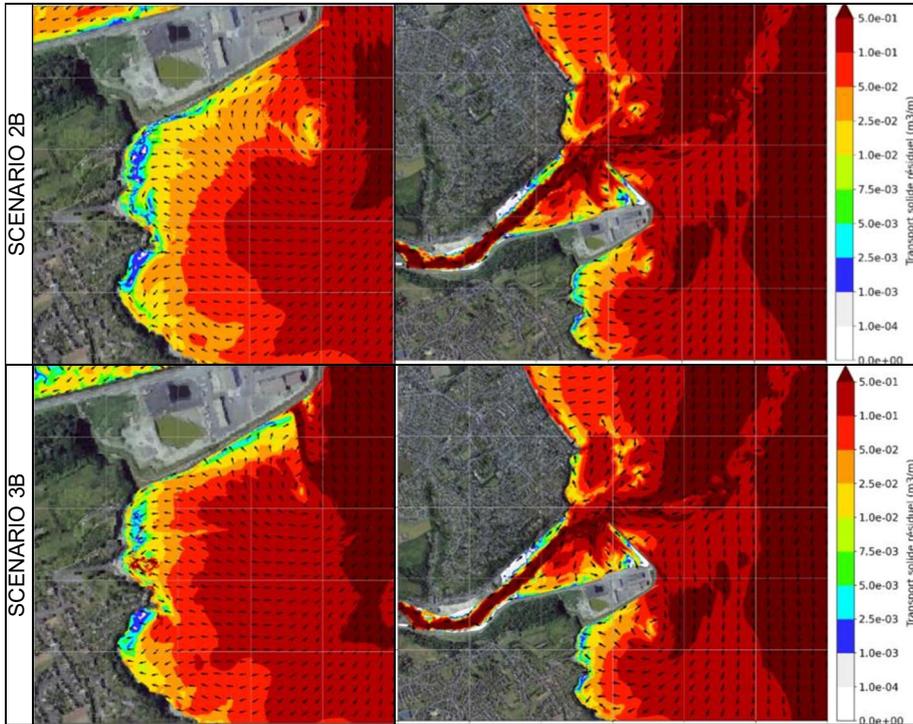
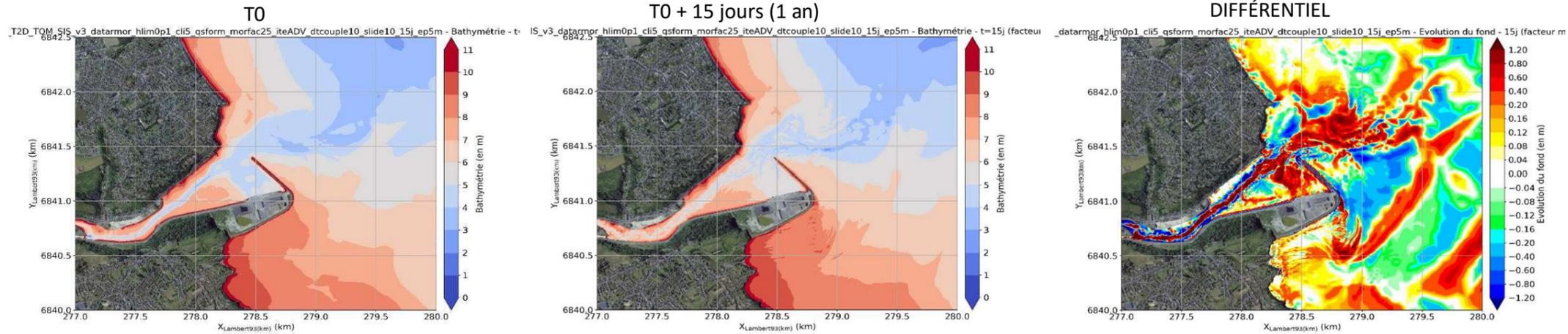


Figure 4-3 Transport solide résiduel sur les 15 jours de simulation pour les 3 scénarios de type B.

