



Ensablement du port du Légué : apport de la modélisation à la compréhension des processus hydro-sédimentaires et à la stratégie de gestion des sédiments

Aurélien RIVIER¹, Baptiste MENGUAL², Benoit WAELES², Clarisse HAYOUN¹

1. ACTIMAR, 36 quai de la Douane, 29200 Brest, France

aurelie.rivier@actimar.fr

2. SAS Waeles Marine Consultants, 53 rue du Commandant Groix, 29200 Brest, France.

Résumé :

L'avant-port du Légué (Saint-Brieuc), à l'embouchure d'un estuaire qui découvre entièrement à basse-mer, est actuellement dragué tout au long de l'année pour maintenir les fonds en-deçà d'une certaine cote d'exploitation. L'objectif de cette étude est de comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'embouchure de l'estuaire du Légué, en distinguant l'influence des différentes phases d'aménagement de l'avant-port (création d'un terre-plein puis d'une digue de protection), puis d'évaluer des solutions alternatives pour la gestion des sédiments.

Un modèle morphodynamique (système TELEMAC) est mis en place et validé en niveau, courant et état de mer grâce à des mesures effectuées sur site. Les deux types de sédimentation, sableuse et vaseuse, relativement bien sectorisés dans l'avant-port, sont traités séparément. Le modèle simule de façon réaliste la localisation et les volumes des sédimentations sableuses et vaseuses dans l'avant-port. Les résultats de la modélisation indiquent notamment que l'ensablement de l'avant-port est effectif pendant une période très courte (environ 20 minutes), qui correspond à l'arrivée du flot, au tout début du remplissage de l'avant-port.

Des simulations de configurations historiques du site, reprenant les aménagements successifs de l'avant-port, ont aussi été menées pour quantifier leur influence sur les conditions de son ensablement. Enfin différentes solutions d'aménagement et de gestion, pour réduire les besoins en dragage, ont été évaluées sur la base de modélisations complémentaires (système TELEMAC et SWASH). Il s'agit en particulier d'une solution de type seuil inclinable permettant de contenir le flux de sable au début du flot, tout en autorisant la reprise des sédiments accumulés devant l'ouvrage lors du jusant.

Mots-clés :

Ensablement portuaire, Modélisation hydro-sédimentaire, Port du Légué.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

1. Introduction

Les phénomènes d'ensablement et d'envasement portuaire, influencés par les régimes de marées, les courants, les débits fluviaux et les apports sédimentaires, exigent des opérations régulières de dragage pour maintenir la navigabilité des voies maritimes et assurer le bon fonctionnement des infrastructures portuaires.

Le site du Légué est localisé au fond de la Baie de Saint-Brieuc à l'embouchure de l'estuaire du Gouët. De nombreux aménagements y ont été réalisés, notamment à l'embouchure : création d'un terre-plein industrialo-portuaire dans les années 80 (impliquant le déplacement de l'embouchure d'environ 1 km vers l'aval) puis au début des années 2000 construction d'un môle de protection pour constituer un avant-port d'échouage capable d'accueillir des navires de commerce (Figure 1). Le site est macrotidal (marnage de l'ordre de 5m en morte-eau et 10m en morte-eau, semi-diurne), avec une asymétrie des courants en faveur du flot. Les conditions de vagues incidentes (à l'extérieur de l'avant-port) sont globalement très peu énergétiques (Hs moyen de 21 cm, percentile 98 de 66 cm, maximum de 1.8 m en 25 ans, cf. HOMERE), les conditions les plus défavorables étant levées par des vents de Nord à Nord-Est dans le golfe normand-breton. La sédimentation dans l'avant-port, essentiellement sableuse (80%), est conséquente, et l'exploitation de l'avant-port (à une cote de +5.2m CM) nécessite un dragage de 120 000 à 140 000 m³ par an. Les opérations de dragage, jusqu'à une cote cible de +4.5m CM, sont réparties sur l'ensemble de l'année. La technique de dragage (cf. arrêté préfectoral) consiste à prélever le sédiment dans l'avant-port à marée basse par tractopelle, et à le déposer derrière le môle (Figure 1, sauf juillet-août : dépôt à terre). Les coûts de ces dragages d'entretien sont considérables, et le devenir des dépôts le long du môle reste à préciser.

Les objectifs de cette étude sont :

- a) Mettre en place et valider un modèle morphodynamique représentant la dynamique du sable et de la vase pour différentes configurations d'aménagement : avant la création de l'avant-port (1983), après la mise en place du terre-plein (1995), après la construction du môle de protection (2005, avant les premiers dragages d'entretien) et situation actuelle (bathymétrie de 2020) ;
- b) Comprendre les mécanismes à l'origine de l'ensablement de l'avant-port ;
- c) Proposer une solution d'aménagement permettant de réduire autant que possible le phénomène, en s'appuyant sur différents outils de modélisation complémentaires.

