

Entre lagune et méditerranée : étude hydro-sédimentaire des échanges étang-mer et de la dynamique littorale de Port-La Nouvelle

Le Dissez A.¹, Walther R.¹, Lagroy De Crouette E.¹, Waeles B.², Ouriqua J.³

¹ ARTELIA, 6 rue de Lorraine 38130 ECHIROLLES, aurelie.ledissez@arteliagroup.com

² Consultant en Génie Côtier, 6 rue V. Heriot ZA Les Minimes 17000 La Rochelle

³ CREOCEAN, Zone Technocean Rue Charles Tellier 17000 La Rochelle

RÉSUMÉ. A l'interface d'un système lagunaire et du littoral méditerranéen, le site de Port-La Nouvelle est le siège d'une dynamique hydro-sédimentaire complexe. Pour l'étudier, trois modèles numériques hydro-sédimentaires utilisant la chaîne de modélisation TELEMAC ont été développés : un modèle hydrodynamique tridimensionnel (3D), un modèle de dépôt de sédiments fins (vaseux) dans le grau sur un an et un modèle d'évolution des fonds marins (sableux) à court terme (1 an) et moyen terme (10 ans). Sont présentés ici leurs objectifs, les multiples forçages appliqués aux limites, les données de calage exceptionnelles disponibles pour leur validation, ainsi que leur contribution à une meilleure compréhension de la dynamique complexe dont le port actuel est le siège

ABSTRACT. Settled in an inlet located between Bages-Sigean lagoon and Mediterranean coast, Port-La Nouvelle harbor is home to a very complex hydro-sedimentary dynamics. In order to study it accurately, three hydro-sedimentary numerical model have been developed using TELEMAC modelling system: one tridimensional hydrodynamic model, one model for the deposit calculation of cohesive sediments within the harbor, one model for morphodynamic calculation of sandy sea bed in the short (1 year) and medium (10 years) terms. Here are presented theirs objectives, their numerous forcings applied at boundaries, available data for calibration and their contribution to a better understanding of the local complex hydrodynamics.

MOTS-CLÉS : modélisation hydro-sédimentaire 3D, sédiments cohésifs et sableux, granulométrie étendue, grau méditerranéen.

KEY WORDS: 3D hydro-sedimentary modelling, cohesive sediments, sandy sediments, extended granulometry, Mediterranean inlet

1. Introduction

Le port de Port-La Nouvelle est situé à l'ouest du golfe du Lion au Sud de Narbonne au débouché du canal de la Robine. Il est aménagé le long du grau de l'étang de Bages-Sigean. Étendu sur les 2,5 km du grau depuis le canal de la Robine jusqu'à la passe d'entrée en mer, il est à l'interface d'un système lagunaire et du littoral méditerranéen ; le site est de ce fait le siège d'une dynamique complexe, conditionnant le fragile équilibre de l'écosystème de l'étang de Bages-Sigean [IFR 12].

Un projet d'extension du port prévoyant la création d'un nouvel avant-port au Nord de la passe d'entrée actuelle est à l'étude. Dans le cadre des études d'impact hydro-sédimentaire du projet, la Région Languedoc-Roussillon, propriétaire du port, a confié au bureau d'études ARTELIA la modélisation numérique hydro-sédimentaire des configurations portuaires actuelle et future. La modélisation a pour objectif final d'évaluer l'impact du projet sur le littoral et les fonds marins, ainsi que son impact sur les échanges entre la mer et l'étang de Bages-Sigean et sur les volumes de dépôts de matériaux fins dans le grau en configuration future.

Pour ce faire, un modèle unidimensionnel d'évolution du trait de côte et trois modèles hydro-sédimentaires particulièrement complexes, utilisant la chaîne de modélisation TELEMAC, ont été développés : un modèle hydrodynamique tridimensionnel (3D), un modèle de dépôt de sédiments fins (vaseux) dans le grau sur un an et un modèle d'évolution des fonds marins (sableux) à court terme (1 an) et moyen terme (10 ans).

L'objet de cet article est de présenter ces trois derniers modèles numériques : leurs objectifs, les forçages appliqués aux limites, les données de calage disponibles et la validation de chacun des trois, ainsi que leur contribution à une meilleure compréhension d'une dynamique complexe dont le port actuel est le siège.