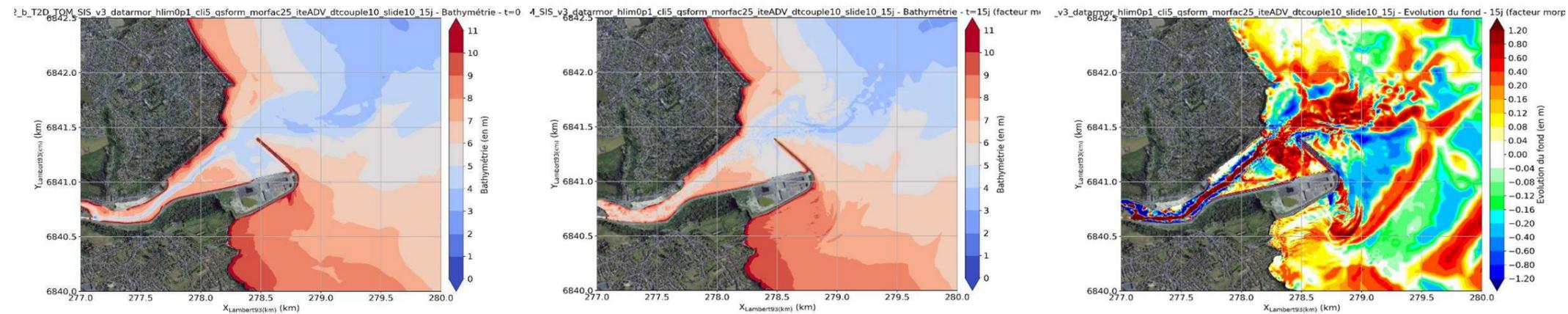
4.1.2.2 Évolution des fonds

ÉVOLUTION DE LA BATHYMÉTRIE

SCENARIO 1B



SCENARIO 2B



SCENARIO 3B

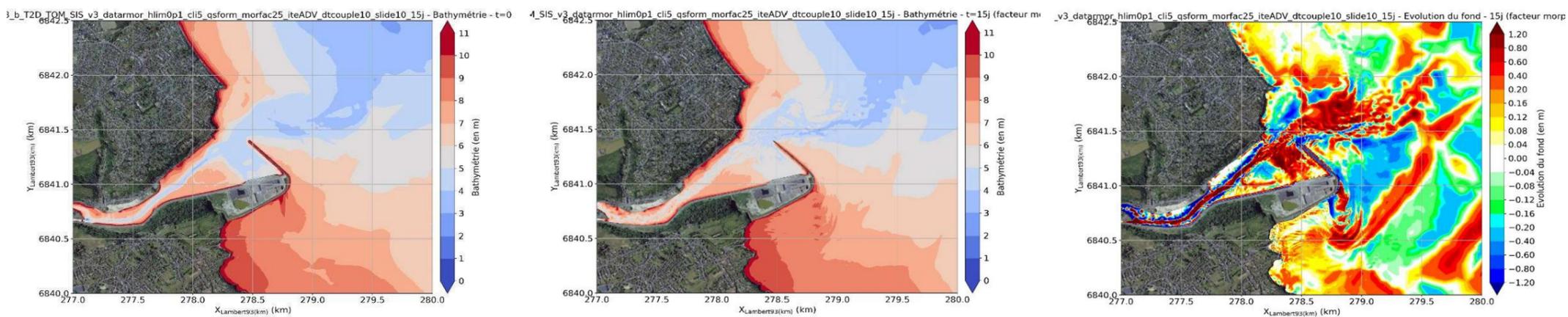


Figure 4-4 Évolution de la bathymétrie entre l'instant initial (gauche), après 15 jours de simulation représentatifs d'une année (facteur morphologique de 25, milieu) et différentiel entre les deux états (droite) - Zoom large – Scénarios de type B.

