

Date : 30 juillet 2022 Référence : POC-1942 Phase n°2 : V.1.0

Contact : Olivier Raillard Téléphone : 06 85 52 49 49 Email : olivier.raillard@actimar.fr

Benoit Waeles Consultant Génie Côtier

Port du Légué

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



Rapport de la phase 2

Contrat POC-1942

ACTIMAR Au service de la mer

Siège social

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



Table des matières

1.	MC	TIF ET OBJECTIF					
2.	CO	NTE	хте				11
3.	PR MC	ESEN DEL	NTATION ISEES EN	DES PHASE	CONFIG 2	URATION	S PASSEES
4.	MIS	SE EN		ES MO	DELISAT	IONS	
	4.1		S DE CALCUL ET	PARAMETRI	SATION		16
	4.2	MAILL	AGES				
	4.3	Rappe	EL DES RESULTA	TS CLES DE	MODELISATION	N DE PHASE 1	20
5.	ET	UDE	DES AMEN		ENTS		
	5.1	ANALY	SE DES EFFETS	DE LA CREA	TION DU TERRI	E-PLEIN : 1983	vs 199522
		5.1.1	Analyse des ca	artes de rési	ultat de la mod	lélisation	22
		5.1.2	Analyses statis	tiques par s	station (sorties	de modèle en c	lifférents points)26
		5.1.3	Bilans volumét	riques par z	one		27
	5.2	ANALY	/SE DES EFFETS A UNE CERTAINE	DE LA MISE COTE D'EXF	EN PLACE DU N PLOITATION)	NOLE (ET DE L'EI	NTRETIEN DE L'AVANT-
		5.2.1	Analyse des ca	artes de rési	ultat de la mod	lélisation	
		5.2.2	Analyses statis bilans volumét	stiques par riques par z	station (sortie one	s de modèle e	n différents points) et 34
6.	SY	NTHE	ESE DES P	HASES	1 ET 2		
	6.1	Secte	EUR DE L'AVANT	PORT			
		6.1.1	Dynamique d'e	ensablement	t		



7.

Rapport de la phase n°2 Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

	6.1.2	Dynamique d'envasement	42
6.2	Secte	EURS VOISINS	44
	6.2.1	Développement de la flèche sableuse	44
	6.2.2	Secteur Sud du terre-plein/ Valais	46
AN	NEX	ES	49



Table des illustrations

Figure 1-1. Localisation du port du Légué dans la baie de Saint-Brieuc
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 Synthèse des différentes phases d'aménagement du port du Légué (plans de 1878 et 1916 [source ; DHI, 2015], images aériennes de 1951 et 2015), et visualisation du colmatage du bras amont (avec un estran initialement couvert de sédiments grossiers) par des sédiments fins (vase)
Figure 3-1 Assemblage des données bathymétriques utilisées pour l'initialisation de la configuration de « 1983 », antérieure à la construction du terre-plein à la pointe de Cesson.
Figure 3-2 Assemblage des données bathymétriques utilisées pour l'initialisation de la configuration de « 1995 », représentative de la situation d'aménagement des années 90, postérieure à la construction du terre-plein, mais antérieure à la mise en place du môle 14
Figure 3-3 Assemblage des données bathymétriques utilisées pour l'initialisation de la configuration de « 2005 », incluant l'ensemble des aménagements majeurs à l'embouchure (terre-plein et môle de protection). Malgré l'entretien déjà effectif de l'avant-port, les sédiments dragués n'étaient pas déposés devant le môle mais stockés à terre
Figure 4-1 Comparaison des hauteurs d'eau et des courants, prédits et mesurés (cf. phase 1) 17
Figure 4-2 Comparaison des hauteurs significatives des vagues, prédites et mesurées (cf. phase 1).
Figure 4-3. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation historique de 1983 : zoom sur la zone d'étude
Figure 4-4. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation historique représentative des années 90 : zoom sur la zone d'étude
Figure 4-5. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation historique de 2005 : zoom sur la zone d'étude
Figure 5-1 Zones considérées pour les bilans sédimentaires (identiques à celles définies dans les analyses morpho-sédimentaires de la phase 1) 21
Figure 5-2 Transport résiduel (sable) dans la zone d'étude pour les configurations historiques de 1983 et de 1995 au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 06/01/2018 à 09:00 UTO (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes, haut) et autour de la pleine mer du 04/02/2018 à 09:00 UTO (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues



énergétiques, bas). Pour la configuration de 1983, le trait blanc en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il a été construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats. 23

- Figure 5-4 Evolution de l'épaisseur de vase dans la zone d'étude pour les configurations de 1983 et de 1995. Pour la configuration de 1983, le trait noir en pointillés permet de localiser le terreplein tel qu'il a été construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats...... 25

- Figure 6-3 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 les différentes configurations d'aménagement. Pour la configuration de 1983,



- Figure 7-1 Evolution de l'épaisseur de sédiments (sable) dans la zone d'étude pour les différentes configurations historiques. Pour la configuration de 1983, le trait noir en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il sera construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats. 50

- Figure 7-4 Evolution de l'épaisseur de sédiments (vase) dans la zone d'étude pour les différentes configurations historiques. Pour la configuration de 1983, le trait noir en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il sera construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats. 54



Suivi des modifications

Version	Modifications	Rédacteurs	Validation	Date
V1.0	Version initiale	Aurélie Rivier Baptiste Mengual	Olivier Raillard Benoît Waeles	30/07/2022

Liste de diffusion

Arnaud Marrec	Région Bretagne



1. MOTIF ET OBJECTIF

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



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

Son avant-port de commerce (zone à échouage) nécessite d'être dragué (voir figure cidessous) 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.



Rapport de la phase n°2

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



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

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

Les principaux objectifs de cette étude sont les suivants :

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



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

- La phase 1 doit permettre de décrire le fonctionnement hydro-sédimentaire actuel de la zone d'étude, à l'échelle de la baie et du port et en intégrant le fonctionnement des ouvrages hydrauliques;
- En phase 2 une analyse est conduite sur les effets hydro-sédimentaires des aménagements successifs du port et des pratiques, offrant ainsi une vision explicative des évolutions constatées ;
- Sur la base des précédents enseignements, la phase 3 débouche sur des propositions de solutions efficaces de gestion de sédiments qui préservent l'environnement.

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

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

- Mise en place des MNTs servant à l'initialisation des différentes configurations historiques d'aménagement ;
- Présentation du modèle hydro-sédimentaire et mise en place des maillages ;
- Analyse des effets des différentes phases d'aménagement successives (conditions hydrodynamiques, transport sédimentaire, évolutions morphologiques);
- Synthèse des effets sur les dynamiques d'ensablement et d'envasement de l'avant-port, ainsi que sur les phénomènes constatés sur les secteurs voisins (i.e. développement d'une morphologie de flèche sableuse dans le prolongement du môle, problématiques d'envasement sur le secteur du Valais).

En phase 2 le travail de modélisation vise à décrire et comprendre le fonctionnement hydrodynamique et hydro-sédimentaire du site d'étude dans les configurations passées du port. Les mêmes conditions océano-météorologiques sont simulées sur différentes conditions afin d'évaluer les modifications liées aux aménagements et aux changements de bathymétries.



