



Modélisation hydrodynamique de l'évolution morphodynamique dans la rade de Cherbourg

Morgane MIGNOT^{1,2,3}, Emmanuel POIZOT^{1,2}, Sylvain GUILLOU¹,
Pascal BAILLY DU BOIS^{1,2}, Yann MÉAR^{1,2}, Lionel TENAILLEAU³,
Patrick MARY³

1. Université de Caen Normandie, LUSAC (EA 4253), Site universitaire, 60 rue Max-Pol Fouchet, CS 20082, 50130 Cherbourg-Octeville, France.
morgane.mignot@unicaen.fr ; sylvain.guillou@unicaen.fr
2. CNAM, LUSAC-INTECHMER (EPN 8), Boulevard de Collignon, Tourlaville, 50110 Cherbourg-en-Cotentin, France.
*emmanuel.poizot@lecnam.net ; pascal.baillydubois@lecnam.net ;
yann.mear@lecnam.net*
3. Marine Nationale, EAMEA, Base navale, Boulevard de la Bretonnière, 50115 Cherbourg-en-Cotentin, France.
lionel.tenailleau@intradef.gouv.fr ; patrick1.mary@intradef.gouv.fr

Résumé :

La rade de Cherbourg est la deuxième plus grande rade artificielle au monde et a connu un aménagement majeur de mars 2015 à juillet 2016 avec des modifications importantes de ses contours et de la morphologie de ses fonds à la suite de dragages. Ce travail présente une mise à jour des connaissances hydrodynamiques sur cette zone ainsi que des évolutions associées à ces aménagements. Pour ce faire, l'hydrodynamique calculée par le modèle numérique tridimensionnel CROCO (Coastal and Regional Ocean Community model) a été validée par des mesures de courantologies acquises dans la rade de Cherbourg. Ce modèle est la base d'un modèle hydro-sédimentaire fondé sur le couplage avec le module sédimentaire MUSTANG (MUd and Sand TrAnsport modelliNG) afin d'étudier le transport des radionucléides.

Mots-clés :

Modèle hydrodynamique, Evolution morphodynamique, Rade de Cherbourg.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

1. Introduction

Les côtes sont des lieux de population dense où se réalisent un grand nombre d'activités anthropiques différentes pour lesquelles des aménagements particuliers sont réalisés. Dans le cas des rades artificielles, les modifications apportées par l'homme sur l'espace naturel sont importantes. En particulier, la rade de Cherbourg est la rade artificielle la plus grande d'Europe et la deuxième mondiale. Aux activités initiales militaires et portuaires sont venues s'ajouter des activités commerciales avec des aménagements spécifiques accompagnés de modifications sensibles des formes initiales de la rade (BAUX *et al.*, 2017 ; BAUX *et al.*, 2019, GREGOIRE *et al.*, 2019 ; ANDRES *et al.*, 2020 ; BOUCHET *et al.*, 2020 ; DAUVIN *et al.*, 2020 ; MÉAR *et al.*, 2020). Dans le cadre du développement des activités industrielles en relation avec les Energies Marines Renouvelables (EMR), un nouveau terre-plein portuaire a été construit dans la Grande Rade de Cherbourg, entre mars 2015 et juillet 2016. Le matériel qui a servi à la construction de ce nouveau terre-plein a été extrait sur place, par dragage dans la Grande Rade de Cherbourg. A cette occasion, à la fois le trait de côte et la morphologie des fonds ont subi des modifications importantes. Il est proposé dans le présent travail de mettre en évidence l'impact de ces aménagements sur l'hydrodynamique de la rade de Cherbourg. Ces modifications sont importantes pour certaines activités, notamment pour la ferme d'élevage de saumon présente en rade de Cherbourg, la seule du littoral français exploitée en eau de mer ouverte (POIZOT *et al.*, 2021).