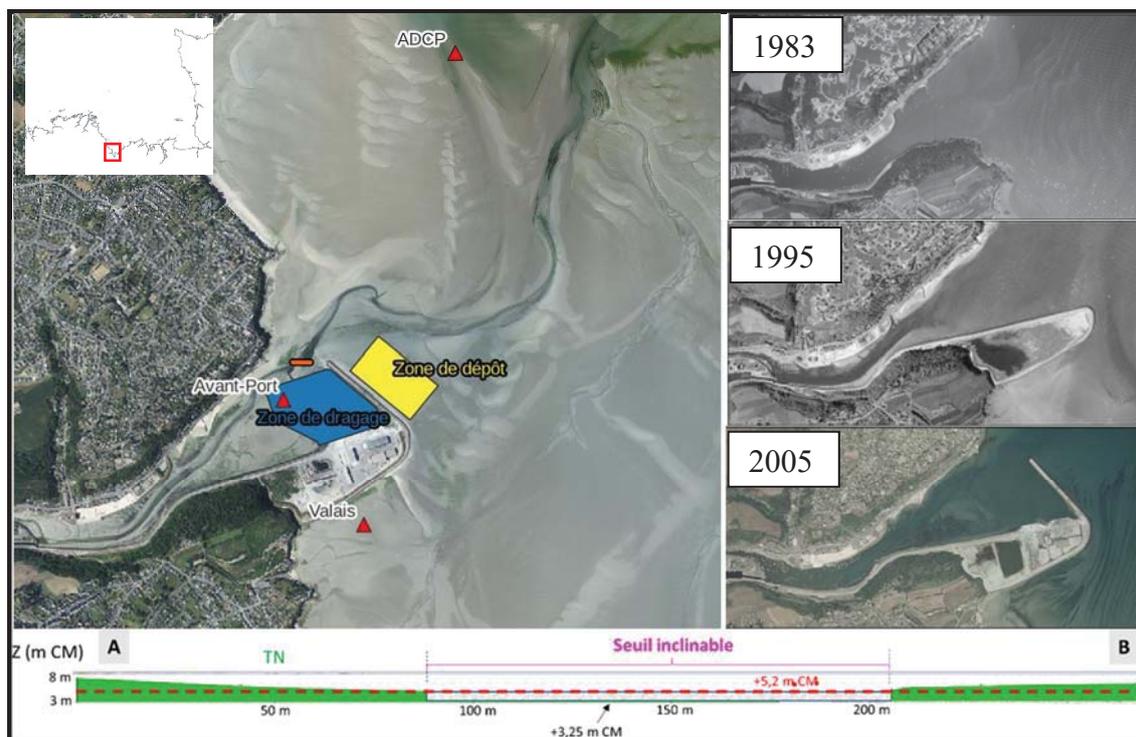


Figure 1. Localisation (gauche) du site d'étude, des zones de dragage et de dépôt, de l'aménagement proposé (trait orange) et des stations d'instrumentation (triangles rouges) ; photographies aériennes du site en 1983, 1995 et 2005 (droite) ; coupe longitudinale de l'aménagement (bas).

2. Mise en place et validation du système de modélisation morphodynamique

2.1 Présentation des modules

La modélisation hydro-sédimentaire du secteur d'étude mobilise trois codes numériques du système TELEMAC (©EDF-LNHE) qui fonctionnent sur la même grille de calcul :

- TELEMAC-2D qui calcule les niveaux d'eau et les courants. A noter qu'un modèle 2DH est particulièrement adapté sur ce site d'estran macrotidal, les courants étant très franchement barotropes.
- TOMAWAC pour la modélisation de la génération, de la propagation et de la dissipation des états de mer du large vers le site d'étude, et tenant compte des effets induits par les champs de courant (circulation moyenne) et par les niveaux calculés par TELEMAC-2D ;
- SISYPHE qui simule la dynamique sédimentaire sous l'action combinée des vagues et des courants. Il permet de traiter à la fois le transport des sédiments non-cohésifs (sables) et cohésifs (vases). Concernant la dynamique des sables, les formules de capacité de transport (charriage et suspension) de WU & LIN (2014) ont été implémentées par Actimar dans le module SISYPHE, qui permettent de rendre

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

compte de l'action combinée des vagues et courants, ainsi que de l'asymétrie des vagues. Les évolutions morphologiques des fonds sont prises en compte au cours des simulations (couplage morphodynamique).