2. Système de modélisation

Les modèles développés dans le cadre de l'étude sont des modèles du système TELEMAC. Ce système est développé par le LNHE (Electricité de France). ARTELIA Eau & Environnement contribue à son développement et a mis au point des modules spécifiques notamment dans le domaine hydro-sédimentaire. Le « système TELEMAC » comporte un certain nombre de modules/logiciels qui sont mis en œuvre en fonction des besoins et objectifs de l'étude. Les logiciels du système TELEMAC utilisent tous la méthode aux éléments finis sur des maillages horizontaux triangulaires. Pour l'ensemble des calculs hydrodynamiques de la présente étude, c'est le module TELEMAC-3D qui est mis en œuvre. Ce module résout les équations régissant la dynamique des écoulements tridimensionnels à surface libre sous l'hypothèse de pression hydrostatique, calculant en tous points du maillage et sur plusieurs points sur la verticale, les champs de vitesses dans les 3 directions et la valeur des quantités scalaires transportées (température, salinité, sédiment en suspension, ...) ; sur les points de surface du maillage l'évolution de la surface libre est calculée. L'introduction de la houle et sa propagation au sein de l'emprise du modèle courantologie est effectuée par le module TOMAWAC. Ce dernier modélise l'évolution en espace et en temps du spectre d'énergie des vagues de vent et de la houle sur l'emprise du modèle et permet de calculer les forces de radiation qui sont ensuite introduites dans le module TELEMAC-3D pour le calcul des courants induits. Pour les aspects hydro-sédimentaires des fonds marins, le couplage de TELEMAC-3D avec le module SISYPHE du système TELEMAC est mis en œuvre.

3. Modélisation tridimensionnelle (3D) de l'hydrodynamique maritime et des échanges étang-mer

3.1. Emprise, bathymétrie et maillage du modèle hydrodynamique

L'emprise du modèle hydrodynamique s'étend de Cap Leucate à Narbonne-Plage, soit sur près de 35 km de linéaire côtier. Elle inclut l'étang de Bages-Sigean et s'étend en mer sur une bande parallèle au trait de côte d'une dizaine de kilomètres de large. La Figure 1 a) ci-dessous présente l'emprise du modèle. Le modèle est construit à partir de données bathymétriques de diverses provenances, intégrant un LIDAR datant de 2011 sur la frange côtière extérieure au port, ainsi qu'un levé bathymétrique de l'intérieur du port, datant de décembre 2012. La Figure 1 b) présente la bathymétrie finale du modèle en configuration actuelle. Le maillage décrit particulièrement finement les zones cruciales du grau et du port, de la géométrie desquelles dépendent les échanges mer – étang, ainsi que la zone de la frange côtière. Au final, le modèle est doté de 6 plans sur la verticale, chacun comportant 54 000 nœuds de calcul. La Figure 1 c) présente le maillage du modèle.

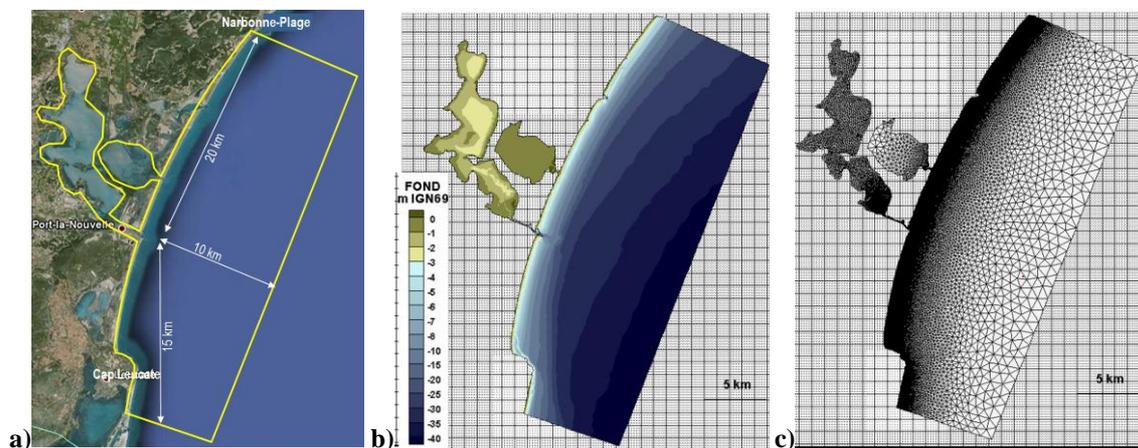


Figure 1. a) emprise, b) bathymétrie et c) maillage du modèle hydrodynamique.

3.2. Campagne de mesures pour le calage du modèle

Les objectifs de la campagne de mesures hydrodynamiques sont d'enregistrer, comprendre et permettre la juste reproduction par le modèle numérique des échanges mer/étang, de la dynamique littorale, de la dynamique par des fonds de 15 mètres (avancée des futures digues) et des courants généraux au large.