Pour mettre en évidence les changements de comportements de la masse d'eau au sein de la rade de Cherbourg, nous avons mis en place deux configurations de modélisation hydrodynamique de la rade de Cherbourg : l'une basée sur les morphologies de la rade avant travaux et l'autre sur celles après travaux. Le code de calcul CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model) est utilisé pour la première fois dans la rade de Cherbourg. Avec des mesures de courantologie réalisées avant les travaux et, dans le cadre du présent travail, après travaux, nous faisons la démonstration de la validité de ce modèle.

2. Zone d'étude

Localisée en Manche (voir figure 1), la rade de Cherbourg a connu de nombreux changements stratégiques qui se sont succédés pour aboutir aux contours actuels. Elle compte trois passes (voir figure 1) : la passe de l'Ouest d'une largeur de 1100 m, la passe de l'Est d'une largeur de 700 m et la plus petite de 78 m de large, la passe de Collignon (ou passe de Cabart-Danneville).

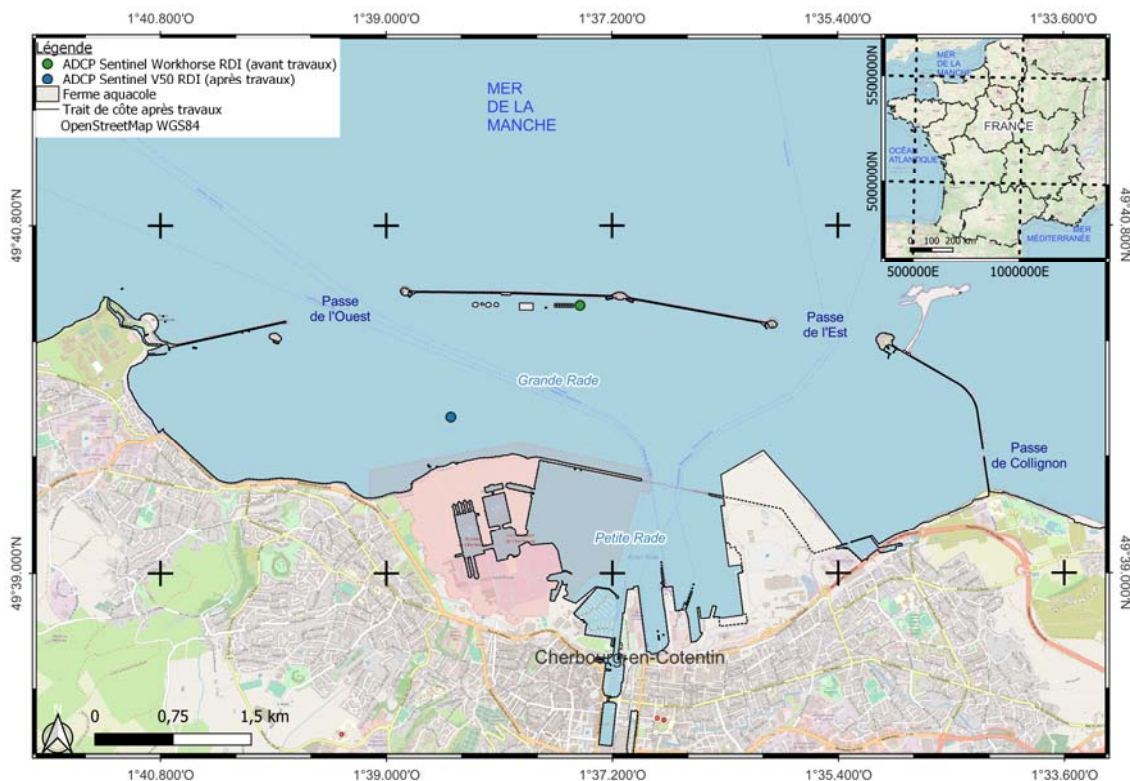


Figure 1. Géographie de la rade de Cherbourg-en-Cotentin avec les emplacements de l'ADCP Sentinel Workhorse RDI (49.671588, -1.622231) et de l'ADCP Sentinel V50 RDI (49.663454, -1.641440) respectivement déployés avant et après travaux.