2. CONTEXTE

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

Un premier bassin à flot et une écluse ont été construits à partir de 1868, puis un second bassin à flot en 1915. Ces aménagements ont largement contribué au développement du port et à la diversification de ses activités. L'évolution des flottes de cabotage et l'envasement régulier des fonds, ont motivé les projets de modernisation du port du Légué, avec en 1983, un projet de modernisation comportant un dévasage des bassins et de l'avant-port ainsi que la création d'un endiguement dans le prolongement de la pointe de Cesson, visant à permettre la réalisation d'un terre-plein industrialo-portuaire. Les travaux d'aménagement ont principalement été réalisés en 1984 et 1985. Enfin, un môle de 450 m de longueur a été construit entre septembre 1999 et juin 2001 afin de protéger un poste à quai le long de la face nord de l'endiguement contre l'effet de la houle et des courants (Figure 2-1).

Une tendance au comblement par des sédiments majoritairement vaseux a pu être observée en aval de l'écluse au cours du 20ème siècle. En effet, les photographies d'époque montraient des fonds, notamment en partie haute des estrans, largement couverts de matériaux grossiers (cailloutis, galets). L'évolution est particulièrement marquée en amont, avec un site qui a été largement comblé par des banquettes de vase (Figure 2-1).

Suite à la construction du môle de protection de l'avant-port en 2000, un envasement significatif a également été observé en arrière de ce dernier.



Rapport de la phase n°2 Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué



Figure 2-1 Synthèse des différentes phases d'aménagement du port du Légué (plans de 1878 et 1916 [source ; DHI, 2015], images aériennes de 1951 et 2015), et visualisation du colmatage du bras amont (avec un estran initialement couvert de sédiments grossiers) par des sédiments fins (vase).



3. PRESENTATION DES CONFIGURATIONS PASSEES MODELISEES EN PHASE 2

Trois configurations historiques 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. Pour cela, différents jeux de données bathymétriques ont été utilisés et assemblés, notamment des années 80 et 90, pour initialiser le modèle et spécifier les ouvrages qui font obstacle aux écoulements pour les différentes phases d'aménagement (Figure 3-1 à Figure 3-3) :

- Les données de la CCI de 1983 autour de la pointe de Cesson (en bleu) ;
- Les données acquises entre 1995 et 1998 par le département des Côtes d'Armor (en rouge) ;
- Les données de la CCI de 2005 (en noir) ;
- Les données de la CCI de 2009 sur le secteur situé en amont de l'écluse (en orange) ;
- Les données Lidar RGE Alti de 2011 sur les zones d'estran de l'Anse d'Yffiniac et de la plage des Nouëlles (en gris) ;
- Les MNT HOMONIM (assemblage de données fourni par le SHOM) à 100 m de résolution en dehors de l'Anse d'Yffiniac, i.e. au large de l'isobathe 0 m CM.

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

- Une configuration de 1983 antérieure à la construction du terre-plein à la pointe de Cesson (Figure 3-1). A cette époque, les aménagements concernaient uniquement la partie amont de l'estuaire (écluse, bassins à flot, quai de la Ville-Gilette) et l'embouchure était située au niveau de la pointe de Cesson. Les données topo-bathymétriques de 1983 sont privilégiées autour de la pointe de Cesson, et sont complétées par celles de 1995 et 2005 sur le reste de l'embouchure (en dehors des secteurs aménagés).
- Une configuration représentative des années 90 avec la prise en compte du terre-plein dans le prolongement de la pointe de Cesson, mais sans la digue de protection de l'avant-port (configuration « 1995 » dans la suite du rapport ; Figure 3-2). Les données de 1995 à 1998 sont logiquement privilégiées sur l'ensemble de l'embouchure, mais sont néanmoins complétées par celles de 1983 au Sud du terre-plein (morphologies des fonds plus proches en comparaison à 2005).
- Une configuration de 2005 incluant l'ensemble des aménagements actuels à l'embouchure (terre-plein et môle de protection de l'avant-port ; Figure 3-3). Il est important de souligner qu'en 2005, les sédiments dragués dans l'avant-port n'étaient pas déposés devant le môle (uniquement à partir de 2007). La cote des fonds était donc significativement plus basse sur ce secteur en comparaison à la période récente 2010-2020.



Rapport de la phase n°2 Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué



Figure 3-1 Assemblage des données bathymétriques utilisées pour l'initialisation de la configuration de « 1983 », antérieure à la construction du terre-plein à la pointe de Cesson.



Figure 3-2 Assemblage des données bathymétriques utilisées pour l'initialisation de la configuration de « 1995 », représentative de la situation d'aménagement des années 90, postérieure à la construction du terre-plein, mais antérieure à la mise en place du môle.



Rapport de la phase n°2

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



Figure 3-3 Assemblage des données bathymétriques utilisées pour l'initialisation de la configuration de « 2005 », incluant l'ensemble des aménagements majeurs à l'embouchure (terre-plein et môle de protection). Malgré l'entretien déjà effectif de l'avant-port, les sédiments dragués n'étaient pas déposés devant le môle mais stockés à terre.



4. MISE EN PLACE DES MODELISATIONS

4.1 CODES DE CALCUL ET PARAMETRISATION

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 chaine 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 4-1 et

Figure 4-2) 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°2

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









4.2 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.

Pour les trois configurations historiques, 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, ou encore au secteur du Valais. Le maillage correspondant à l'année 1983 est composé de 13 770 nœuds, celui représentatif des années 1990 de 13 661 nœuds, et celui de 2005 de 13 943 nœuds.

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



Figure 4-3. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation historique de 1983 : zoom sur la zone d'étude.



Rapport de la phase n°2

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



Figure 4-4. Maillage et bathymétrie du modèle pour la simulation historique représentative des années 90 : zoom sur la zone d'étude.







4.3 RAPPEL DES RESULTATS CLES DE MODELISATION DE PHASE 1

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



5. ETUDE DES AMENAGEMENTS

Les effets des différentes phases d'aménagement 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, à savoir :

- Les effets associés à la création du terre-plein (i.e. comparaison des configurations de 1983 et 1995);
- Les effets associés à la construction du môle, ainsi qu'à l'entretien de l'avant-port à une certaine cote d'exploitation (i.e. comparaison des configurations de 1995 et 2005).

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

- Des comparaisons de cartes de résultat du modèle (flux résiduels de sables, évolutions des fonds sur 1 an).
- Des comparaisons se basant sur des analyses statistiques à différentes stations de sortie du modèle hydro-sédimentaire (moyennes ou percentiles calculés sur 1 an), réalisées sur différentes variables hydrodynamiques telles que les hauteurs d'eau, les hauteurs significatives des vagues, l'intensité des courants ou les contraintes de cisaillement près du fond, ainsi que sur les évolutions des fonds résultant des dynamiques sableuse et vaseuse.
- Des bilans volumétriques de sable et de vase (en m³), calculés sur les zones illustrées sur la Figure 5-1 pour chaque configuration, permettant de fournir une vision plus intégrée de l'effet 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.



Figure 5-1 Zones considérées pour les bilans sédimentaires (identiques à celles définies dans les analyses morpho-sédimentaires de la phase 1).