Pour cela, une campagne de mesures d'envergure a été réalisée par CREOCEAN [CRE 14]: pendant 6 mois en continu (de fin février à début septembre 2013), 6 ADCP (dont 5 en mer et 1 dans le grau), 3 capteurs de pression et 2 turbidimètres sont déployés sur l'ensemble de l'emprise du modèle numérique pour l'hydrodynamique. La Figure 2 localise les appareils de mesure déployés sur le domaine d'étude.

Ces 6 mois de mesures ont permis d'enregistrer une très grande variété de conditions océano-météorologiques (dont une tempête décennale) et la grande qualité des mesures, y compris pendant la tempête dans la zone de déferlement, a offert un jeu de données exceptionnel pour la compréhension des processus hydrodynamiques et le calage et la validation du modèle hydrodynamique, tant dans le domaine maritime que concernant le système grau-étang de Bages-Sigean.

3.3. Forçages du modèle hydrodynamique

L'analyse des 6 mois de mesure renseigne sur les dynamiques qui se développent simultanément au sein du domaine d'étude, variables selon les zones identifiées et régies par des moteurs bien distincts :

- Au niveau du grau, s'établissent les échanges entre mer et étang dus aux variations de niveau de surface libre dans l'étang et dans l'avant-port,
- Indépendamment, dans la frange littorale, siège un courant littoral dû aux houles déferlantes et orienté alternativement d'est vers l'ouest ou d'ouest vers l'est selon l'incidence de celles-ci.
- Enfin, indépendamment toujours, les fonds marins intermédiaires (-15m IGN 69), sont influencés par le courant général développé au large et tutoyant parfois de telles profondeurs.

Afin de reproduire simultanément la dynamique maritime, par des fonds de -15m comme à la côte, et la dynamique du grau, de multiples forçages hydrodynamiques sont implémentés :

- au large du domaine, les chroniques de 6 mois de courant général et niveaux mesurés au Point L (cf. Figure 2) ;
- en chaque nœud du maillage, les forces motrices de la houle issues d'une bibliothèque de houle à 4 dimensions (H_s , T_p , Direction et niveau d'eau) ayant nécessité au préalable 3159 calculs de propagation de houle au moyen du logiciel TOMAWAC (chaîne de calcul TELEMAC) sur le même domaine ; les contraintes de radiation appliquées à chaque itération sont synchronisées à la lecture de houle mesurée au large à cette itération ;
- en surface du domaine, le frottement de surface dû au vent, calculé à partir de la chronique de vent correspondant aux 6 mois de mesures, issue du modèle AROME haute-résolution de Météo France ;
- en chaque nœud de calcul, la chronique d'apport d'eau (en m) dû à la pluie correspondant à la campagne de mesures ;

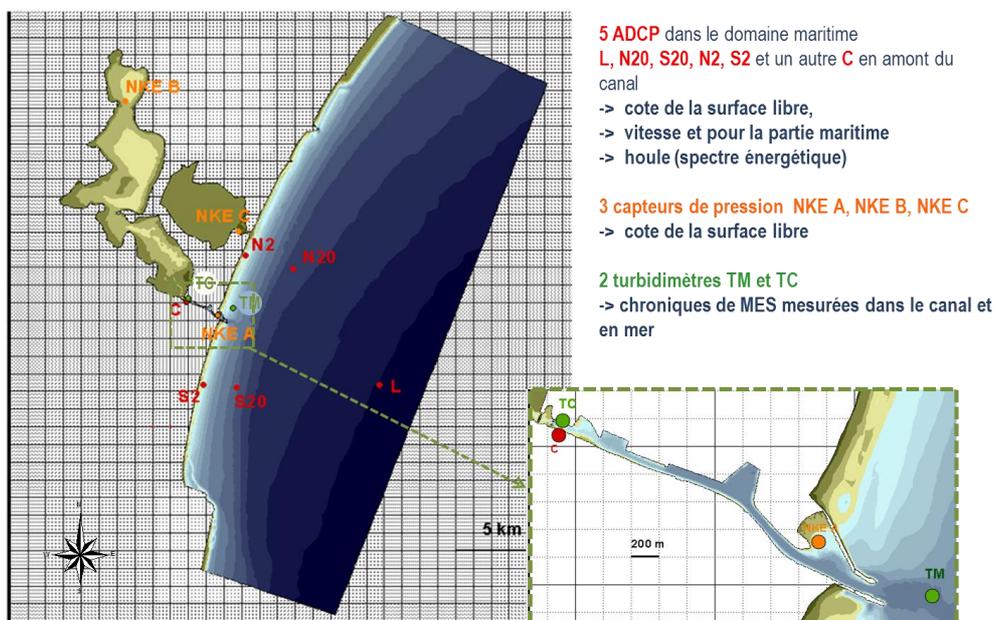


Figure 2. Déploiement des appareils de mesure sur le domaine d'étude.