2.2 Maillages et paramétrages

Le modèle couvre l'ensemble de la baie de Saint-Brieuc, et s'étend du port de plaisance en amont de l'estuaire du Gouët jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres au large du site d'étude (frontière maritime).

La grille de calcul du modèle (Figure 2) est non-structurée avec une résolution de quelques kilomètres au large, progressivement raffinée en direction de la zone d'étude. Différents maillages, plus ou moins résolus sur la zone d'intérêt, ont été réalisés en fonction des échelles de temps investiguées. Afin d'appréhender les processus hydrodynamiques clés sur la zone (analyses de sensibilité et calibration du modèle), des simulations courtes sur une 1 à 2 marées sont réalisées, permettant ainsi d'affiner la résolution à 5 m dans les zones de dragage de l'avant-port et de dépôt de sédiments (maillage de 31 030 nœuds).

Pour des simulations annuelles couvrant toute la saison de dragage, le maillage est optimisé afin de garantir des temps de calcul acceptables tout en conservant les schémas de transport résiduels du sable et de la vase. La résolution du maillage (15 365 nœuds de calcul au total) est ainsi de 12m dans l'avant-port. A noter que les zones non maillées (exclues du calcul) dépendent des configurations historiques simulées (1983, 1990 et 2005).

La bathymétrie du modèle dans l'avant-port et à proximité du site correspond au levé de la CCI de mars 2020 (dernière bathymétrie suffisamment étendue au démarrage de l'étude). Pour les configurations historiques, la bathymétrie est constituée par d'anciens jeux de données (archives de cartes anciennes et de projets d'aménagement) fournies par la CCI.

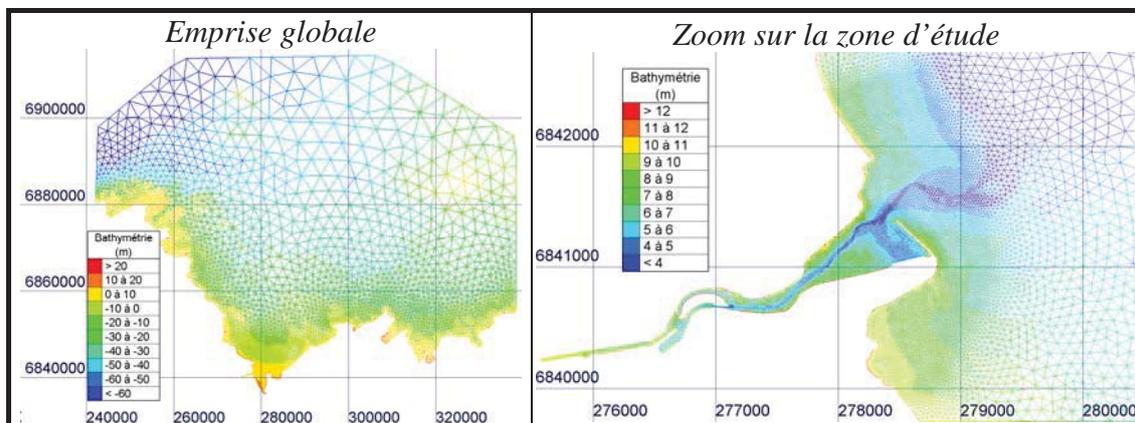


Figure 2. Maillages et bathymétrie du modèle : emprise globale et zoom sur l'avant-port pour la configuration actuelle (maillage optimisé).

Le modèle hydrodynamique TELEMAC est forcé (à chaque pas de temps) le long de sa limite ouverte par les niveaux d'eau calculés à partir de l'atlas de marée FES2014 (LYARD *et al.*, 2021), et par les champs de vent (intensité et direction) et de pression atmosphérique issus de la réanalyse CFSR (SAHA *et al.*, 2010) sur l'ensemble du domaine. Le frottement sur le fond est prescrit avec un coefficient de rugosité de Nikuradse de 10 mm.

Le modèle spectral de vagues TOMAWAC est forcé à la limite maritime par des spectres paramétriques (JONSWAP) calculés à partir des paramètres de vagues (hauteur significative, période et direction de pic) issus de la base de données HOMERE ou MARC NORGAS-UG (BOUDIERE *et al.*, 2013), ainsi que par les champs de vent CFSR sur l'ensemble du domaine. Le modèle de vagues simule la génération par le vent, la propagation (e.g. réfraction), et la dissipation par déferlement (BATTJES & JANSSEN, 1978), par frottement sur le fond et par moutonnement.