5.1 ANALYSE DES EFFETS DE LA CREATION DU TERRE-PLEIN : 1983 VS 1995

5.1.1 ANALYSE DES CARTES DE RESULTAT DE LA MODELISATION

5.1.1.1 Dynamique sableuse : flux résiduels et évolutions morphologiques

Les flux résiduels et les évolutions des fonds associés peuvent tout d'abord être comparés sur le secteur de l'avant-port avant et après la construction du terre-plein. Ces comparaisons sont réalisées pour différentes conditions de vagues incidentes qui, bien qu'elles influencent peu l'orientation des flux résiduels, sont susceptibles de moduler significativement leur intensité. Pour une condition d'agitation moyenne (Figure 5-2, haut), les flux résiduels sur une marée montrent des orientations comparables sur le secteur de l'avant-port pour les deux configurations (majoritairement orientés vers l'amont du fait de l'asymétrie de la marée en faveur du flot). Cependant, des gradients apparaissent nettement depuis l'extrémité du terre-plein dans la configuration de 1995, avec une diminution d'un ordre de grandeur des flux le long de la face Nord. Les cartes d'évolutions morphologiques résultant de la dynamique sableuse mettent en évidence une accrétion légèrement plus marquée sur le secteur accolé au Nord du terre-plein en 1995 (Figure 5-3). Pour une condition de vagues plus énergétique, les flux sont nettement plus intenses et les gradients associés à la présence du terre-plein sont plus difficilement décelables (Figure 5-2, bas).

À la suite de la mise en place du terre-plein, une zone préférentielle de dépôt de sable apparait au Sud de ce dernier, sur le secteur du Valais (Figure 5-3). La zone de la plage du Valais, qui était plutôt caractérisée par une tendance à l'érosion en 1983, est devenue une zone d'accrétion de sable suite à la construction du terre-plein. Ce phénomène s'explique en comparant les deux exemples de carte de transport résiduel sur une marée (Figure 5-2). Les flux prononcés à l'extrémité du terre-plein diminuent fortement à mesure qu'ils longent la bordure Sud de l'endiguement en direction de la plage du Valais. Ce gradient de flux négatif favorise ainsi le dépôt du sable au Sud du terre-plein.



Rapport de la phase n°2 Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué









Figure 5-3 Evolutions (1 année simulée) de l'épaisseur de **sable** dans la zone d'étude pour les configurations de 1983 et de 1995. Pour la configuration de 1983, le trait noir en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il a été construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats.



5.1.1.2 Dépôts de vase

Les cartes de dépôts de vase obtenus après 1 an simulé pour les configurations avant et après la mise en place du terre-plein sont présentées sur la Figure 5-4.

Sur le secteur de l'avant-port, des dépôts de vase interviennent déjà dans la configuration de 1983 antérieure à la mise en place du terre-plein. Suite à sa construction, la dynamique de dépôt est très peu modifiée sur le secteur actuel de l'avant-port, c'est-à-dire le long de la face Nord de l'endiguement. En revanche, on peut souligner des dépôts localement plus importants dans la configuration de 1995 sur la partie de l'avant-port située en amont de la Ville-Gilette.

Sur le secteur du Valais, la mise en place du terre-plein aboutit à un dépôt préférentiel de vase de 5 mm à 5 cm par an, inexistant dans le cas de la configuration de 1983. Etant donné que les données topo-bathymétriques utilisées sur ce secteur sont en grande partie identiques entre les configurations de 1983 et 1995, cette tendance au dépôt au Sud du terreplein peut être pleinement attribué à l'effet de l'aménagement lui-même.



Figure 5-4 Evolution de l'épaisseur de **vase** dans la zone d'étude pour les configurations de 1983 et de 1995. Pour la configuration de 1983, le trait noir en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il a été construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats.



5.1.2 ANALYSES STATISTIQUES PAR STATION (SORTIES DE MODELE EN DIFFERENTS POINTS)

La Figure 5-5 illustre une comparaison 1983/1995 (i.e. avant/après construction du terreplein) des variations spatiales de différents paramètres statistiques le long d'une section débutant environ 1.5 km au large du môle (station 18) puis longeant le Sud du terre-plein sur le secteur du Valais.



Figure 5-5 Comparaisons des configurations 1983 et 1995 (i.e. effet de la mise en place du terreplein) basées sur des paramètres statistiques (moyennes ou percentiles calculés sur 1 an) de différentes variables hydrodynamiques ainsi que sur les évolutions des fonds (sable et vase) à différentes stations de sortie du modèle longeant le Sud du terre-plein en direction de la plage du Valais.

Du point de vue hydrodynamique, l'intensité des courants (percentile 90) est légèrement augmentée dans la configuration 1995 à l'extrémité du terre-plein. Les comparaisons mettent également en évidence une forte atténuation des hauteurs significatives de vagues (moyenne ou percentile 90) au Sud du terre-plein, qui se traduit directement par une diminution substantielle des contraintes de cisaillement près du fond (cf. percentile 75).

Concernant la dynamique sédimentaire, ces effets sur les courants et les vagues se traduisent :

- Pour le sable : par des flux résiduels de sables plus importants en direction du Sud-Est à l'extrémité du terre-plein et des gradients négatifs marqués au Sud de l'endiguement, favorisant le dépôt.
- Pour la vase : par des niveaux plus faibles de contraintes près du fond qui favorisent le dépôt des sédiments vaseux en suspension, à l'image des épaisseurs de vase déposées comprises entre 1 et 1.5 cm/an aux stations 15 et 16 pour la configuration 1995. Ces tendances au dépôt sont 10 fois plus importantes qu'en l'absence du terre-plein (configuration 1983), et démontrent l'effet majeur de ce dernier sur l'envasement du secteur du Valais.



5.1.3 BILANS VOLUMETRIQUES PAR ZONE

5.1.3.1 Sable

Le Tableau 5-1 présente une comparaison des bilans sédimentaires entre 1983 et 1995 pour le sable, avant et après la construction du terre-plein.

Sur la zone actuellement entretenue de l'avant-port (zone « AVP1 »), une tendance à l'accrétion est obtenue avant et après la construction du terre-plein, avec environ 17 000 m³/an en 1983 et 21 000 m³/an en 1995. Les bathymétries sur ce secteur étant identiques pour les deux configurations, l'effet de la mise en place du terre-plein conduit donc à une augmentation de 4 000 m³ (soit 25%) du dépôt résiduel sur cette zone, ces quelques milliers de m³ n'étant pas significatifs au regard des volumes de sables actuellement dragués (environ 80 000 m³).

A noter que ce dépôts de ~20 000 m3/an, ordre de grandeur obtenu avec ou sans le terreplein, ne s'inscrit pas nécessairement dans une tendance, c'est-à-dire sur une évolution monotone à une certaine échelle de temps (a minima pluriannuelle) et d'espace. En effet, nous ne disposons d'aucun différentiel bathymétrique (cartographié à partir de données topobathymétriques) pour caractériser une éventuelle tendance à cette époque. Autrement dit, les données disponibles ne nous permettent pas de vérifier si cette tendance à l'accrétion d'environ +20 000 m³/an pour une configuration d'aménagement antérieure à la construction du môle est spécifique à la bathymétrie historique reconstituée, ou si elle se trouve être représentative d'une tendance générale de comblement à l'échelle de l'estuaire (en particulier de ce secteur d'embouchure, dont la configuration a été largement modifié), voire du fond de la baie de St-Brieuc. D'autre part la modélisation n'indique pas de dépôt systématique sur l'ensemble de l'embouchure externe, ni de processus hydro-sédimentaires qui conduiraient spécifiquement à un ensablement de AVP1 quels que soient les fonds environnants.