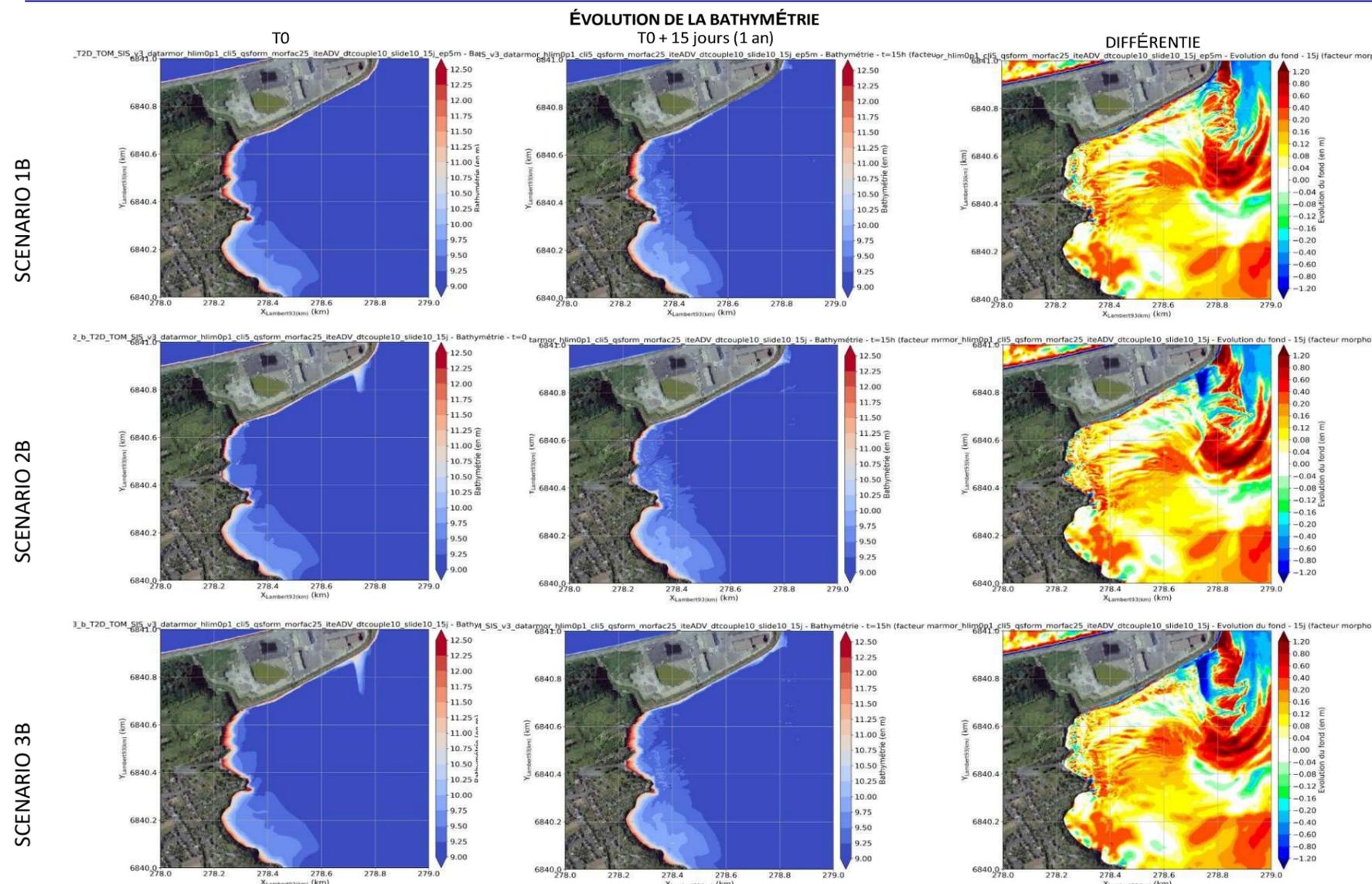


Figure 4-5 Évolution de la bathymétrie entre l'instant initial (gauche), après 15 jours de simulation représentatifs d'une année (facteur morphologique de 25, milieu) et différentiel entre les deux états (droite) - Zoom entre la plage du Valais et la flèche - Scénarios de type B.

5. RÉSULTATS DU MODELÉ 1DH XBEACH

Les conditions hydrodynamiques potentiellement les plus érosives à l'échelle de 2 périodes ont été simulées avec le modèle 1DH XBeach. Ces conditions correspondent aux maximums de R2 obtenus pour un niveau d'eau supérieur à +10.5 m CM pour les deux périodes suivantes :

- Condition A : période 2019-2022 (i.e. depuis le premier projet de rechargement)
- Condition B : période 1994-2022 (ensemble de la période couverte par la réanalyse RESOURCECODE)

Les résultats de modèle étant très proches pour les deux conditions (à la fois qualitativement et quantitativement), seuls ceux relatifs à la condition A sont ici illustrés. Les résultats obtenus pour la condition B sont présentés en Annexes.

Les conditions hydrodynamiques associées au cas A sont illustrées sur la Figure 5-1 (profil de hauteurs de vagues moyennes [Hrms], et variations de surface libre autour du niveau d'eau statique considéré).

Rapport de la phase n°3B : Rechargement Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

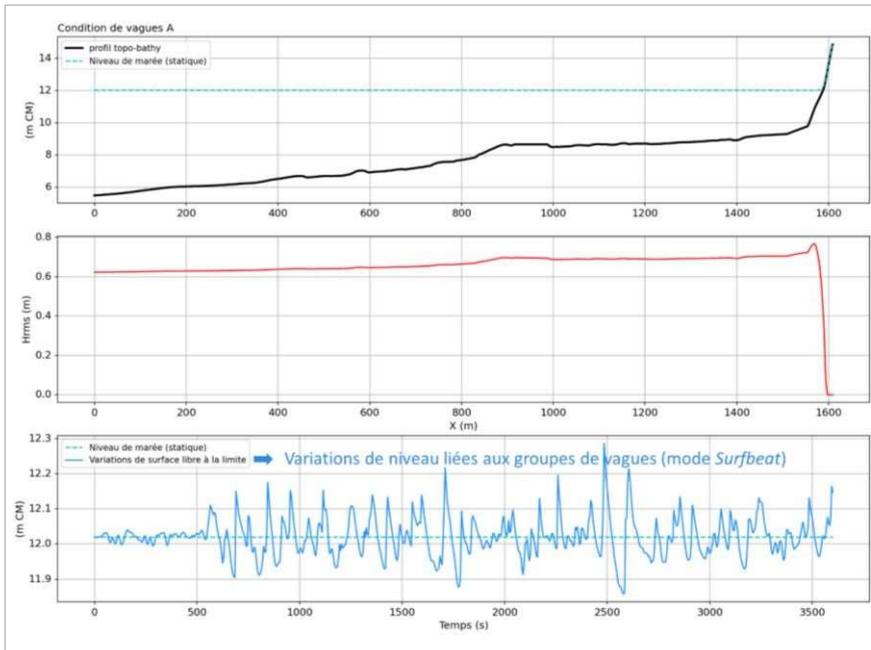


Figure 5-1 Condition hydrodynamique A simulée avec XBeach 1DH : vagues et niveaux d'eau.

Les résultats obtenus avec les 3 types de sables (AVP, FLECHE, et CAN) sont comparés en termes :

- d'intensité et de direction des flux solides en suspension et par charriage (Figure 5-2)
- de percentiles/maximums de flux solides orientés vers le large (Figure 5-3)
- d'évolutions morphologiques potentielles calculées à partir des divergences de flux (équation d'Exner ; cf. Figure 5-4).

Tel qu'illustré sur la Figure 5-2, un premier résultat est que les flux solides (suspension et charriage) simulés sont majoritairement orientés vers le large pour les 3 types de sable. Cela témoigne donc de la capacité des conditions de vagues énergétiques à transporter les sédiments vers le large lorsque le niveau d'eau est suffisamment haut (e.g. niveau \geq PMVE). Un autre résultat important est que le transport en suspension est dominant pour les 3 types de sable.

Les analyses statistiques par percentiles et maximums réalisées sur les flux en suspension et par charriage au niveau de la plage, ainsi que les évolutions morphologiques des fonds calculées à partir des divergences de flux, permettent de statuer directement sur l'option d'utiliser le sable de l'AVP pour le futur rechargement. En effet, même avec une densité de grain plus importante, l'intensité des flux orientés vers le large est nettement plus importante avec le sable plus fin de l'AVP (150 μ m), ce qui se traduit par une augmentation des tendances locales à l'érosion de 50% en comparaison avec le sable de la CAN. La tenue du rechargement pendant ce type de condition érosive sera donc encore moins bonne qu'avec le sable de la CAN.