La rade de Cherbourg possède une superficie d'environ 1500 ha et une profondeur moyenne de 13 m pouvant atteindre par endroit un maximum de 21 m (GREGOIRE *et al.*, 2019 ; MÉAR *et al.*, 2020). De mars 2015 à juillet 2016, la rade de Cherbourg a connu des travaux de dragage visant à réaménager son accès pour faciliter le passage de bateaux ayant jusqu'à 12 m de tirant d'eau. Dans la même période, un nouveau terre-plein portuaire d'une superficie de 39 ha a été construit pour accueillir de nouvelles activités industrielles portant sur les EMR (voir figure 1). Cette rade est placée dans un régime de marée macrotidale avec un marnage compris entre 5 m et 6 m. Malgré la présence des digues protectrices, les courants à l'intérieur de la rade peuvent atteindre 1 m/s. Le courant de flot, plus puissant, est orienté ouest-est tandis que le courant de jusant est orienté est-ouest.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

3. Matériel et méthode

3.1 Mesures ADCP

3.1.1 *Avant travaux*

En plus des activités industrielles, la rade de Cherbourg abrite une ferme aquacole dont la production est très sensible à la qualité environnementale. Elle fait l'objet de suivis réguliers de différentes natures (chimie, biologie, mouvement particulière et courant). Dans ce cadre, des mesures de courant ont été réalisées via la pose d'un courantomètre de type ADCP Sentinel Workhorse RDI (voir figure 1) du 4 avril 2015 au 9 avril 2015, à l'est des cages à poissons. L'appareil a été configuré pour enregistrer une valeur moyenne des vitesses et directions des courants toutes les 5 minutes, sur la hauteur totale d'eau découpée en 13 cellules de 1 mètre de hauteur chacune, soit une hauteur de mesure maximale de 13 mètres.

3.1.2 *Après travaux*

Un ADCP Sentinel V50 RDI a été posé sur le fond de la rade de Cherbourg (voir figure 1) du 16 décembre 2021 au 21 janvier 2022. Cet instrument composé de cinq transducteurs piézoélectriques, a simultanément enregistré la hauteur d'eau ainsi que les directions et les vitesses des courants. La configuration de l'ADCP Sentinel V50 RDI a permis de diviser la colonne d'eau en 39 cellules d'une hauteur de 0,5 m soit une hauteur totale de 20 m au-dessus de la structure ADCP.

L'extraction ainsi que le post-traitement des données mesurées par l'ADCP ont été exploitées avec le logiciel ©Velocity RDI complétés par des scripts Python. L'analyse des données a permis de repérer les cycles de vive-eau et de morte-eau aux dates les plus pertinentes à interpréter selon la concordance avec les conditions initiales de marée imposées au modèle. Ainsi, les mesures *in-situ* du 18 décembre 2021 au 27 décembre 2021 ont été extraites sous forme de données moyennées sur la colonne d'eau toutes les 10 minutes, pas de temps représentatif du temps durant lequel les courants mesurés peuvent être considérés comme stationnaires.

3.2 Modélisation numérique

Les simulations hydrodynamiques sont réalisées avec le modèle CROCO (<https://www.croco-ocean.org/>). Il s'agit d'une plateforme de modélisation de l'océan régional et côtier utilisant des approches multi-échelles réalistes. Ce modèle fonctionne en différences finies avec un pas constant en longitude et en latitude fixé dans notre cas, sur la base d'un maillage de résolution horizontale à 100 m. CROCO a récemment été couplé avec le module de transport sédimentaire MUSTANG (Mud and Sand Transport modelliNG), initialement développé sous MARS (Model for Application at Regional Scales). MUSTANG permet de représenter le transport de sédiments cohésifs