A l'extrémité du terre-plein, des différences significatives sur les tendances d'évolution (parfois inversées) sont obtenues sur les secteurs « digue extérieure » et « flèche sableuse ». Cependant, elles restent difficilement interprétables du fait des bathymétries localement très différentes entre les configurations de 1983 et de 1995 sur ces secteurs. Malgré que les effets de ces différences de bathymétrie se superposent à ceux induits par le terre-plein lui-même, une tendance très marquée à l'accrétion peut être soulignée sur le secteur du Valais (où la bathymétrie est similaire entre les deux configurations de modèle). Ce résultat indique que la mise en place du terre-plein a fortement contribué à une accrétion par du sédiment sableux sur le secteur global du Valais entre 1983 et 1995.



Rapport de la phase n°2 Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué

Evolution du stock de SABLE (m³) par zone						
Zone	Année	Dépôt	Erosion	Evolution	Obs.	
AVP_GLOB	1983	116 304	-37 898	78 406		
	1995	109 041	-34 604	74 437	-5% de dépôt rés.	
Digue_exterieur	1983	24 093	-11 646	12 447	+77% de dépôt rés.	
	1995	26 459	-4 385	22 074		
Secteur de la flèche sableuse	1983	19 408	-2 769	16 638	accrétion → érosion	
	1995	8 813	-15 640	-6 827	(-60%)	
Valais_glob	1983	18 251	-23 119	-4 868	érosion \rightarrow accrétion	
	1995	33 163	-4 108	29 054	(× 6)	
Zone de dragage (~AVP1)	1983	34 013	-17 187	16 826	+25% de dépôt rés.	
	1995	35 865	-15 048	20 816		

Tableau 5-1 Comparaison des bilans sédimentaires de sable par zone entre les configurations de 1983 et de 1995 (i.e. avant et après la mise en place du terre-plein).



5.1.3.2 Vase

Le Tableau 5-2 présente une comparaison des bilans sédimentaires entre 1983 et 1995 pour la vase.

Le bilan sur le secteur du Valais (zone « Valais_glob ») met clairement en évidence l'envasement significatif induit par la mise en place du terre-plein (facteur 10). On peut également souligner une augmentation du dépôt de 15% à l'échelle de l'ensemble de l'avantport (secteur « AVP_GLOB »).

Evolution du stock de VASE (m ³) par zone							
Zone	Année	Dépôt	Obs.				
AVP_GLOB	1983	8 688	+15% de dépôt				
	1995	9 951					
Digue_exterieur	1983	175					
	1995	230					
Secteur de la flèche sableuse	1983	183					
	1995	125					
Valais_glob	1983	145	Envasement significatif après la mise en place du				
	1995	1 456	terre-plein				
Zone de dragage (~AVP1)	1983	370					
	1995	538					

Tableau 5-2 Comparaison des bilans sédimentaires de vase par zone entre les configurations de 1983 et de 1995.



5.2 ANALYSE DES EFFETS DE LA MISE EN PLACE DU MOLE (ET DE L'ENTRETIEN DE L'AVANT-PORT A UNE CERTAINE COTE D'EXPLOITATION)

5.2.1 ANALYSE DES CARTES DE RESULTAT DE LA MODELISATION

5.2.1.1 Dynamique sableuse : flux résiduels et évolutions morphologiques

La mise en place du môle (et d'un entretien de l'avant-port à une certaine cote d'exploitation) a modifié l'intensité et la direction des flux résiduels de **sable** dans l'avant-port (Figure 5-6) :

- la diminution de la section tend à augmenter localement l'intensité des flux (en supposant que le volume de remplissage de l'estuaire est inchangé);
- après l'aménagement du môle, des flux significatifs sont orientés (depuis le chenal) en direction de la zone d'appontement de l'avant-port, et sont associés au remplissage de celui-ci (cf. Figure 5-6). A noter que l'intensité de ces flux (et donc du taux de remplissage) est en grande partie contrôlée par la bathymétrie initialement plus basse dans la configuration de 2005, du fait de l'entretien de la zone à la cote d'exploitation de +4.5 m CM. L'effet de l'entretien en continu de l'avant-port à cette cote d'exploitation sera plus largement discuté dans la section de synthèse, en incluant notamment certaines analyses de sensibilité réalisées à l'occasion de la phase 1.

Devant le môle, une zone de divergence de transport sableux apparait distinctement, avec des flux orientés vers l'entrée de l'avant-port sur la première moitié de son linéaire (côté musoir), et dirigés vers le Sud-Est sur la portion rejoignant l'extrémité du terre-plein. Ces flux vers le Sud-Est sur la moitié du linéaire devant la digue ont contribué à l'érosion locale du sable et à son accumulation au Sud du terre-plein, en particulier dans le prolongement du môle (Figure 5-7). Cette érosion mise en évidence par le modèle devant le môle est cohérente avec les évolutions récemment observées entre mars 2020 et mars 2021 (cf. différentiel bathymétrique illustré sur la Figure 2-48 du rapport de phase 1) suite à l'arrêt en juin 2020 des dépôts de dragage sur ce secteur.





Figure 5-6 Transport résiduel (sable) dans la zone d'étude pour les configurations historiques de 1995 et de 2005 au cours d'un cycle de marée autour de la pleine mer du 06/01/2018 à 09:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues moyennes, haut) et autour de la pleine mer du 04/02/2018 à 09:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, conditions de vagues énergétiques, bas).



Rapport de la phase n°2 Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué



2005.



5.2.1.2 Dépôts de vase

La construction du môle se traduit par le dépôt d'une quantité importante de **vase** dans la zone actuelle de dragage de l'avant-port (Figure 5-8). La présence du môle a entrainé une diminution de l'agitation facilitant la décantation de la vase. A noter que ces dépôts de vases (durant l'étale de pleine mer) n'ont pas lieu au même moment que ceux de sable (majoritairement en début de flot). Sur la partie la plus en amont de l'avant-port (e.g. au niveau du quai de la Ville-Gilette), les épaisseurs déposées ont plutôt tendance à diminuer dans la configuration de 2005 incluant le môle de protection.

Au Sud du terre-plein, les dépôts de vase obtenus à partir des configurations de 1995 (terreplein seul) et de 2005 (ajout du môle de protection de l'avant-port) sont qualitativement en accord. Ces résultats confirment l'effet majeur du terre-plein sur l'envasement du secteur du Valais, et une **influence directe a priori très faible** du môle de protection.

En revanche, le môle de protection agit de façon indirecte sur la dynamique d'envasement au Sud du terre-plein. En effet, son influence sur les flux sableux induit des évolutions morphologiques significatives, et en particulier une tendance à l'accrétion plus importante dans le prolongement du môle au Sud du terre-plein, sous forme de flèche sableuse (cf. section précédente). Ces évolutions morphologiques résultant des redistributions de sable influencent à leur tour les conditions hydrodynamiques (courants et vagues, et contraintes de cisaillement associées), et donc la dynamique de la vase (érosion/dépôt). D'autre part, les différences importantes de bathymétries au Sud du terre-plein entre les deux configurations (cotes réhaussées d'environ 0.5 m à 1 m en 2005 par rapport à 1995) peuvent expliquer l'emprise plus restreinte de la zone de dépôt de vase sur le secteur du Valais obtenue avec la configuration d'aménagement de 2005.



Figure 5-8 Evolution de l'épaisseur de vase dans la zone d'étude pour les configurations 1995 et 2005.