- en chaque nœud de calcul, la chronique de soustraction d'eau (en m) due à l'évaporation correspondant à la campagne de mesures, et fonction des chroniques de température, humidité, intensité du vent disponibles pour la période des mesures ;
- aux exutoires des bassins versants se jetant dans l'étang de Bages-Sigean, la chronique des débits correspondants à la campagne de mesures.

Ces multiples forçages, marée, courants généraux, vent, apports pluviométriques, évaporation, apports des bassins versants, garantissent la juste prise en compte d'autant de phénomènes dont la contribution à la dynamique du site peut, selon l'évènement hydro-météorologique considéré, se révéler prédominante.

3.4. Calage du modèle

Pour valider la juste représentation des échanges étang-mer, les niveaux de surface libre calculés dans l'avant-port et l'étang, aux points NKE B et NKE A (cf. Figure 2) sont comparés aux niveaux de surface libre mesurés aux mêmes points pendant la campagne de mesures, et les vitesses (intensité et direction) calculées en amont du grau au point C sont comparées aux vitesses (intensité et direction) mesurées au même point, cela en continu sur les mois de mars et avril - période pour laquelle une grande variété d'évènements hydro-météorologiques a été enregistrée, dont la forte tempête du 6 au 9 mars 2013. Sur ces deux mois fortement dynamiques, l'écart moyen calculé entre modèle et mesures est de 5cm en NKE A et 8cm en NKE B situé nord de la lagune de Bages-Sigean.

Pour valider la juste représentation de l'hydrodynamique dans le domaine maritime, les résultats du modèle de propagation de la houle (hauteur significative (Hs) et direction (Dir)) aux points S20, N20, S2, N2 (cf. Figure 2), sont comparés aux Hs et Dir mesurées aux mêmes points, en continu sur les mois de mars et avril. De plus les vitesses (intensité et direction) calculées par le modèle hydrodynamique 3D aux points S20, N20, S2, N2 sont comparées aux vitesses (intensité et direction) mesurées en ces mêmes points, en continu sur les mois de mars et avril. La figure 3 récapitule les comparaisons modèle-mesures menées lors du calage. L'écart moyen calculé entre modèle et mesures est inférieur à 5cm/s pour les points S20 et N20 et inférieur à 7cm/s pour les points S2 et N2 situés dans la zone de déferlement : notons que ces écarts sont particulièrement faibles compte tenu du fait que le calage hydrodynamique se fait sur fond fixe. Ces comparaisons permettent de conclure que le modèle hydrodynamique 3D reproduit de façon très satisfaisante les variations de niveau et les bascules de direction des échanges étang-mer, tant en période de tempête (même sens des échanges pendant plusieurs marées) qu'en période de temps calme (alternance du sens des échanges à chaque marée). Ces comparaisons valident également une bonne reproduction des caractéristiques (Hs et Dir) de la houle par TOMAWAC pour des houles de Hs > à 0,25 m, usuelles comme exceptionnelles. Enfin les comparaisons modèle-nature garantissent la très bonne représentation en intensité et direction des courants dans le domaine maritime par des fonds de -15 m, par temps calme comme par tempête, ainsi que la bonne tendance hydrodynamique dans la frange littorale peu profonde. Le

modèle reproduit notamment très précisément l'alternance des directions du courant, à 15 m de fond comme à la côte.

3.5. Exploitation du modèle hydrodynamique

Ainsi le bon niveau de validation du modèle pour une grande diversité des forçages garantit une qualité exceptionnelle de l'outil à reproduire les processus du site d'étude concernant aussi bien les flux transitant dans le grau que les courants générés dans le domaine maritime, au large comme dans la frange littorale. Le modèle ainsi validé participe, par l'exploitation des champs de vitesse calculés sur le domaine de calcul tout entier, à une visualisation didactique et une meilleure compréhension des phénomènes physiques dont le port est le siège. Il est notamment remarquable que le modèle puisse reproduire la bascule de direction de courant entre le large et la côte lorsque cette situation se produit (cf. Figure 4).