et non-cohésifs. La modélisation de sédiments non-cohésifs est particulièrement adaptée aux sédiments de la Manche où ils représentent plus de 80% de la couverture sédimentaire. Il est également possible de représenter le devenir des particules fines au sein de matrices grossières en prenant en compte les processus de masquage/exposition dans un modèle multiclasse et multicouche. Si elles ne représentent que quelques pourcents du stock sédimentaire, la considération des particules fines est particulièrement importante. Leur grande surface spécifique leur donne une grande capacité d'adsorption des métaux en solution, en particulier de certains radionucléides d'origine industrielle (^{60}Co , ^{106}Ru , Pu, Am). De premiers travaux encourageants ont été réalisés avec le couplage MARS/MUSTANG par C. Olivier (RIVIER *et al.*, 2017). Bien que cette première application reposait sur l'application simple d'un coefficient de transfert entre les radionucléides en solution et les particules en suspension, le modèle de transport sédimentaire a pu reproduire les principales zones de dépôt à l'échelle annuelle dans le Golfe Normand-Breton.

Les simulations ont concerné les deux périodes de pose des mesures ADCP : avant les travaux d'aménagement du 4 avril 2015 au 9 avril 2015 et après les travaux d'aménagement du 18 décembre 2021 au 27 décembre 2021. Les deux configurations utilisent des bathymétries (BAILLY DU BOIS, 2011) initialement au format MARS et converties au format CROCO. Elles sont soumises au forçage de la marée (atlas de marée PREVIMER avec 16 harmoniques). La colonne d'eau est divisée en 20 couches (en coordonnées sigma) avec un raffinement proche du fond. La durée d'un pas de temps du modèle (Δt) est de 3,5 s, après 48 h de *spin-up*, les vitesses sont moyennées sur la verticale toutes les 5 minutes pour les simulations avant travaux d'aménagement tandis qu'elles le sont toutes les 10 minutes pour les simulations après travaux d'aménagement. Ces configurations sont choisies afin de concorder avec les données ADCP respectives de chaque période de mesure.

4. Résultats

4.1 Avant travaux

L'obtention de mesures *in-situ* issues de l'ADCP Workhorse RDI posé avant les travaux d'aménagement de la rade de Cherbourg du 4 avril 2015 au 9 avril 2015 a permis une comparaison avec les simulations. D'une part, les cycles de Pleine Mer (PM) et Basse Mer sont temporellement respectés (voir figure 2). Les allures et amplitudes des hauteurs d'eau issues des simulations sont en accords avec celles des données *in-situ*.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