5.2.2 ANALYSES STATISTIQUES PAR STATION (SORTIES DE MODELE EN DIFFERENTS POINTS) ET BILANS VOLUMETRIQUES PAR ZONE

5.2.2.1 Sable

Les Tableau 5-3 présente une comparaison des bilans sédimentaires entre 1995 et 2005. Les résultats issus de la configuration 2005 indiquent un dépôt résiduel de sable réduit d'environ 33% et 26% sur les secteurs « digue_exterieur » et « Valais_glob », respectivement, tandis qu'une légère tendance à l'accrétion est obtenue sur le secteur de la flèche sableuse. Néanmoins, ces tendances sont à prendre avec précaution car, tel qu'évoqué précédemment, les différences de bilans sédimentaires peuvent être en partie liées aux différences (localement importantes à l'embouchure) de bathymétrie entre les configurations de 1995 et de 2005. La tendance la plus significative est obtenue sur la zone d'entretien par dragage « AVP1 » : le dépôt résiduel y est augmenté de 80% suite à la construction du môle. Bien que la digue de protection contribue au piégeage du sable, cette tendance s'explique également par les cotes sensiblement plus basses en 2005 sur ce secteur du fait de l'entretien par dragage. Ce point est plus spécifiquement développé dans la section 6.1.1.

Evolution du stock de SABLE (m³) par zone						
Zone	Année	Dépôt	Erosion	Evolution	Obs.	
AVP_GLOB	1995	109 041	-34 604	74 437		
	2005	117 014	-38 592	78 423	+5% de dépôt rés	
Digue_exterieur	1995	26 459	-4 385	22 074	-33% de dépôt rés.	
	2005	31 904	-17 058	14 846		
Secteur de la flèche sableuse	1995	8 813	-15 640	-6 827	dyn. érosion → accrétion	
	2005	13 725	-11 312	2 414		
Valais_glob	1995	33 163	-4 108	29 054	-26% de dépôt rés.	
	2005	23 828	-2 231	21 597		
Zone de dragage (~AVP1)	1995	35 865	-15 048	20 816	+80% de dépôt rés.	
	2005	41 836	-4 438	37 397	Note : cote sensiblement plus basse en 2005 sur ce secteur -> entretien par dragage	
Tableau 5-3 Comparaison des bilans sédimentaires de sable par zone entre les configurations de 1995 et de 2005						



5.2.2.2 Vase

Les sorties du modèle hydro-sédimentaire sont comparées entre les deux configurations de 1995 et 2005 à différentes stations, dans le but d'évaluer les effets de la construction de la digue de protection de l'avant-port sur la dynamique hydro-sédimentaire.

La Figure 5-9 illustre une comparaison 1995/2005 (i.e. avant/après la construction du môle) des variations spatiales des différents paramètres statistiques le long d'une section débutant environ 1.5 km au large du môle (station 18) puis longeant les bordures extérieures et intérieures du môle.

Les comparaisons mettent en évidence une très forte atténuation des hauteurs significatives de vagues en arrière du môle, qui se traduit directement par une diminution tout aussi importante des contraintes de cisaillement près du fond. En effet, le percentile 75 des contraintes est proche de 0 aux stations 9 et 10. Les niveaux plus faibles de contraintes près du fond favorisent le dépôt des sédiments vaseux en suspension, à l'image des épaisseurs de vase déposées d'environ 15 cm/an aux stations 9 et 10 pour la configuration 2005, contre des épaisseurs inférieures au millimètre aux mêmes stations pour la configuration 1995 (i.e. état antérieur à la construction du môle).

L'effet du môle sur la dynamique d'envasement de l'avant-port se retranscrit très nettement dans le bilan volumétrique de vase à l'échelle de la zone d'entretien par dragage (« AVP1 » ; Tableau 5-4), avec 13 605 m³ déposés à l'échelle de l'année 2005, contre 538 m³ en 1995 (i.e. secteur essentiellement sableux avant la construction du môle). De plus, le dépôt résiduel à l'échelle de l'avant-port (zone « AVP_GLOB ») est augmenté de 150%.

Ces résultats d'analyse démontrent l'effet majeur du môle de protection sur la dynamique d'envasement en arrière de ce dernier.

Concernant le secteur du Valais, on peut noter une diminution de 57% du dépôt résiduel entre 1995 et 2005 (zone « Valais_glob »), mais tel qu'évoqué précédemment, cette tendance est principalement liée aux différences de bathymétrie au Sud du terre-plein entre les deux configurations.



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



Figure 5-9 Comparaisons des configurations 1995 et 2005 (i.e. effet de la mise en place de la digue de protection de l'avant-port) basées sur des paramètres statistiques (moyennes ou percentiles calculés sur 1 an) de différentes variables hydrodynamiques ainsi que sur les évolutions des fonds (sable et vase) à différentes stations de sortie du modèle longeant les bordures extérieures et intérieures du môle.



Evolution du stock de VASE (m³) par zone							
Zone	Année	Dépôt	Obs.				
AVP_GLOB	1995	9 951	+150% de dépôt				
	2005	24 505					
Digue_exterieur	1995	230					
	2005	202					
Secteur de la flèche sableuse	1995	125					
	2005	123					
Valais_glob	1995	1 456	- 57% dépôts				
	2005	617	(principalement lié aux différences de bathymétrie autour du terre-plein entre les deux configurations)				
Zone de dragage (~AVP1)	1995	538	Envasement significatif après la mise en place du				
	2005	13 605	môle				

Tableau 5-4 Comparaison des bilans sédimentaires de vase par zone entre les configurations de 1995 et de 2005.



6. SYNTHESE DES PHASES 1 ET 2

Les résultats des phases 1 et 2 sont ici synthétisés en récapitulant les effets respectifs de chaque phase d'aménagement, ainsi que les différents processus impliqués, permettant d'expliquer les évolutions du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'embouchure du Gouët jusqu'à aujourd'hui.

6.1 SECTEUR DE L'AVANT-PORT

6.1.1 DYNAMIQUE D'ENSABLEMENT

Une première problématique concerne la compréhension des processus hydro-morphosédimentaires qui induisent un ensablement sur le secteur actuellement entretenu de l'avantport (zone «AVP1»).

6.1.1.1 Situations antérieures à la construction du môle (configurations de 1983 et 1995), dont effet de la construction du terre-plein

Une tendance à l'accrétion est obtenue avant et après la construction du terre-plein, avec environ 17 000 m³/an en 1983 et 21 000 m³/an en 1995. Les bathymétries sur ce secteur étant identiques pour les deux configurations, l'effet de la mise en place du terre-plein conduit donc à une augmentation de 25% du dépôt résiduel sur cette zone. Cependant, nous ne disposons pas de données bathymétriques qui nous permettraient de vérifier si cette tendance à l'accrétion d'environ +20 000 m³/an pour une configuration d'aménagement antérieure à la construction du môle est spécifique à la bathymétrie historique reconstituée, ou si elle se trouve être représentative d'une tendance générale de comblement à l'échelle de l'estuaire (voire du fond de baie). En effet, les premières données disponibles après 1995 datent de 2001, c'est-à-dire après la construction du môle lorsque l'avant-port était déjà entretenu à la cote d'exploitation de +4.5 m CM.