Rapport de la phase n°3B : Rechargement

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

En considérant le sable de la flèche sédimentaire, dont le D50 est proche de celui de la CAN (1 mm) mais dont la densité de grain est plus importante, les résultats indiquent pour les 2 conditions hydrodynamiques simulées (cf. Figure 5-5) :

- Une réduction d'un facteur 3 (resp. 2) des flux en suspension (resp. par charriage) au niveau de la plage ;
- Des tendances à l'érosion réduites localement d'un facteur 2.5 à 3 (50 à 65 cm avec le sable de la flèche contre 1.4 à 1.7 m avec le sable de la CAN)

Les résultats Xbeach indiquent que les caractéristiques du sable de la flèche (à la fois grossier et dense) permettront d'améliorer très significativement la rémanence du rechargement par rapport au premier projet de 2019. De plus, bien que les tendances d'évolution restent en érosion à l'échelle d'un événement particulièrement érosif, on peut supposer que des périodes plus calmes seront favorables à une dynamique de ré-engraissement. Le bilan sur une année complète est attendu bien plus favorable avec le sable de la flèche qu'il ne l'était avec le sable de la CAN.

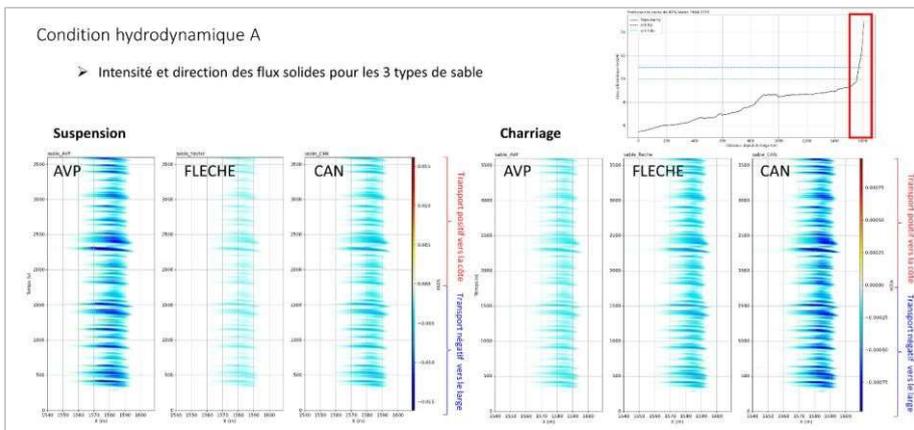


Figure 5-2 XBeach 1H, condition A : Intensité et direction des flux solides (suspension et charriage) pour les 3 types de sable.

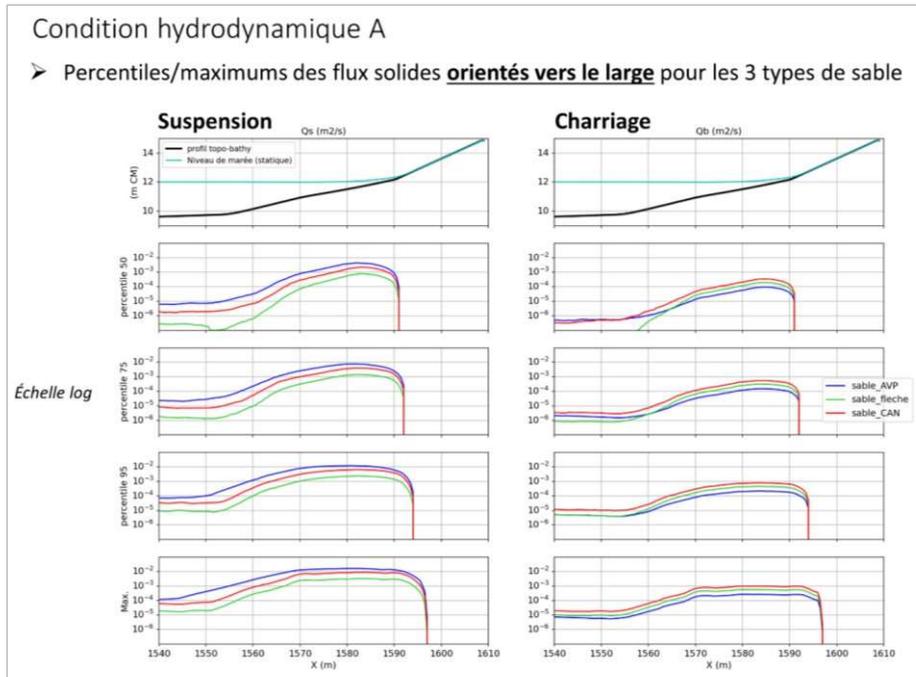


Figure 5-3 XBeach 1H, condition A : Percentiles et maximums des flux solides orientés vers le large (suspension et charriage) pour les 3 types de sable.