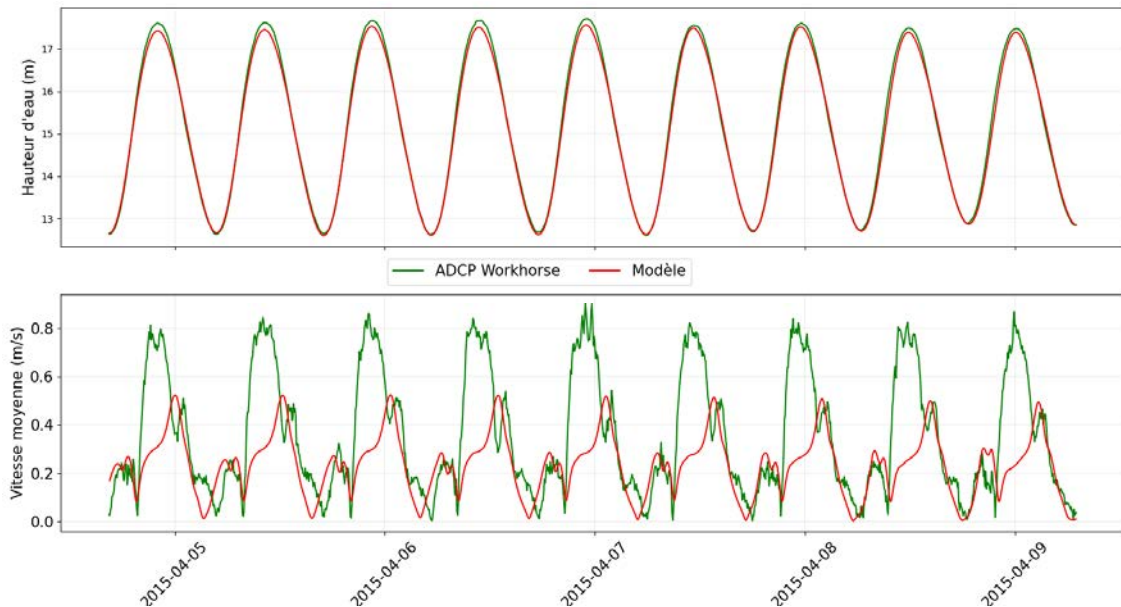


Figure 2. Comparaison entre les mesures ADCP Workhorse RDI (vert) et les simulations (rouge) du 04/04/2015 au 09/04/2015.

D'autre part, les allures générales des vitesses moyennes issues du modèle retransmettent celles des données *in-situ*. Cependant, il existe un léger déphasage entre les mesures *in-situ* et le modèle au niveau des minimas de vitesses. Le modèle sous-estime les maxima de vitesses en période de marée haute. Les mesures ADCP sont acquises à l'est de la ferme aquacole, dans l'axe est-ouest des structures de production. La présence de la ferme n'est pas prise en compte dans le modèle CROCO. La présence des cages à poissons provoque un effet de sillage qui diminue la vitesse ainsi qu'un effet de blocage qui provoque une accélération des courants autour de la ferme, en particulier au nord de la ferme entre les cages et la digue centrale. Les oscillations haute fréquence, présentes sur les données ADCP pour les vitesses de courants maximales (période de flot), ne sont pas correctement retransmises par le modèle. Plusieurs facteurs peuvent être la cause de ces différences, tous en relation avec la résolution horizontale du modèle :

- La bathymétrie du modèle ne reflète pas fidèlement la bathymétrie réelle sur le lieu de mesure ADCP et ne prend pas en compte l'influence des cages à poissons. Ce point proche des digues et des enrochements qui les protègent doit être sous l'influence, dans le modèle, de frottements trop importants ;
- Les variations à haute fréquence visibles sur les mesures ADCP sont vraisemblablement de dimension inférieure à celle de la maille du modèle et ne peuvent pas être simulées.

4.2 Après travaux

Tout comme pour les hauteurs d'eau obtenues avant travaux, les hauteurs d'eau simulées après travaux concordent avec les mesures effectuées (voir figure 3) grâce à l'ADCP Sentinel V50 RDI posé dans la rade de Cherbourg du 18 décembre 2021 au 27 décembre 2021.