On retient donc :

- Un dépôt (résiduel), de l'ordre de 20 000 m³/an, sans qu'on puisse se prononcer sur le fait qu'il s'inscrive dans une tendance évolutive de l'embouchure à cette époque.
- Un effet non significatif du terre-plein sur les accumulations sableuses dans ce secteur, du moins au regard de la question des dragages d'entretien de l'avant-port (la mise en place du terre-plein n'induit que milliers de m³ de dépôt de sable en plus, alors que le dragage de sable dans l'avant-port concerne, dans sa configuration d'exploitation, environ 100 000 m³).

6.1.1.2 Effets de la construction du môle

Les données bathymétriques disponibles afin d'initialiser le modèle pour une situation d'aménagement postérieure à la construction du môle présentent systématiquement un



secteur déjà entretenu par dragage au niveau de l'avant-port. Dans la configuration de 2005, l'effet d'approfondissement de la cote bathymétrique initiale sur la zone d'entretien s'ajoute donc à celui de la mise en place du môle. Les analyses comparatives, basées sur les résultats obtenus à partir des configurations de 1995 et de 2005, ont permis de mettre en évidence les effets suivants liés à la mise en place du môle :

- des flux significatifs orientés (depuis le chenal) en direction de la zone d'appontement de l'avant-port.
- une tendance à l'accrétion sur la zone « AVP1 » passant de 20 816 m³/an en 1995 à 37 397 m³/an en 2005, soit une augmentation de 16 581 m³ (+80%).

Le dépôt résiduel sur la zone « AVP1 » pour la configuration de 2005 est cohérent avec celui obtenu à l'issue de la simulation basée sur la bathymétrie de 2020 (réalisée lors de la phase 1, simulation qui tient compte du dragage d'entretien en tant que condition initiale mais pas au cours de la simulation), qui était de 41 483 m³/an.

<u>On retient donc</u> : une contribution à l'ensablement au maximum (puisque la simulation effectuée en présence du môle tient compte implicitement, dans sa condition initiale, d'un effet de dragage) de 20 000 m³/an liée à la présence du môle de protection de l'avantport.

6.1.1.3 Effet de l'entretien de la zone à la côte d'exploitation +4.5 m CM

L'effet morphodynamique d'un entretien en continu de l'avant-port à la cote d'exploitation de +4.5 m CM peut être analysé à partir de tests de sensibilité réalisés pendant la phase 1 du projet. Deux simulations en configuration d'aménagement actuelle ont été réalisées sur l'année 2018 (forçages hydrodynamiques représentatifs, cf. phase 1), en considérant la même bathymétrie initiale de mars 2020. La première simulation (**A**) ignore les évolutions morphologiques des fonds dans les calculs hydrodynamiques (pas de couplage morphodynamique) et considère une cote uniforme et constante à +4.5 m CM sur l'ensemble de la zone d'entretien. Cela revient implicitement à considérer que l'avant-port est constamment entretenu à une cote d'exploitation de +4.5 m CM. La seconde simulation (**B**) tient compte des évolutions morphologiques des fonds (couplage morphodynamique) et laisse donc l'avant-port progressivement s'ensabler. Cela revient donc, contrairement à la simulation A, à ne pas entretenir l'avant-port à une certaine cote d'exploitation.

Les évolutions morphologiques des fonds associées à la dynamique sableuse sont illustrées sur la Figure 6-1 pour chaque simulation. Les résultats de modélisation mettent en évidence une dynamique d'accrétion nettement plus marquée à l'échelle de la zone de dragage lorsque cette dernière est entretenue à la cote d'exploitation de +4.5 m CM (simulation A), avec une augmentation du dépôt résiduel au minimum de 17 813 m³ sur une année (+43%). Ce résultat nous indique que l'ensablement de l'avant-port est fortement lié à son entretien à une cote d'exploitation : le sable tend naturellement à contrebalancer le déséquilibre introduit par le dragage, jusqu'à atteindre une cote d'équilibre morphodynamique.

<u>On retient donc</u> : une contribution à l'ensablement a minima (puisque la simulation qui sans entretien en cours de calcul tient tout de même compte, implicitement dans sa condition initiale, d'un certain effet du dragage) de 20 000 m³/an liée à l'effet morphodynamique de l'entretien de l'avant-port à la cote d'exploitation de +4.5 m CM.





Figure 6-1 Evolutions morphologiques des fonds résultant de la dynamique sableuse obtenues à l'issue d'un an de simulation dans la configuration actuelle d'aménagement, avec (« simu A », pas de couplage morphodynamique) ou sans (« simu B », évolutions morphologiques considérées au cours de la simulation) prise en compte de l'entretien à la cote d'exploitation +4.5 m CM dans le modèle morphodynamique.

Evolution du stock de SABLE (m ³)						
Zone	Année	Dépôt	Erosion	Evolution		
Zone de dragage	Actuel simu B	51 140	-9 657	41 483		
(~AVP1)	Actuel simu A	89 789	-30 493	59 296		

Tableau 6-1 Comparaison des bilans sédimentaires de sable sur la zone de dragage de l'avantport dans la configuration actuelle d'aménagement, avec (« simu A », pas de couplage morphodynamique) ou sans (« simu B », évolutions morphologiques considérées au cours de la simulation) prise en compte de l'entretien à la cote d'exploitation +4.5 m CM dans le modèle morphodynamique.

6.1.1.4 Effet des dépôts de dragage devant le môle

Les sédiments dragués de l'avant-port, essentiellement sableux, sont en grande partie déposés devant le môle depuis 2007. La configuration de 2005 ne tient ainsi pas compte de l'exhaussement des fonds induit par les dépôts de dragage devant le môle. Dans le but d'évaluer l'effet de ces dépôts sur la dynamique des sables entrant dans l'avant-port et donc sur le taux de retour des sédiments déposés sur l'estran, un test de sensibilité avait été réalisé sur une simulation de 15 jours lors de la phase 1. La bathymétrie de mars 2020 présentant une morphologie bien développée sur la zone de dépôt avait pour cela été arasée devant le môle (côté extérieur) à la cote +6.5 m CM (soit un abaissement des fonds de l'ordre



de 1 à 2 m) en rejoignant progressivement les fonds actuels côté Sud-Est. Les résultats de modélisation ont montré que l'effet morphodynamique des dépôts de dragage devant le môle contribuait à 15% de l'ensablement de l'avant-port, ce qui correspond à un volume d'environ 15 000 m³/an en se référant aux résultats de la simulation A (i.e. considérant un entretien en continu de l'avant-port, cf. section précédente).

<u>On retient donc</u> : une contribution à l'ensablement d'environ 15 000 m³/an (i.e. 15%) liée à l'effet morphologique des dépôts de dragage le long du môle côté extérieur.

6.1.1.5 Synthèse relative à la dynamique d'ensablement de l'avant-port

Sur le secteur entretenu de l'avant-port (« AVP1 »), l'analyse des résultats de modélisation des différentes configurations (phases) d'aménagement indiquent approximativement que :

- 40 000 m³ de dépôt (résiduel) liés aux aménagements nécessaires à son exploitation, c'est à dire à la construction du môle (ensablement induit jusqu'à 20 000 m³) et à l'entretien de l'avant-port à la cote d'exploitation de +4.5 m CM (ensablement induit a minima de 20 000 m³), soit une contribution d'environ 50% à la dynamique d'ensablement (80 000 m³/an d'après les données des opérations de dragage);
- 15 000 m³ sont liés à l'effet morphologique des dépôts de dragage le long du môle côté extérieur induisant un transport résiduel plus intense en direction de l'avant-port, soit une contribution de 15 à 20% à la dynamique d'ensablement ;
- 20 000 m³ qui seraient liés à une tendance naturelle à l'accrétion sur ce secteur de l'embouchure, soit potentiellement une contribution de 25% à la dynamique d'ensablement. Il n'est cependant pas possible de statuer sur la représentativité de cette tendance, c'est-à-dire de déterminer si elle est spécifique à la bathymétrie historique reconstituée, ou si elle s'inscrit dans une tendance générale de comblement dans ce secteur de l'embouchure de l'estuaire (une contribution d'une tendance à une échelle encore plus large, celle du fond de baie, n'est pas non plus à exclure).