Le paramétrage du modèle de transport sédimentaire SISYPHE est le suivant :

- a) Formulation de WU & LIN (2014) pour le calcul des flux de transport sableux avec prise en compte d'une classe de sable (diamètre entre 125 et 175 μm suivant les simulations).
- b) Résolution des équations d'advection/dispersion pour le transport des vases (vitesse de chute de 0.1 mm/s) avec prise en compte de flux d'érosion/dépôt (contrainte critique d'érosion : 0.3 N/m² ; contrainte critique de dépôt : 0.2 N/m²)

2.3 Validation du modèle

Les niveaux d'eau et les courants modélisés sont comparés à ceux mesurés par un ADCP déployé du 21 octobre au 5 novembre 2021 au nord de l'embouchure de l'estuaire du Gouët (Figure 3). Le modèle reproduit très correctement les courbes de marée (en intensité comme en phasage) ainsi que les courants intégrés sur la verticale (composantes zonale « U » (>0 vers l'Ouest) et méridionale « V » (> 0 vers le Nord)). Les asymétries flot/jusant caractéristiques dans la zone sont en particulier très bien reproduites.

Les hauteurs significatives (Hs) et les périodes moyennes (Tmoy, correspondant à Tm₀₁) des états de mer mesurées et prédites par le modèle sont comparées sur la Figure 3 à la localisation de l'ADCP, colocalisé avec un capteur de pression. Les comparaisons (également réalisées aux stations "Avant-port" et "Valais" ; non illustrées) mettent en évidence la capacité du modèle à reproduire les états de mer à l'intérieur et à l'extérieur du port.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

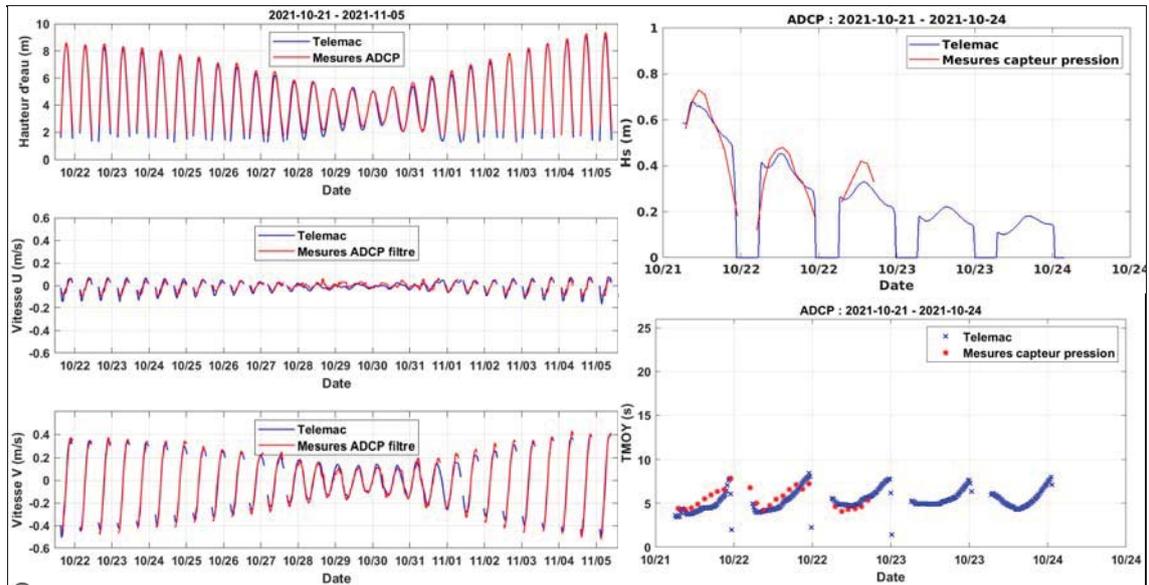


Figure 3. Comparaison des résultats du modèle avec les mesures effectuées sur site à la station de déploiement de l'ADCP, station également équipée d'un capteur de pression, (localisation Figure 1).

3. Processus contribuant à la dynamique de comblement sédimentaire de l'avant-port

3.1 L'asymétrie de la marée, moteur du processus d'ensablement

Les résultats du modèle (Figure 4) indiquent que le transport résiduel est entrant sur le secteur de l'avant-port du fait de l'asymétrie de la marée en faveur du flot. L'ensablement de la zone d'entretien intervient sur une courte période (~ 20 minutes) au tout début du remplissage de l'avant-port lors du flot (~ 3 heures avant la pleine mer). Les simulations longues sur une année mettent en évidence que l'ensablement intervient principalement lors des vives eaux et qu'il est négligeable pour des marées ayant un coefficient de marée inférieur à 60.