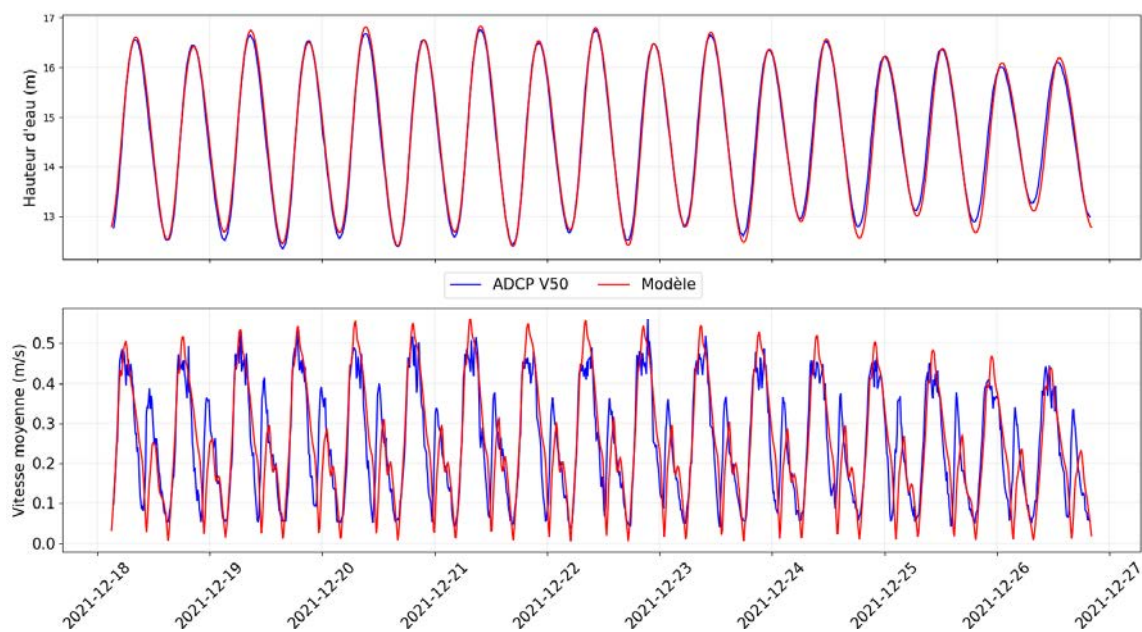


Figure 3. Comparaison entre les mesures ADCP Sentinel V50 RDI (bleu) et les simulations (rouge) du 18/12/2021 au 27/12/2021.

Contrairement aux simulations effectuées dans la configuration avant travaux, le point étudié se situe loin d'obstacles tels que les cages à poissons. Les vitesses moyennes après travaux sont bien représentatives de la réalité en allure et en amplitude. Un déphasage pour les minimas d'intensité se perpétue entre les mesures *in-situ* et le modèle qui montre un léger retard. Cette désynchronisation temporelle peut s'expliquer par le fait que les digues de la rade ne sont pas scrupuleusement représentées dans leur morphologie au niveau du maillage du modèle (la taille de la maille du modèle est souvent supérieure à la largeur des digues). Ainsi, les frottements issus du modèle sont plus importants que dans la réalité provoquant une diminution des vitesses de propagation de l'onde de marée. La nécessité d'un affinement du maillage est également applicable à la mauvaise retransmission par le modèle, des oscillations haute fréquence, contenues dans les mesures *in-situ* et majoritairement observées à marée haute.

5. Discussion

Afin d'évaluer l'impact hydrodynamique des travaux d'aménagement qui ont eu lieu dans la rade de Cherbourg, nous avons comparé les champs de vitesses avant et après

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

travaux (voir figures 4 et 5) pour un coefficient de marée moyen (74 – PM aux dates du 9 avril 2015 à 12h35 avant travaux et du 20 décembre 2021 à 21h45 après travaux).