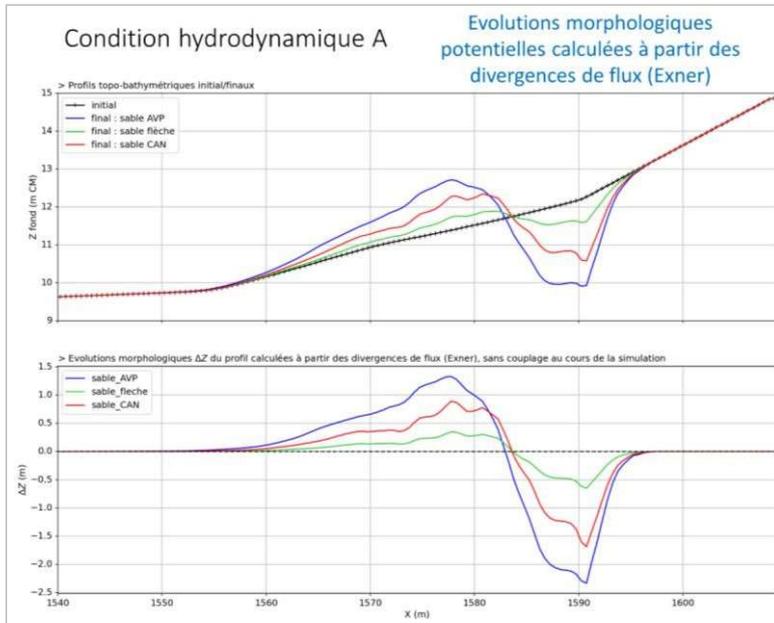


Figure 5-4 XBeach 1H, condition A : évolutions morphologiques potentielles calculées à partir des divergences de flux (équation d'Exner), pour les 3 types de sable.

Rapport de la phase n°3B : Rechargement

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

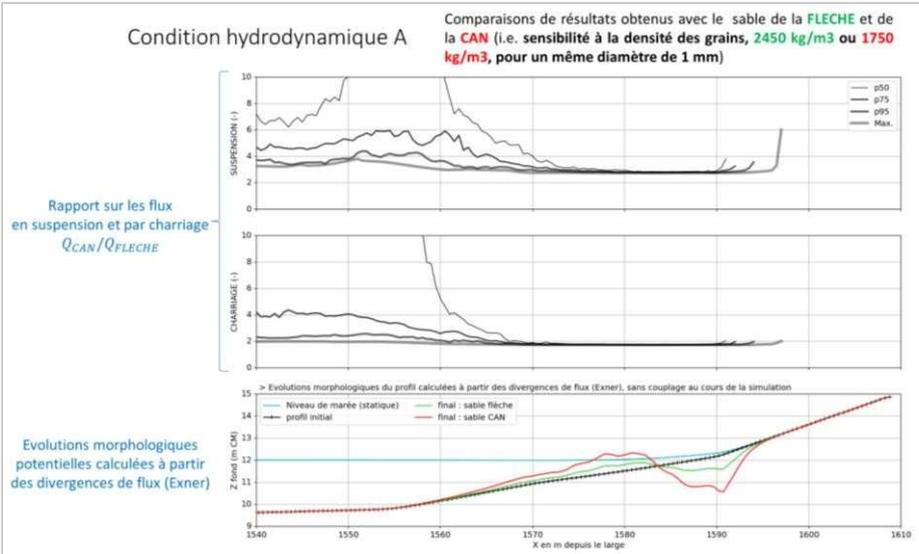


Figure 5-5 XBeach 1H, condition A : comparaison des flux en suspension et par charriage (rapports de percentiles ou de maximums), et des évolutions morphologiques potentielles (divergences de flux ; équation d'Exner) obtenus avec le sable de la fleche et de la CAN.

6. SYNTHÈSE

La plage du Valais, située au Sud du terre-plein de l'avant-port du Légué, a déjà fait l'objet d'un rechargement en 2019 à partir de sable coquillier grossier et très peu dense en provenance du banc de la Horaine (site d'extraction dans la baie de Saint-Brieuc gérée par la CAN). Le volume rechargé a rapidement été repris par les vagues et les courants de marée. Dans ce contexte, cette étude vise à évaluer la pertinence de trois scénarios pour la mise en place d'un nouveau projet rechargement de la plage du Valais :

- Scénario 1 : Arasement de la flèche (12 000 m³) et transfert de ce sable pour recharger la plage du Valais (Partie Nord et Sud) ;
- Scénario 2 : Prélèvement de 2 000 m³ de sable de la flèche (extrémité Sud-Est) pour recharger uniquement la partie Nord de la plage (partie en dehors de la RN) ;
- Scénario 3 : Réensablement de la totalité de la plage (même emprise que le scénario 1) à partir du sable dragué dans l'avant-port (moitié nord de la zone de dragage où la part sableuse est plus importante). Volume : 12 000 m³. La flèche n'est pas modifiée.