Les résultats des simulations indiquent que l'asymétrie de la marée constitue le mécanisme principal de la dynamique de comblement sur le secteur de l'avant-port (non illustré), les évolutions morphologiques dans l'avant-port sont peu sensibles à la prise en compte des vagues dans la modélisation hydrosédimentaire.

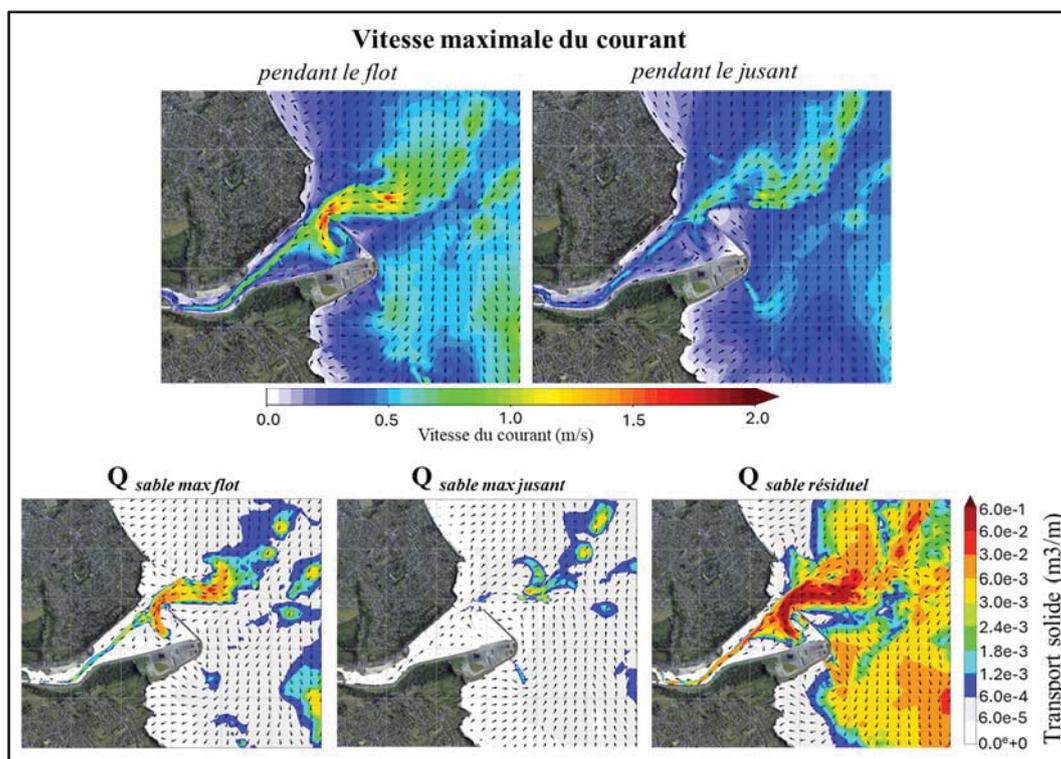


Figure 4. Vitesse du courant au maximum de flot et de jusant (haut), et transport solide maximal lors du flot, du jusant et intégré sur un cycle de marée (bas) pour une condition de vive-eau moyenne, une hauteur significative des vagues médiane et un débit moyen du Gouët.

3.2 Dynamique d'ensablement : effets des différentes phases d'aménagement (bilans sédimentaires sur la zone d'entretien)

Sur le secteur entretenu de l'avant-port (cf. zone de dragage sur la Figure 1), l'analyse des résultats de modélisation des différentes configurations (phases) d'aménagement indiquent qu'approximativement :

- 40 000 m³ de dépôt (résiduel) sont 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 cible 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). 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 ».
- 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 ;

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

- c) 20 000 m³ 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 déterminer si cette tendance est due 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).

3.3 Dynamique d'envasement

Les modélisations indiquent un processus d'envasement classique : les matières en suspension qui entrent dans un port (abrité des vagues) à chaque marée décantent dès lors que les courants deviennent suffisamment peu énergétiques (autour de l'étale de pleine-mer), les dépôts n'étant que partiellement repris par les courants de jusant. En l'occurrence, les simulations annuelles réalisées pour les différentes configurations d'aménagement mettent clairement en évidence l'effet majeur du môle sur la dynamique d'envasement de l'avant-port. Avant sa construction, le volume de vase déposé à l'échelle de la zone d'entretien était d'environ 450 m³/an (i.e. fonds majoritairement sableux), contre 13 605 m³/an pour la situation actuelle. A noter que de la même manière que pour le sable, environ 20% des sédiments vaseux dragués et déposés devant le môle reviennent sur la zone d'entretien de l'avant-port (soit environ 5000 m³/an).