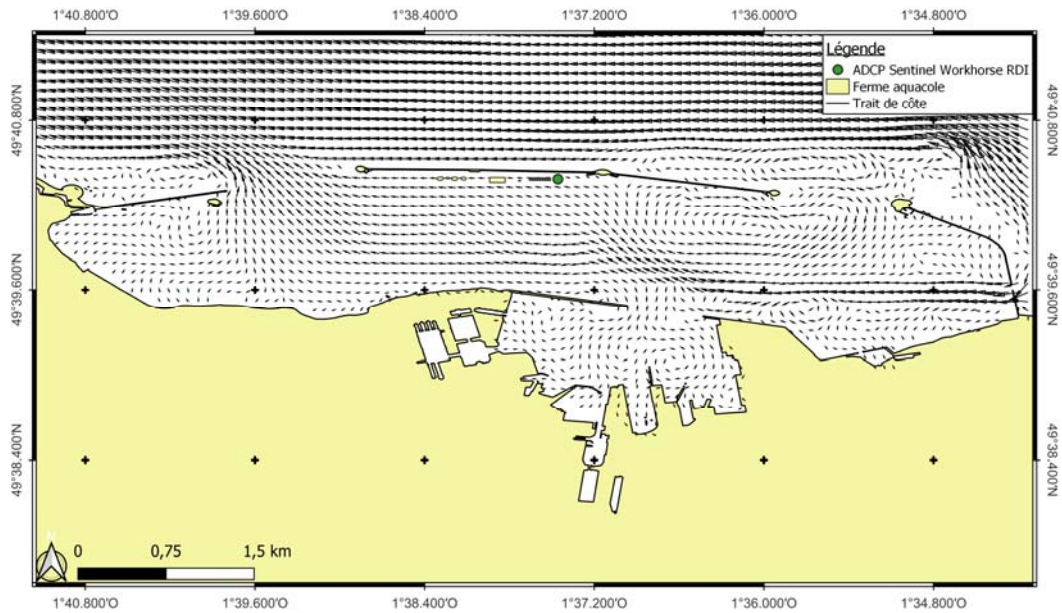


Figure 4. Carte des courants moyens (intensité et direction) avant les travaux d'aménagement en rade de Cherbourg le 09/04/2015 à 12h35 (coefficient de marée 74 – PM).

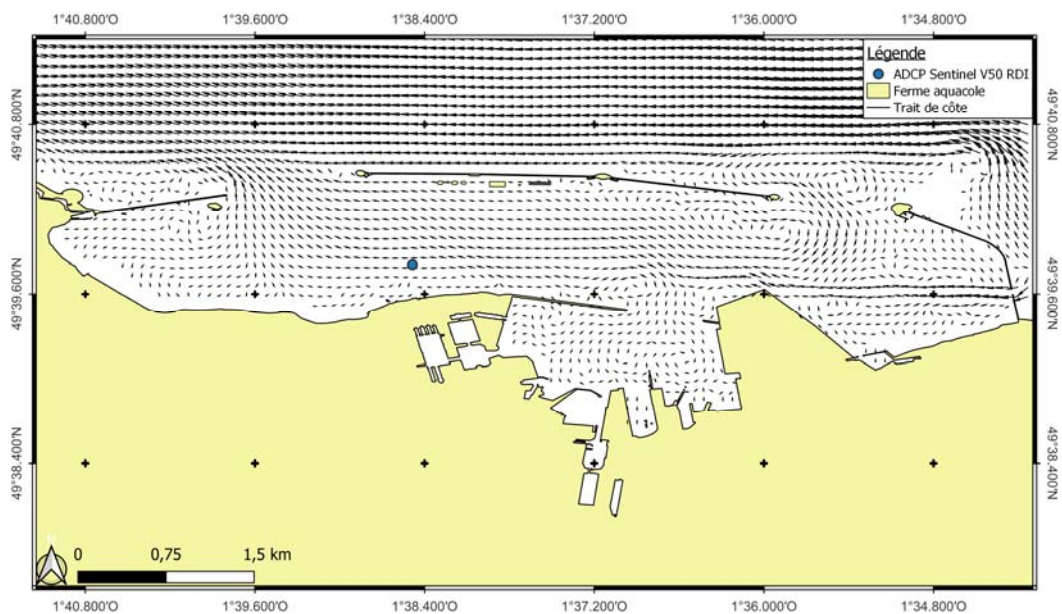


Figure 5. Carte des courants moyens (intensité et direction) après les travaux d'aménagement en rade de Cherbourg le 20/12/2021 à 21h45 (coefficient de marée 74 – PM).

La spatialisations des vitesses horizontales conserve sa tendance générale avant et après travaux accompagnées malgré tout, de deux modifications majeures. D'une part, dans la

configuration avant travaux, un gyre est présent à la place du futur terre-plein portuaire. Cette dynamique est désormais inexistante mais a été remplacée par une modification de la circulation au niveau de la sortie de la Petite Rade (voir figure 5). Les vitesses horizontales rencontrées dans cette zone sont orientées vers l'ouest moins brutalement qu'auparavant. Cette baisse d'intensité est accentuée par la présence du nouveau terre-plein qui représente un obstacle provoquant un ralentissement du flux entrant par la passe de Collignon (voir figure 5). D'autre part, dans la configuration après travaux, un gyre apparaît à la sortie de la Grande Rade au niveau de la passe de l'Est.