Il faut également mentionner des contributions, jugées secondaires (puisque la modélisation reproduit bien la majorité du volume estimé d'après les données de dragage) qui n'ont pas été quantifiés :

- Les processus liés aux interactions sable/vase : le sable qui est transporté vers l'avant-port en flot, en repart potentiellement plus difficilement puisque la vase qui se dépose dans l'avant-port confère une certaine cohésion à l'ensemble du sédiment superficiel.
- Les marges d'erreur sur la quantification des volumes de sable dragués : les marges d'erreur peuvent s'appliquer directement aux volumes (sable + vase dragués) et à la répartition des deux types de sédiment (répartition qui est estimée à partir d'échantillons qui peuvent difficilement représenter de manière exhaustive l'ensemble des dragages).



6.1.2 DYNAMIQUE D'ENVASEMENT

Les cartes de dépôt (Figure 6-2) et les bilans volumétriques (Tableau 6-2) de vase obtenus après 1 an de simulation pour les différentes configurations d'aménagement mettent clairement en évidence l'effet majeur du môle sur la dynamique d'envasement de la zone d'entretien de l'avant-port :

- Avant la mise en place du môle, le secteur actuellement entretenu de l'avantport était essentiellement sableux, avec un dépôt résiduel de 370 m³/an pour la configuration de 1983, et 538 m³/an pour celle de 1995 incluant le terre-plein à la pointe de Cesson. Ces quelques centaines de m³ ne sont pas significatifs, c'est à dire que la présence du terre-plein seul n'induisait pas d'envasement significatif de l'avant-port.
- Après la construction du môle, les épaisseurs de vase déposées le long des quais en arrière de ce dernier atteignent 30 cm pour la configuration de 2005, avec un volume de vase déposé à l'échelle de la zone d'entretien « AVP1 » de 13 605 m³ sur l'année simulée. C'est donc bien le môle de protection qui est l'aménagement qui induit un envasement significatif de l'avant-port. On peut souligner que ce volume de vase déposé sur la zone d'entretien est cohérent avec celui obtenu à partir de la configuration « Actuelle » basée sur la bathymétrie de mars 2020 (14 800 m³; cf. phase 1).

On rappelle d'autre part que, en phase 1 de la présente étude, l'effet des dépôts de dragage devant le môle a également été évalué vis-à-vis de la dynamique d'envasement de l'avantport. En considérant une hypothèse majorante sur la teneur en fine moyenne des sédiments dragués (20%), les résultats de modélisation ont mis en évidence que **20% des sédiments vaseux déposés devant le môle revenaient sur la zone d'entretien de l'avant-port, soit un volume d'environ 5 000 m³/an.**



Rapport de la phase n°2

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



Figure 6-2 Cartographies des dépôts de vase obtenues à l'issue d'un an de simulation pour les différentes configurations d'aménagement.

Evolution du stock de VASE (m ³)						
Zone	Année	Dépôt de vase en 1 an (m ³)				
	1983	370				
Zone de dragage	1995	538				
(~AVP1)	2005	13 605				
	Actuel simu B (maritime) - 2020	14 800				

Tableau 6-2 Comparaison des bilans sédimentaires de vase sur la zone de dragage de l'avant-port « AVP1 » pour les différentes configurations d'aménagement.



6.2 SECTEURS VOISINS

6.2.1 DEVELOPPEMENT DE LA FLECHE SABLEUSE

Les cartes de flux résiduels de sable sur un cycle de marée présentées pour les différentes phases d'aménagement permettent de mettre en évidence l'implication de la construction du terre-plein puis du môle de protection de l'avant-port dans la formation de la flèche sableuse dans le prolongement de ce dernier (i.e. face au secteur du Valais, cf. Figure 6-3).

Dans la situation de 1995, les flux sont maximums et orientés vers le Sud-Sud-Est à l'extrémité du terre-plein, puis diminuent en contournant la bordure Sud de l'endiguement. Ces orientations et gradients de flux sédimentaires (négatifs) témoignent d'un effet significatif du terre-plein dans la formation de la flèche. Les résultats de la configuration de 2005 (i.e. situation actuelle d'aménagement) montrent qu'une large zone de divergence de flux se crée devant le môle avec des flux prononcés orientés vers le Sud-Est sur la moitié de son linéaire. Ce schéma de transport (avec une veine de courant et de donc de transport solide le long du môle qui est bien marquée) a accentué le processus de développement de la flèche sableuse.

De plus, les analyses morpho-sédimentaires réalisés en phase 1, en particulier la comparaison des profils bathymétriques au droit de la plage du Valais depuis 2001 (section « Valais » allant de la plage jusqu'au secteur de la flèche en longeant le Sud de l'endiguement), ont clairement mis en évidence un développement nettement plus prononcé de la flèche à partir de 2007, c'est-à-dire depuis que les sédiments dragués de l'avant-port sont déposés devant le môle.



Rapport de la phase n°2

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



Figure 6-3 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 les différentes configurations d'aménagement. Pour la configuration de 1983, le trait noir en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il sera construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats.

On peut également souligner que la dynamique de la flèche sableuse semble être caractérisée par une certaine cyclicité – génération à l'extrémité du terre-plein, développement dans l'alignement du môle/exhaussement, migration vers le Valais, aplanissement (cf. rapport phase 1) - avec notamment des configurations morphologiques des fonds propices à un phénomène « d'auto-entretien » de la flèche. C'est par exemple le cas de la configuration « Actuelle » initialisée avec la bathymétrie de mars 2020, caractérisée par une flèche sableuse fortement développée : 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 côté plage du Valais (Figure 6-3). Ce type de schéma de transport convergent contribue à l'exhaussement de la flèche (jusqu'à ce que par exemple un (ou plusieurs) évènement(s) de vagues énergétiques(s) conduisent à des évolutions morphologiques significatives).



6.2.2 SECTEUR SUD DU TERRE-PLEIN/ VALAIS

6.2.2.1 Dynamique sableuse

À la suite de la mise en place du terre-plein, une zone préférentielle de dépôt de sable est apparue au Sud de ce dernier, et notamment sur le secteur du Valais. L'intensification des flux à l'extrémité du terre-plein et les gradients de flux négatifs en direction de la plage ont favorisé le dépôt du sable au Sud du terre-plein. La zone de la plage du Valais, qui était plutôt caractérisée par une tendance à l'érosion en 1983 (~ - 5 000 m³/an), est devenue une zone d'accrétion de sable suite à la construction du terre-plein en 1995 (~ + 30 000 m³/an).

La construction du môle a influencé la dynamique sableuse à l'extrémité du terre-plein et sur le secteur où la flèche sableuse s'est développée. Des modulations du stock sableux sur le secteur du Valais en sont très probablement la conséquence (e.g. 21 597 m³ de dépôt résiduel pour la configuration de 2005). Néanmoins, ces modulations restent largement endeçà des effets induits par la mise en place du terre-plein.