4. Evaluation d'une solution d'aménagement de type seuil inclinable afin de limiter l'ensablement

L'aménagement projeté présenté ici (d'autres solutions plus classiques ayant également été étudiées) consiste à mettre en place un ouvrage inclinable en travers du chenal (cf. localisation sur la Figure 1) dans le but de limiter les flux sableux orientés vers l'avant-port au début du flot, lorsque les courants sont les plus intenses (position levée), puis de permettre la reprise des sédiments accumulés devant l'ouvrage lors du jusant (position abaissée). Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes : une hauteur de 1.95 m par rapport au fond sédimentaire dans l'axe du chenal (permettant ainsi de ne pas impacter la navigation avec une arase positionnée à la cote d'exploitation de +5.20 m CM), une épaisseur de 0.5 m, et une longueur de 80 m (cf. positionnement sur la Figure 1).

L'évaluation de la solution d'aménagement repose ici sur la mise en place de deux types de modélisations complémentaires : une configuration 2DV à haute résolution du modèle non-hydrostatique SWASH permettant de décrire la dynamique hydro-sédimentaire dans le champ proche de l'ouvrage, et le système de modélisation TELEMAC permettant d'analyser à la fois les dynamiques résiduelles d'ensablement et d'envasement à des échelles spatio-temporelles plus importantes.

4.1 Méthodologie spécifique : modélisation SWASH 2DV à haute résolution dans le champ proche de l'ouvrage

Le système de modélisation TELEMAC 2DH, reposant sur une formulation en capacité de transport solide, présente certaines limitations vis-à-vis des estimations de flux passant au-dessus de l'ouvrage. En particulier, il ne permet pas de :

- a) Reproduire explicitement la dynamique du sable en suspension, qui correspond au mode de transport dominant pour le sable fin du Légué, et en particulier les profils verticaux de concentrations qui peuvent être marqués (le sable en suspension se concentre près du fond).
- b) Tenir compte des effets d'accélération sur la verticale ainsi que de potentiels ressauts hydrauliques générés au contact du seuil, susceptibles *in fine* d'influencer la quantité de sable franchissant le seuil.

Pour préciser l'évaluation de l'efficacité du seuil à limiter des flux sableux entrants dans l'avant-port, des simulations numériques sont réalisées avec le modèle SWASH (<http://swash.sourceforge.net/> ; ZIJLEMA *et al.*, 2011). Ce modèle à résolution de phase comprend un terme de pression non-hydrostatique permettant de résoudre la structure verticale de l'écoulement. Outre son application principale dédiée à la propagation des vagues, SWASH permet également d'étudier les circulations et le transport en suspension de sédiments non-cohésifs et cohésifs en 3D (échanges à l'interface eau/sédiment, advection par les courants et les gradients de densité, diffusion par la turbulence).

A partir des sorties TELEMAC à proximité du seuil (à quelques dizaines de mètres dans l'axe du chenal, côté Baie), différentes combinaisons de niveaux d'eau et de courants de flot d'une marée de vive-eau (2 janvier 2018) sont simulées avec SWASH, pour deux granulométries de sable représentatives de la zone (125 μm et 175 μm). Les caractéristiques de la configuration SWASH, de type « canal numérique » 2DV, sont : longueur de 600 m, résolution horizontale de 0.25 m, 10 niveaux sigma sur la verticale (cf. Figure 5), fond non érodable. Le courant est forcé en $x=0$ m (avec également une initialisation sur le domaine) et le seuil est positionné en $x=150$ m. Sur les 15 m en amont du seuil, un profil théorique de concentration, calculé selon la formulation de WU & LIN (2014), est initialisé. A noter que le dépôt de sable (initialement mis en suspension) sur le fond est possible (dès lors que la contrainte de cisaillement près du fond est inférieure au seuil de mise en mouvement, pour un paramètre de mobilité de Shields à 0.03).

4.2 Résultats des simulations SWASH

Quelle que soit la granulométrie de sable testée, les résultats indiquent que même pour le courant le plus fort de 1.5 m/s intervenant au début du flot, lorsque la tranche d'eau au-dessus de l'arase du seuil n'est que de 55 cm, la majorité du sable est bloquée par le seuil (Figure 5). Par exemple, pour cette condition hydrodynamique défavorable et le sable le plus fin, le flux en suspension intégré sur la tranche d'eau au-dessus du seuil est de 1.9 kg/m/s, contre 9.5 kg/m/s à l'échelle de la colonne d'eau en l'absence du seuil (soit

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

une réduction du flux entrant de 80%). A mesure que la tranche d'eau au-dessus du seuil augmente et que l'intensité du courant diminue, le sable tend à se concentrer près du fond et la proportion de sable passant au-dessus du seuil décroît fortement (la réduction du flux devient alors supérieure à 90%).