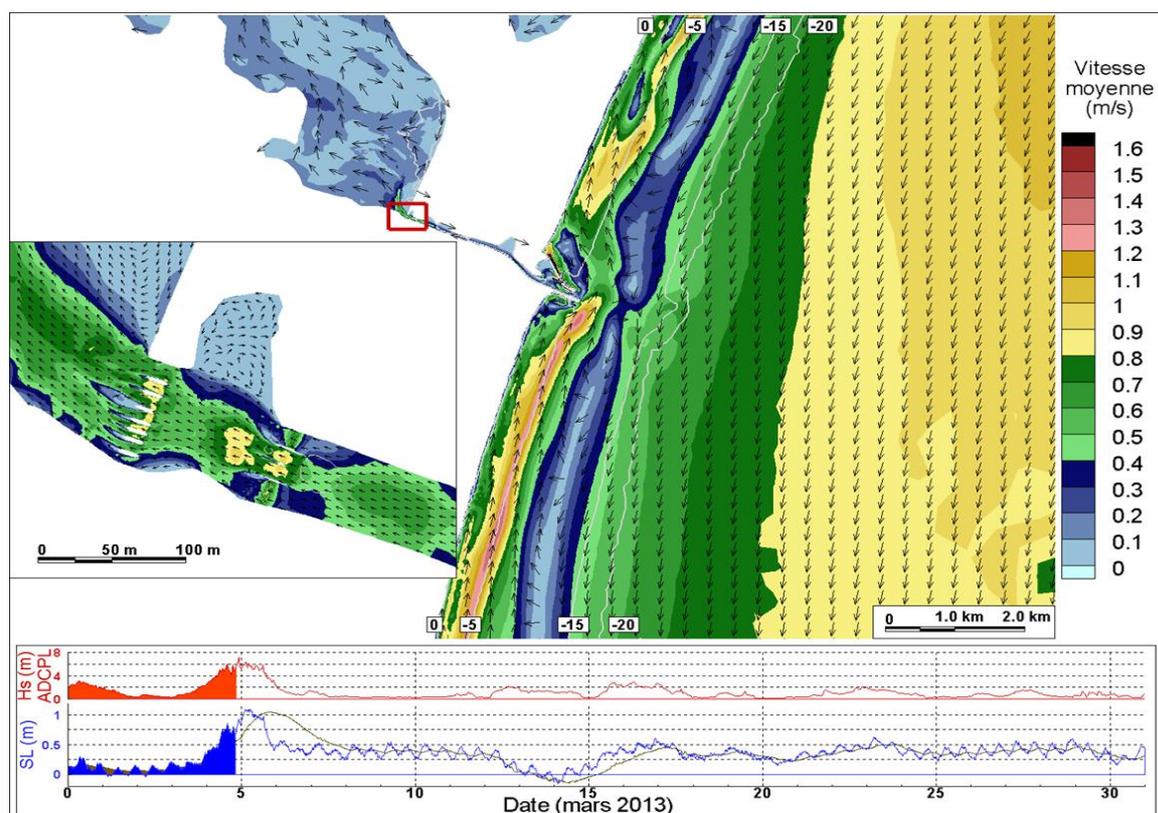


Figure 4. Champs de courant moyen instantané calculé durant la tempête décennale.

4. Modèle de dépôt de sédiments fins (vaseux) dans le grau à court terme (1 an)

Le modèle hydrodynamique 3D ainsi calé reproduit de façon très satisfaisante les échanges hydrauliques mer-étang, de sorte que la modélisation hydro-sédimentaire des fines dans le grau peut ensuite être entreprise. Il s'agit, pour ce modèle de dépôt de sédiments fins au sein du port actuel, de calculer des volumes de vase pure déposés équivalents aux volumes moyens annuels de vase pure dragués, cela au niveau de sept zones distinctes du grau présentées Figure 5(a). Le modèle de dépôt de vase dans le grau résout le transport en suspension d'une classe de sédiment cohésif directement dans TELEMAC 3D afin de représenter la stratification de la concentration du sédiment dans la colonne d'eau [PAR 85]. Epaisseur de dépôt, érosion et évolution du lit sont calculées en tout point du grau.

4.1. Forçages du modèle de dépôt de sédiments fins

Les 6 mois de forçages hydrodynamiques présentés précédemment sont appliqués, complétés par la chronique de turbidité correspondante, mesurée en amont du grau (point TC Figure 2), qui introduit les apports réels de sédiments fins de l'étang vers le grau et qui permet de s'affranchir d'une modélisation hydro-sédimentaire de l'étang [CAT 82]. Une turbidité constante moyenne issue de l'analyse des 6 mois de mesures de turbidité au point TM (cf. Figure 2) est appliquée dans le domaine maritime. Ces 6 mois de forçages associés aux paramètres

sédimentologiques calés constitueront le cycle schématique représentatif d'une année morphodynamique dans le port.