Deux modèles hydro-sédimentaires complémentaires ont été mis en place :

- Le système de modélisation morpho dynamique TELEMAC 2D-TOMAWAC-SISYPHE permettant de contribuer à évaluer (1) la tenue du rechargement à l'échelle annuelle (simulations 1A représentatives de 15 jours avec application d'un facteur morpho dynamique de 25) pour les 3 scénarios, et (2) l'effet d'un prélèvement plus ou moins conséquent du volume sédimentaire de la flèche sur la morphologie des fonds environnants (simulations 1B réalisées sur la même période mais en considérant un paramétrage sédimentaire cohérent vis-à-vis dans phases antérieures de l'étude).
- Une configuration 1DH XBeach (uniquement pour le MNT du scénario 1) permettant de caractériser le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques susceptibles d'intervenir « dans le profil » pour deux conditions de vagues énergétiques potentiellement érosives (en particulier l'effet du courant de retour par le fond sur le transport vers le large) et pour 3 types de sables :
 - Cas 1 : d₅₀=150 µm et ps =2450 kg/m³, représentatif du sable de l'**AVP (avant-port)**
 - Cas 2 : d₅₀=1 mm et ps =2450 kg/m³, représentatif du sable de la **flèche** sédimentaire ;
 - Cas 3 : d₅₀=1 mm et ps =1750 kg/m³, représentatif du sable de la **CAN**

La complémentarité des deux modèles est à retenir sur les types de transport sédimentaire : le modèle 1DH XBeach est capable de simuler les transports transversalement à la plage, en l'occurrence les transports orientés vers le large lors des conditions de vagues énergétiques érosives ; la modélisation TELEMAC 2D-TOMAWAC-SISYPHE, plus globale, simule la dynamique de l'ensemble des compartiments sédimentaires (dont la plage, l'estran, la flèche sédimentaire) et en particulier les transports longitudinaux sur la plage sous l'action des courants de dérive littorale.

Cette modélisation vise aussi à apporter des éléments de réponse sur la mauvaise tenue du premier rechargement de la plage du Valais réalisé en 2019, et fournir des éléments complémentaires permettant de statuer sur la meilleure source de sable pour le futur rechargement (i.e. sable en provenance de l'avant-port ou de la flèche sédimentaire).

Rapport de la phase n°3B : Rechargement Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

Les principaux résultats des modélisations TELEMAC 2D sont les suivants :

- Simulations 1A
 - Pour les scénarios 1 et 2 utilisant le sable grossier de la flèche, les flux sédimentaires résiduels sont très proches, faibles, et principalement orientés vers la côte. Les évolutions morphologiques associées sont modérées (+/- 0.1-0.2 m/an).
 - Pour le scénario 3 utilisant le sable de l'AVP, les flux résiduels sont un ordre de grandeur plus élevé que ceux obtenus avec les scénarios 1 et 2. Un transport « longshore » intervient sur le secteur Nord et tend à transporter le sable du haut de plage vers le Sud, tandis qu'un transport « longshore » convergent sur le secteur Sud aboutit à un transport vers le large dans l'axe de la plage. Les évolutions morphologiques des fonds montrent des alternances d'érosion/dépôt deux à trois fois plus marquées (environ +/- 0.5 m/an) intervenant sur une bande cross-shore plus large, couvrant la quasi -totalité de la zone rechargée. De façon cohérente avec le transport résiduel orienté vers le large, une zone préférentielle de dépôt intervient en bas de plage dans l'axe de la zone Sud.
 - Les évolutions morphologiques des fonds attenants à la zone rechargée ne sont pas significatives.
 - **Les résultats des simulations 1A indiquent clairement que les scénarios basés sur l'utilisation du sable de la flèche sédimentaire permettront d'assurer une meilleure tenue du rechargement.**
- Simulations B :
 - **Les prélèvements sédimentaires sur le secteur de la flèche n'ont pas d'influence significative sur les évolutions morphologiques des secteurs environnants.**
 - La tendance à la régénération de la flèche sédimentaire est simulée quel que soit le scénario. Ce résultat indique qu'il sera possible d'effectuer de futurs rechargements de la plage du Valais, avec un même approvisionnement depuis la flèche, dans le cas où des rechargements d'entretien seraient projetés.

Les principaux résultats des modélisations XBeach 1DH (conditions potentiellement érosives) sont les suivants :

- Même avec une densité de grain plus importante, l'intensité des flux orientés vers le large est nettement plus importante avec le sable plus fin de l'AVP (150 µm), ce qui se traduit par une augmentation des tendances locales à l'érosion de 50% en comparaison avec le sable de la CAN. La tenue du rechargement pendant ce type de conditions érosives sera donc encore moins bonne qu'avec le sable de la CAN (i.e. moins bonne qu'en 2019).
- En considérant le sable de la flèche sédimentaire, dont le d50 est proche de celui de la CAN (1 mm) mais dont la densité de grain est plus importante, les flux et les tendances à l'érosion sont réduits d'un facteur 2 à 3.
- Les résultats Xbeach indiquent que les caractéristiques du sable de la flèche (à la fois grossier et dense) permettront d'améliorer très significativement la rémanence du rechargement par rapport au premier projet de 2019. De plus, bien que les tendances d'évolution restent en érosion à l'échelle d'un événement particulièrement érosif, on peut supposer que des périodes plus calmes seront favorables à une dynamique de ré-engraissement.