Tableau 1. Comparaison des flux de sable intégrés à l'échelle du flot (marée de vive-eau), avec ou sans la présence du seuil inclinable.

Diamètre (μm)	Flux sans seuil (kg/m)	Flux avec seuil (kg/m)	Réduction
125	6505	1195	-82%
175	2925	216	-93%

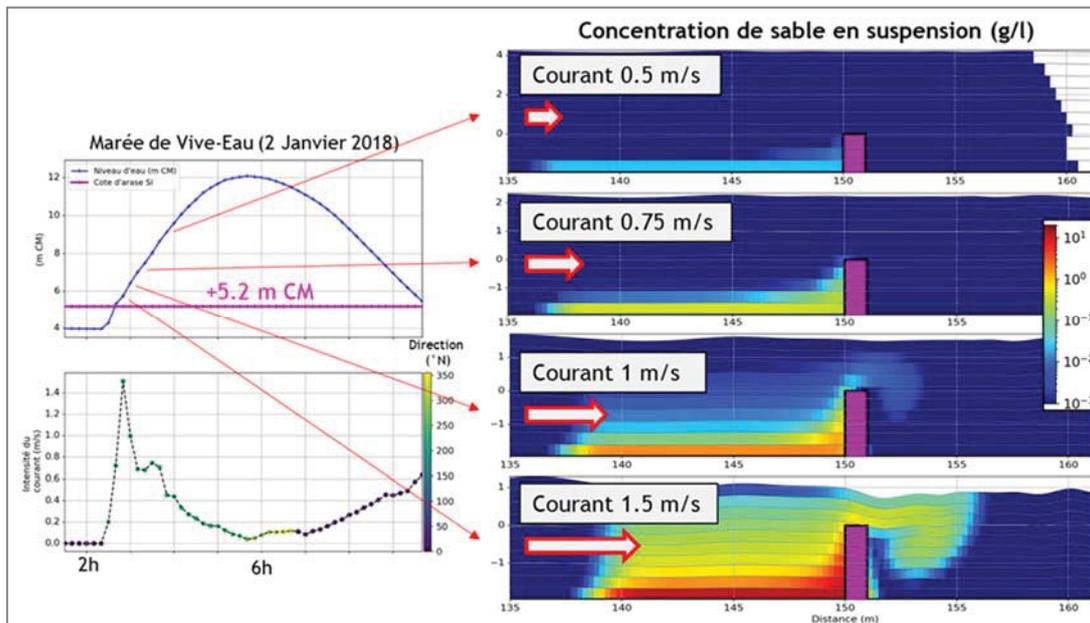


Figure 5. Concentrations en suspension de sables (en g/l) obtenues avec le modèle 2DV SWASH dans le champ proche du seuil inclinable pour un sable de 175, pour différentes combinaisons de niveaux d'eau et de courants au cours du flot.

4.3 Modélisation TELEMAC2D-TOMAWAC-SISYPHE (sur l'ensemble de la zone d'étude)

Le seuil inclinable a été paramétré dans le modèle Telemac/Tomawac/Sisyphe, pour des simulations de la dynamique sableuse. Les volumes de sable entrant dans l'avant-port sont réduits de façon substantielle. Cependant au bout de quelques jours de simulation, les sédiments sableux s'amassent devant le seuil côté Baie : les courants de jusant ne sont pas assez forts pour reprendre les sables accumulés devant le seuil. Pour y remédier, les heures d'ouverture et de fermeture du seuil sont modifiées pour créer un effet de chasse. L'abaissement du seuil est réalisé au moment où la différence de niveau d'eau est la plus

importante entre chaque côté de l'ouvrage, et avant que les courants ne redeviennent entrants vers l'avant-port (i.e. avant la bascule de flot).

Cet effet de chasse est efficace et permet de limiter l'accumulation de sable devant la porte. Toutefois, au bout de quelques mois, une certaine accumulation de sable devant le seuil est simulée. A noter que le modèle est proche de ses limites d'utilisation dans ce cas, avec notamment des processus de type « champs proche » qui ne peuvent être reproduits, en particulier avec une résolution de quelques mètres à proximité de l'ouvrage. Concernant l'envasement potentielle, les simulations ont montré que les dépôts liés aux apports naturels maritimes sont du même ordre de grandeur qu'en situation actuelle, il n'est donc pas attendu de changement significatif d'envasement avec la présence de ce seuil inclinable.