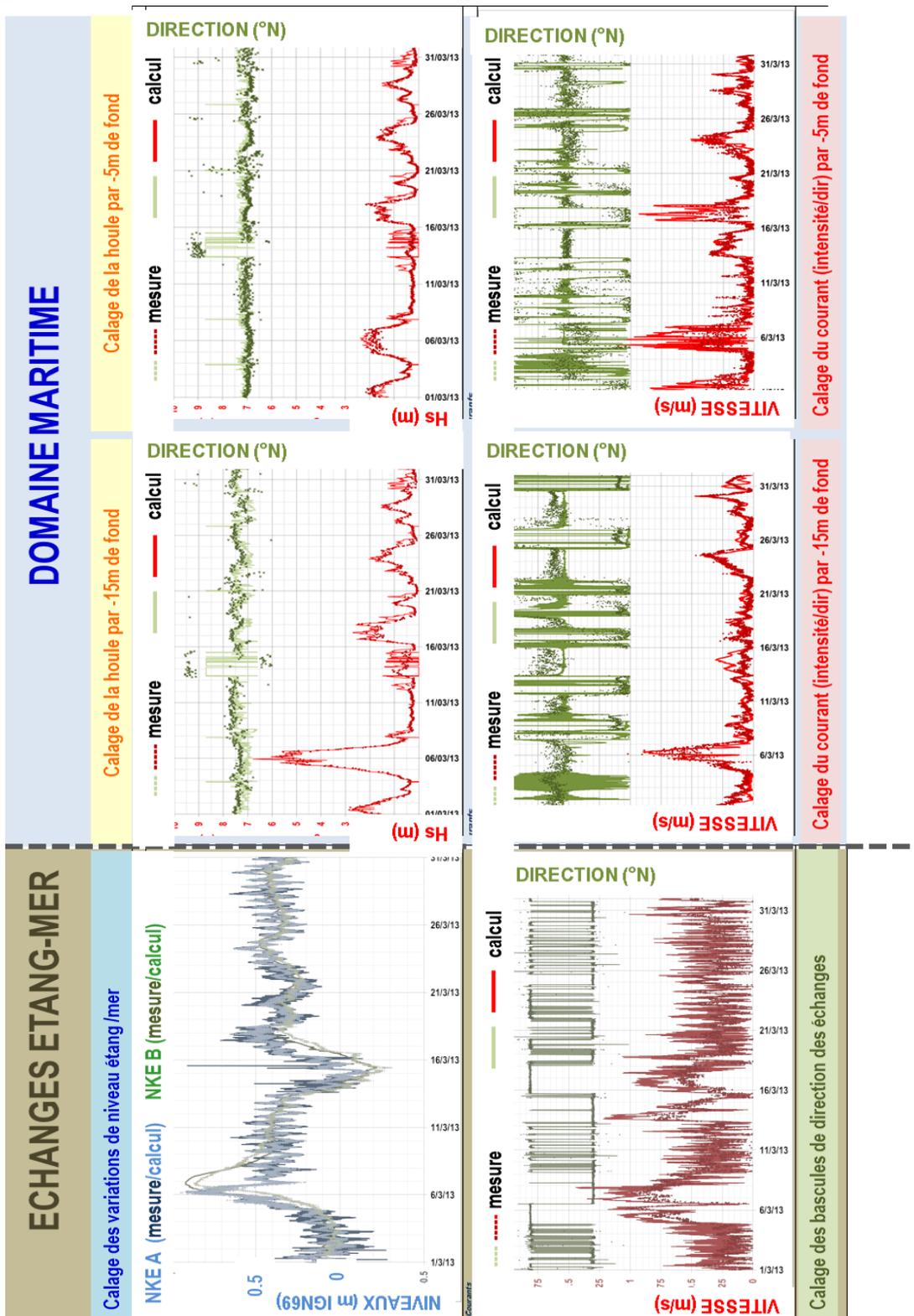


Figure 3. Illustration de l'adéquation du modèle hydrodynamique avec les mesures de niveaux de surface libre, vitesses dans le grau, caractéristiques de la houle par des fonds de -15m et -5m et courant généré par fonds de -15m et -5m.

4.2. Calage du modèle de dépôt de sédiments fins

Le calage des paramètres sédimentologiques de calcul tels que la concentration moyenne du lit de vase consolidé, la contrainte critique d'érosion, la vitesse de chute, la concentration de MES moyenne aval (en mer), est réalisé sur la base des volumes moyens annuels dragués au sein des différentes zones du port actuel (volumes fournis par le pôle dragage du service des opérations portuaires de la Région à Sète). A l'issue du calage, une très bonne adéquation est obtenue entre volumes dragués et dépôts calculés, comme en atteste la Figure 5(b), cela pour chaque zone du port actuel, en calant uniquement les paramètres physiques du sédiment sans avoir à revoir les forçages hydrodynamiques des 6 mois de chroniques mesurées. Cela vient valider tout à fait la représentativité de la période de 6 mois de mesure et son adéquation avec les objectifs.