Sur la base de l'ensemble des résultats des simulations, le scénario de rechargement préconisé est le n°1. Les arguments étayant ce choix sont en résumé :

Rapport de la phase n°3B : Rechargement

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

- **Une meilleure tenue du rechargement obtenue avec le sable grossier et dense de la flèche sédimentaire** (mise en évidence à la fois par les résultats des simulations TELEMAC et XBeach) ;
- **Peu d'effets significativement défavorables sur la dynamique sédimentaire de la plage** (flux et évolutions morphologiques) **induits par l'arasement total de la flèche** : les flux résiduels sur le secteur rechargé sont peu différents entre les scénarios 1 et 2 ;
- **L'arasement total de la flèche pourrait permettre de limiter l'envasement sur le secteur du Valais** en favorisant la remise en suspension des fines par les vagues (ou du moins en limitant les séquences de dépôt) ;
- **La capacité de régénération de la flèche mise en évidence dans les phases antérieures de l'étude est ici confirmée. La flèche sédimentaire pourra donc à nouveau constituer une zone de prélèvement pour d'éventuels rechargements d'entretien de la plage.**

7. ANNEXES

7.1 TELEMAC 2D, SIMULATIONS A : ÉVOLUTIONS MORPHOLOGIQUES DES FONDS (ÉROSION/DEPOT) SANS EFFETS DE PENTE

Les évolutions morphologiques des fonds issues des simulations A sont ici présentées sans effets de pente (critère à 10°), et permettent de souligner :

- Les contrastes sur les tendances d'érosion/dépôt entre les simulations 1A et 3A ;
- La formation de dépôts en bas de plage uniquement dans la simulation 3A

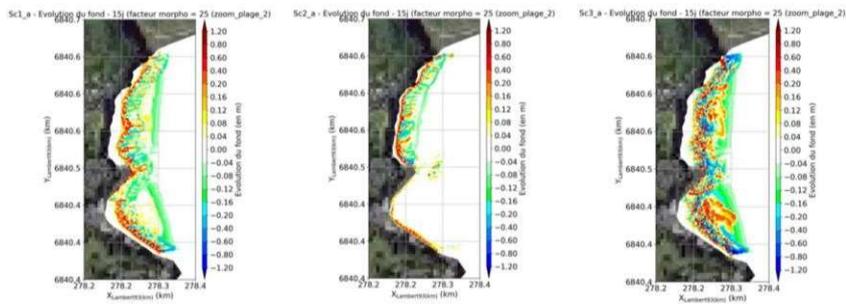


Figure 7-1 TELEMAC 2D, Simulations A : différentiels bathymétriques obtenus **sans effets de pente** (critère à 10°) après 15 jours de simulation représentatifs d'une année (facteur morphologique de 25, milieu). Zoom sur la zone rechargée de la plage du Valais.

7.2 XBEACH 1DH : RÉSULTATS POUR LA CONDITION HYDRODYNAMIQUE B

Valeur maximale de R2 sur la période 1994-2022 (= 1.4 m)

- Date : 2008-03-10 22h
- Hs : **0.98 m**
- Tp : **17.86 s**
- Niveau de marée : +12.02 m ZH Légué

Rapport de la phase n°3B : Rechargement Étude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

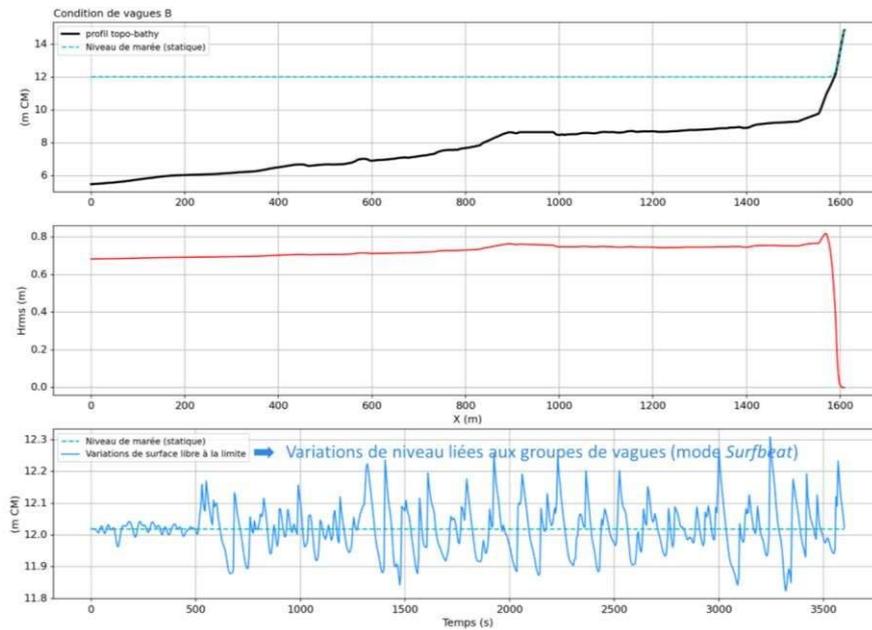


Figure 7-2 Condition hydrodynamique B simulée avec XBeach 1DH : vagues et niveaux d'eau.

Condition hydrodynamique B

- Intensité et direction des flux solides pour les 3 types de sable

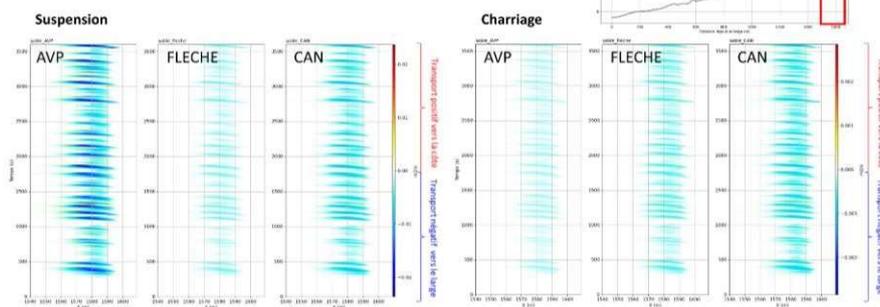


Figure 7-3 XBeach 1H, condition B : Intensité et direction des flux solides (suspension et charriage) pour les 3 types de sable.