5. Discussions et conclusions

Le système de modélisation morphodynamique, mis en place et validé sur la zone d'intérêt, avec des volumes déposés cohérents par rapport aux volumes de sédiments dragués, a permis de mettre en avant le principal processus responsable de l'ensablement de l'avant-port (représentant 80% des sédiments dragués sur la zone d'entretien) : l'asymétrie des courants de marée en faveur du flot, se traduisant par un transport résiduel entrant dans l'avant-port. Les simulations historiques ont permis d'évaluer les effets respectifs des différentes phases d'aménagement ainsi que des dragages d'entretien sur cette dynamique d'ensablement : la majeure partie des dépôts résiduels sont liés à la construction du môle, mais également aux dragages d'entretien eux-mêmes qui introduisent un « déséquilibre morphodynamique » que le sable tend naturellement à contrebalancer.

Afin de limiter le phénomène d'ensablement, une solution de type seuil inclinable en travers du chenal est évaluée à partir d'une méthodologie originale basée sur deux types d'outils de modélisation complémentaires. Les résultats des simulations SWASH 2DV à haute résolution dans le champ proche de l'ouvrage indiquent une réduction de la dynamique d'ensablement de 80 à 90% à l'échelle du flot (marée de vive-eau), ce qui témoigne de l'intérêt de la solution proposée. La solution a également été implémentée dans le système de modélisation morphodynamique, et a notamment permis d'optimiser l'effet de chasse lors du jusant (stratégie d'abaissement du seuil). Ce type de solution semble donc pertinente vis-à-vis des problématiques d'ensablement spécifiques à notre zone d'intérêt. Dans la littérature, de telles solutions sont généralement conçues pour la mise en eau de secteurs portuaires (exemple du projet d'extension du port de Barneville-Carteret) ou la mise en place d'effets de chasse (e.g. GUILLEN-LUDENA *et al.*, 2022). Concernant les effets de chasse, on peut notamment mentionner le barrage à double flux construit sur le Couesnon entre 2006 et 2009 dans la baie du Mont-Saint-Michel, permettant de transporter les sédiments sablo-vaseux vers le large et ainsi maintenir les

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

chenaux, abaisser l'altimétrie des zones intertidales, et prévenir le comblement futur de la baie (BONNOT-COURTOIS, 2020).

Remerciements

Les auteurs remercient la région Bretagne pour le financement de cette étude. Les auteurs remercient David Meunier et Romain Le Gall de l'UBS pour les échanges relatifs à la dynamique hydro-sédimentaire de la Baie de Saint-Brieuc, et pour l'organisation de la campagne de mesures ayant servi de base pour la validation du modèle. Les auteurs remercient la CCI 22 pour la transmission de données nécessaires à ce travail (levés topobathymétriques, analyses sédimentaires, opérations de dragages). Les auteurs remercient le Pôle de Calcul et de Données Marines (PCDM) pour fournir DATARMOR (ressources de calcul).

6. Références bibliographiques

- BATTJES J.A., JANSSEN J.P.F.M. (1978). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*, Coastal Engineering, 569–587. <https://doi.org/10.1061/9780872621909.034>
- BONNOT-COURTOIS C. (2020). *Intertidal sedimentary dynamics in Mont-Saint-Michel bay, a study of its natural evolution and man-made modifications*. Revue Paralia 13, n02, <http://dx.doi.org/10.5150/revue-paralia.2020.n02>
- BOUDIERE E., MAISONDIEU C., ARDHUIN F., ACCENSI M., PINEAU-GUILLOU L., LEPESQUEUR J. (2013). *A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters*. International Journal of Marine Energy 3, e40–e52, 0–e52 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.010>
- GUILLÉN-LUDEÑA S., TOAPAXI J.A., CASTILLO L.G. (2022). *Flushing capacity of a stored volume of water: An experimental study*. Water 14, 2607. <https://doi.org/10.3390/w14172607>
- LYARD F.H., ALLAIN D.J., CANCEZ M., CARRÈRE L., PICOT N. (2021). *FES2014 global ocean tide atlas: design and performance*. Ocean Science 17, 615–649. doi: 10.5194/os-2020-96
- SAHA S., MOORTHI S., WU X., WANG J., NADIGA S., TRIPP P., BEHRINGER D., HOU Y.-T., CHUANG H., IREDELL M., EK M., MENG J., YANG R., MENDEZ M.P., VAN DEN DOOL H., ZHANG Q., WANG W., CHEN M., BECKER E. (2014). *The NCEP Climate Forecast System Version 2*. J. Climate 27, 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- WU W., LIN Q. (2014). *Nonuniform sediment transport under non-breaking waves and currents*. Coastal Engineering, 90, 1-11, doi: 10.1016/j.coastaleng.2014.04.006
- ZIJLEMA M., STELLING G., SMIT P. (2011) *SWASH: an operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters*, Coastal Engineering, 58 992–1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>