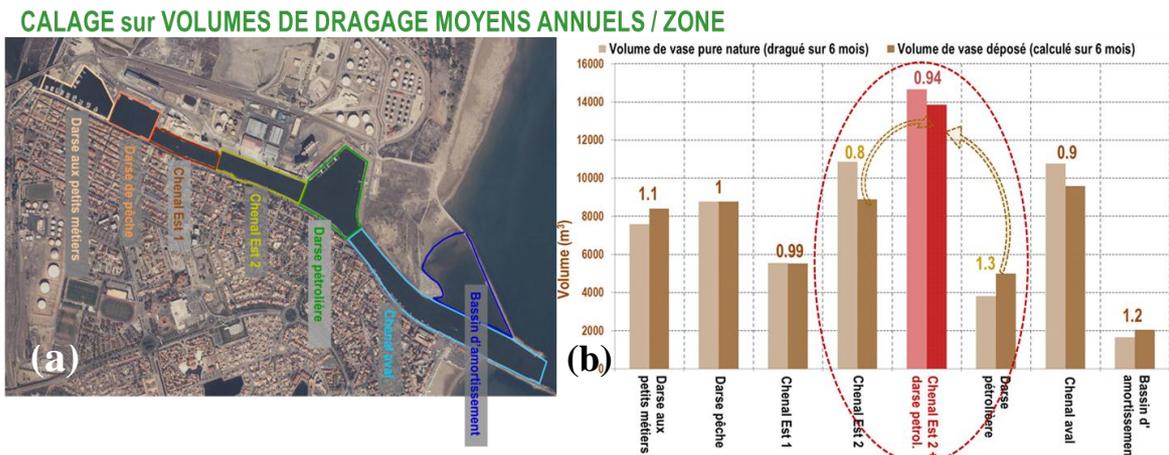


Figure 5. (a) identification des différentes zones de dragage du port actuel ; (b) comparaison des volumes de vase pure moyens annuels dragués par zone avec les volumes de vase pure déposés par zone par le modèle.

5. Modèle d'évolution des fonds marins (sableux) à court terme (1 an) et moyen terme (10 ans)

Le modèle d'évolution des fonds marins vise à reproduire la morphodynamique des fonds sableux situés au large de la zone de déferlement (bathymétries < -5m IGN69) sur la durée d'un an (court terme), puis 10 ans (moyen terme) afin de dégager une tendance sur une période significative. Il couple le modèle hydrodynamique 3D au module sédimentaire SISYPHE qui résout le transport pour une granulométrie étendue, c'est-à-dire pour plusieurs classes de sédiment sableux. La formule de transport choisie pour la modélisation de l'évolution des fonds marins est la formule de Soulsby - Van Rijn [SOU 97].

5.1. Forçages du modèle d'évolution des fonds sableux

Les 6 mois de forçages hydrodynamiques présentés précédemment sont appliqués, complétés par un facteur morphodynamique (pour les évolutions à 1 an et 10 ans) pondéré par la fréquence d'apparition de la houle pour la période considérée. 4 classes de sédiment sableux ont été prises en compte et le mélange spatial initial de ces 4 sédiments s'est effectué en respectant la granulométrie mesurée lors de la vaste campagne de prélèvements granulométriques réalisée par CREOCEAN début 2013.

5.2. Calage du modèle d'évolution des fonds sableux

Le calage à 1 an est réalisé sur la base du volume moyen annuel dragué dans la zone du chenal d'accès à l'actuel port (volume fourni par le pôle dragage du port de Sète). La très bonne adéquation entre volumes dragués et dépôts calculés en cette zone assure le calage du transport annuel.

Pour le calcul à 10 ans, les dragages du chenal d'accès sont pris en compte. Le calage à 10 ans consiste à reproduire les tendances morphodynamiques moyennes en nature observées sur 10 ans, déduites du différentiel bathymétrique 1979-2009 (hors zone de forte érosion au-devant de l'actuel port dont les origines sont probablement dues aux modifications du port survenues entre 1979 et 2009) : le modèle à 10 ans reproduit la tendance représentative d'accrétion par des fonds de -15 m et, en accentué, la tendance représentative de faible accrétion entre -5 à -10 m observable sur le différentiel 2009 – 2012.