Condition hydrodynamique B

- Percentiles/maximums des flux solides **orientés vers le large** pour les 3 types de sable

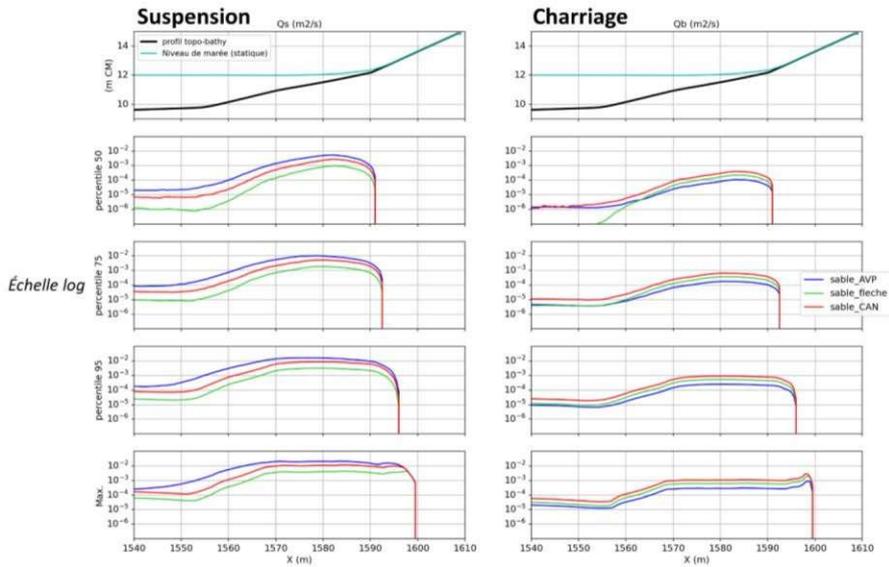


Figure 7-4 XBeach 1H, condition B : Percentiles et maximums des flux solides orientés vers le large (suspension et charriage) pour les 3 types de sable.

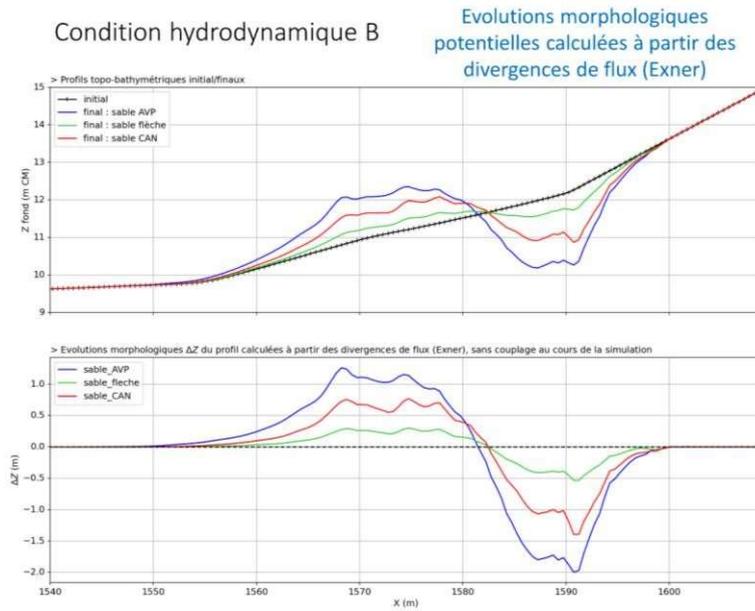


Figure 7-5 XBeach 1H, condition B : évolutions morphologiques potentielles calculées à partir des divergences de flux (équation d'Exner), pour les 3 types de sable.

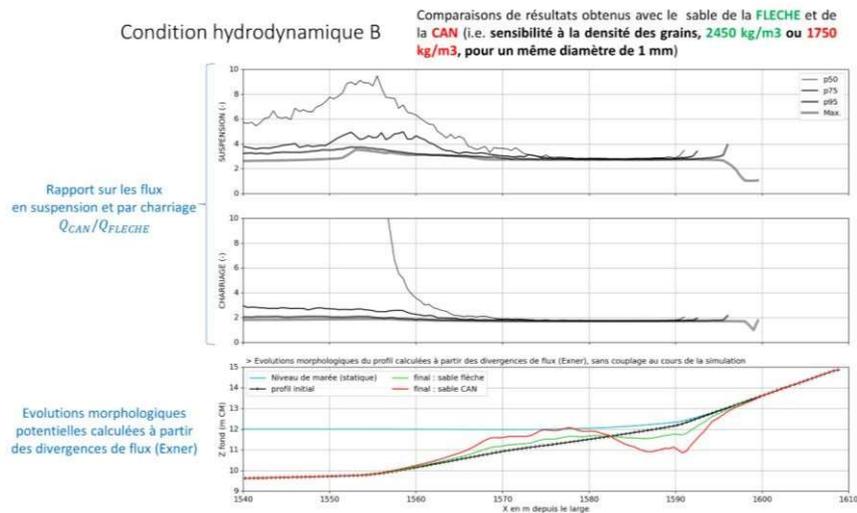


Figure 7-6 XBeach 1H, condition B : comparaison des flux en suspension et par charriage (rapports de percentiles ou de maximums), et des évolutions morphologiques potentielles (divergences de flux ; équation d'Exner) obtenus avec le sable de la fleche et de la CAN.