La mise en place du terre-plein a donc eu l'effet le plus significatif sur l'évolution du stock sableux sur le secteur du Valais.

Evolution du stock de SABLE (m ³)						
Zone	Année	Evolution (m ³)				
	1983	-4 868				
Valais glob	1995	+29 054				
	2005	+21 597				
	Actuel simu B (maritime) - 2020	+16 419				

 Tableau 6-3 Comparaison des bilans sédimentaires de sable sur le secteur du Valais pour les différentes configurations d'aménagement.

6.2.2.2 Dynamique d'envasement

6.2.2.2.1 Effets des différents aménagements

Avant la construction du terre-plein, le secteur du Valais était essentiellement sableux, à l'image du faible dépôt annuel de vase de 145 m³ obtenu sur la zone à partir de la configuration de 1983.

Suite à la mise en place du terre-plein, les conditions hydrodynamiques ont été fortement atténuées au Sud du terre-plein, en particulier la contribution des vagues aux contraintes de fond régissant les processus d'érosion et de dépôt des sédiments en suspension près du fond. Les résultats de modélisation mettent ainsi en évidence un effet très net du terre-plein sur l'envasement de ce secteur (cf. cartes de dépôt de vase sur la Figure 6-2, bilans



volumétriques dans le Tableau 6-4), avec 1 456 m³ de vase déposés pour la configuration de 1995 avec terre-plein.

Pour les configurations d'aménagement postérieures à la construction du môle (2005 et 2020), les volumes de vase déposés sur une année sont plus faibles qu'en 1995 (617 m³ et 882 m³, respectivement ; cf. Tableau 6-4). Ces différences peuvent s'expliquer par les bathymétries sensiblement différentes sur ce secteur en comparaison à la situation avant la construction du môle, qui influencent ainsi les conditions favorables au dépôt de la vase.

Concernant les contributions des différentes phases d'aménagement, on peut donc conclure que l'envasement sur le secteur du Valais est très majoritairement lié à l'effet du terre-plein.

Evolution du stock de VASE (m ³)				
Zone	Année	Dépôt de vase en 1 an (m ³)		
Valais_glob	1983	145		
	1995	1 456		
	2005	617		
	Actuel simu B (maritime) - 2020	882		

Tableau 6-4 Comparaison des bilans sédimentaires de vase sur le secteur du Valais pour les différentes configurations d'aménagement.

6.2.2.2.2 Effet des dépôts de dragage devant le môle

Les résultats de simulation ont également permis d'évaluer la contribution de la fraction vaseuse des dépôts de dragage devant le môle à la dynamique d'envasement sur le secteur du Valais : cette contribution est au maximum de 15% à l'échelle d'une année simulée, soit environ 100 m³/an. Par ailleurs, il est important de souligner qu'en absolu seulement 0.3% du volume de vase déposé devant le môle (22 800 m³) est effectivement retrouvé sur le secteur du Valais, la majorité étant donc redistribué sur d'autres zones.

6.2.2.2.3 Effet potentiel de la flèche sableuse dans le prolongement du môle

L'effet potentiel de la flèche sableuse sur l'envasement du secteur du Valais a été analysé. La Figure 6-4 illustre les champs de hauteurs significatives maximales sur 1 cycle de marée, obtenus au cours du même évènement énergétique (combiné à une marée de vive-eau) pour les configurations initialisées avec les bathymétries de novembre 2005 et de mars 2020, respectivement. La flèche sableuse était très peu développée en 2005, contrairement à la situation de mars 2020. Les résultats de Hs montrent une forte atténuation des vagues en présence de la flèche pour la situation de 2020, nettement moins marquée dans la configuration de 2005. La zone d'atténuation concerne l'essentiel du linéaire de la face Sud



de l'endiguement, et s'étend jusqu'à la plage du Valais. Cette diminution des Hs se traduit par une diminution des contraintes de cisaillement de fond, avec ainsi des conditions hydrodynamiques moins énergétiques favorisant le dépôt de la vase. On peut donc considérer que la présence d'une morphologie de flèche sableuse développée dans le prolongement du môle peut contribuer à l'envasement du secteur du Valais pour certaines conditions de forçages. En effet, cette influence de la flèche n'est pas généralisable et concerne probablement certaines combinaisons spécifiques de conditions de vagues incidentes et de niveaux de marée.



Figure 6-4 Effet d'une morphologie de flèche sableuse plus ou moins développée sur l'atténuation des vagues sur le secteur du Valais : comparaison des distributions de Hs pour des conditions énergétiques de vagues et pendant une pleine mer de vive-eau, en considérant les bathymétries de novembre 2005 et de mars 2020 (flèche peu ou fortement développée, respectivement).



Rapport de la phase n°2 Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué





Figure 7-1 Evolution de l'épaisseur de sédiments (sable) dans la zone d'étude pour les différentes configurations historiques. Pour la configuration de 1983, le trait noir en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il sera construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats.





Figure 7-2 Transport résiduel (sable) dans la zone d'étude pour les différentes configurations historiques au cours de cycle de marée autour de la pleine mer du 06/01/2018 à 09:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, hs moyen). Pour la configuration de 1983, le trait blanc en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il sera construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats.





Figure 7-3 Transport résiduel (sable) dans la zone d'étude pour les différentes configurations historiques au cours de cycle de marée autour de la pleine mer du 04/02/2018 à 09:00 UT0 (marée de vive-eau moyenne, hs fort). Pour la configuration de 1983, le trait blanc en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il sera construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats.





Zone	Année	Dépôt	Erosion	Evolution
AVP_GLOB	1983	116 304	-37 898	78 406
	1995	109 041	-34 604	74 437
	2005	117 014	-38 592	78 423
	Actuel simu B	134 161	-48 999	85 162
	Actuel simu A	475 661	-269 979	205 682
digue_exterieur	1983	24 093	-11 646	12 447
	1995	26 459	-4 385	22 074
	2005	31 904	-17 058	14 846
	Actuel simu B	17 021	-54 979	-37 958
	Actuel simu A	17 946	-233 535	-215 588
fleche_sableuse_Valais	1983	19 408	-2 769	16 638
	1995	8 813	-15 640	-6 827
	2005	13 725	-11 312	2 414
	Actuel simu B	14 397	-65 250	-50 854
	Actuel simu A	204 030	-81 137	122 894
Valais	1983	18 251	-23 119	-4 868
	1995	33 163	-4 108	29 054
	2005	23 828	-2 231	21 597
	Actuel simu B	18 203	-1 784	16 419
	Actuel simu A	22 562	-4 912	17 650
Zone de dragage	1983	34 013	-17 187	16 826
	1995	35 865	-15 048	20 816
	2005	41 836	-4 438	37 397
	Actuel simu B	51 140	-9 657	41 483
	Actuel simu A	89 789	-30 493	59 296

Tableau 7-1 Bilan sédimentaire des sables pour les différentes configurations



Figure 7-4 Evolution de l'épaisseur de sédiments (vase) dans la zone d'étude pour les différentes configurations historiques. Pour la configuration de 1983, le trait noir en pointillés permet de localiser le terre-plein tel qu'il sera construit par la suite, afin de faciliter la comparaison des résultats.



Rapport de la phase n°2 Etude de modélisation hydro-sédimentaire relative aux opérations de dragage de l'avant-port. Port du Légué