6. Conclusion et perspectives

Après une phase de calage qui a requis près d'un an de travail, les trois modèles calculant l'hydrodynamique seule, le dépôt de particules fines dans le grau et l'évolution des fonds marins en configuration portuaire actuelle montrent une remarquable capacité à reproduire la dynamique hydro-sédimentaire complexe de Port-La Nouvelle, tant dans le domaine maritime, que dans le grau, siège d'échanges entre mer et étang. Leurs résultats permettent de plus une amélioration de la compréhension des caractéristiques et processus hydrodynamiques et hydro-sédimentaires du site.

Par la suite, ces trois modèles vont calculer, sous les mêmes hypothèses qu'en configuration actuelle, l'hydrodynamique, les dépôts de sédiments fins et les évolutions des fonds marins à 1 et 10 ans en considérant la future configuration portuaire. De la comparaison des résultats obtenus en configuration future et en configuration actuelle seront évalués les impacts hydro-sédimentaires potentiels de l'extension portuaire envisagée par la Région Languedoc Roussillon.

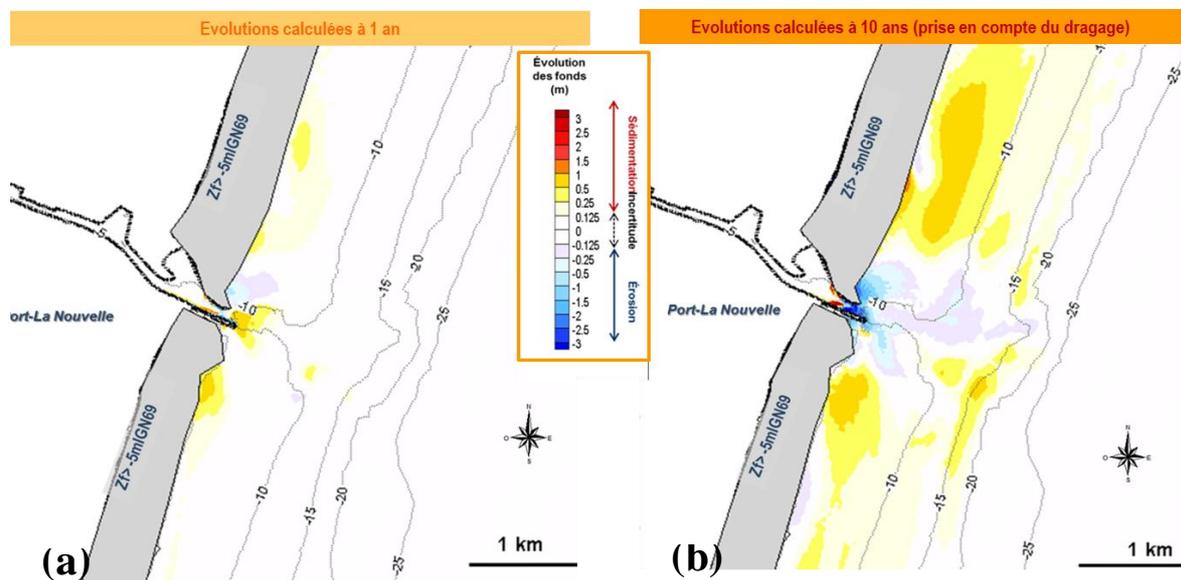


Figure 5. Evolutions des fonds marins calculées à 1an (a) et 10 ans (b) en configuration portuaire actuelle.

7. Remerciements

Nous remercions la Région Languedoc Roussillon, maître d'ouvrage du projet d'extension de l'infrastructure portuaire de Port-La Nouvelle pour les appuis et conseils prodigués tout au long de l'étude ainsi que pour les nombreuses données fournies. Merci tout particulièrement à MM A. Brasseur et S. Canal, attachés à la sous-direction des Ports.

8. Bibliographie

[IFR 12] IFREMER. Développement d'une méthode d'estimation des débits dans les graus de lagunes, février 2012, 35p..

[CRE 14] CREOCEAN. Port-La Nouvelle – Mission de Maitrise d'œuvre pour l'agrandissement du port - Campagne de mesures hydrodynamiques, février 2014.

[CAT 82] CATALIOTTI D and ALDINA V. « Evolution de la turbidité des eaux du complexe lagunaire de Bages-Sigean-Port-La-Nouvelle (Aude, France) », *Océanologica Acta*, Vol. 5 N°4, 1982,-

[PAR 65] PARTHENIADES, E. « Erosion and Deposition of Cohesive Soils ». *J Hydraulics Division* , Vol 91, 1965, p.105-139.

[SOU 97] SOULSBY R, *Dynamics of marine sands*, Editions. HR Wallingford, 1997