6. Conclusion

La comparaison des simulations avec des mesures *in-situ* a permis une validation du modèle hydrodynamique CROCO en rade de Cherbourg. Cette adéquation entre modèle et mesures *in-situ* est à nuancer dans la configuration avant travaux dans laquelle, le point de comparaison considéré est influencé par la présence des cages à poissons. Pour y remédier, la zone d'étude sera affinée par la mise en place d'un emboîtement permettant le passage d'une grille résolue à 100 m vers une résolution à 20 m pour toute la rade de Cherbourg. La comparaison des deux configurations avant et après travaux en rade de Cherbourg met en évidence les effets du changement du trait de côte ainsi que de la morphologie des fonds sur l'hydrodynamique locale. Ces différences significatives seront davantage explorées grâce à des comparaisons point à point avant et après travaux ainsi que par la réalisation de cartes de différences avant et après travaux.

Les travaux futurs porteront sur la mise en place d'un modèle hydro-sédimentaire par le couplage du modèle hydrodynamique CROCO au module sédimentaire MUSTANG. La mise en place d'un modèle hydro-sédimentaire permettra de mieux appréhender le devenir des particules sédimentaires au sein de la rade de Cherbourg et donc ceux des radionucléides qui peuvent être adsorbés sur des particules sédimentaires de tout type, en particulier les plus fines (RIVIER *et al.*, 2017).

7. Logiciels

Le logiciel ©Velocity RDI a été utilisé pour le post-traitement des données *in-situ* mesurées par l'ADCP Sentinel V50 RDI et le logiciel ©QGIS 3.20.3 (Odense) pour analyser l'évolution morphodynamique des fonds marins.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'équipe des Plongeurs de l'Environnement, du Génie et d'Actions Sous-marines (PEGASe) de la base navale de Cherbourg qui ont participé à la pose et à la relève de l'ADCP Sentinel V50 RDI en rade de Cherbourg. Nous remercions également Victoria Laurent qui lors de son stage a participé au post-traitement des mesures *in-situ* issues de l'ADCP Sentinel V50 RDI.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

8. Références bibliographiques

- ANDRES S., PEZY J.P., MARTINEZ M., BAUX N., BAFFREAU A., MÉAR Y., DAUVIN J.C. (2020). *Soft bottom macrobenthic communities in sandy enclaves from the North Cotentin Peninsula (central English Channel)*. Journal of Marine Biology and Oceanography, 9, 106-116, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.11.010>
- BAILLY DU BOIS P. (2011). *Automatic calculation of bathymetry for coastal hydrodynamic models*. Computers & Geosciences, 37, 1303-1310, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.11.018>
- BAUX N., PEZY J.P., BACHELET Q., BAFFREAU A., MÉAR Y., POIZOT E., GUYONNET B., DAUVIN J.C. (2017). *Soft bottom macrobenthic communities in a semi-enclosed Bay bordering the English Channel: the Rade de Cherbourg*. Regional Studies in Marine Science, 9, 106–116, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.11.010>
- BAUX N., MURAT A., FAIVRE Q., LESOURD S., POIZOT E., MÉAR Y., BRASSELET S., DAUVIN J.C. (2019). *Sediment dynamic equilibrium, a key for assessing a coastal anthropogenic disturbance using geochemical tracers: Application to the eastern part of the Bay of Seine*. Continental Shelf research, 175, 87-98, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.02.002>
- BOUCHET V., DELDICQ N., BAUX N., DAUVIN J.C., PEZY J.P., SEURONT L., MÉAR Y. (2020). *Benthic foraminifera to assess ecological quality statuses: the case of salmon fish farming*. Ecological indicators, 117, 106607, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106607>
- DAUVIN J.-C., PEZY J.P., BAFFREAU A., BACHELET Q., MÉAR Y., MURAT A., BAUX N., POIZOT E. (2020). *Effects of a salmon fish farm on benthic habitats in a high-energy hydrodynamic system: the case of the Rade de Cherbourg (English Channel)*. Aquaculture, 518, 734832, <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734832>
- GREGOIRE G., MÉAR Y., POIZOT E., MARION C., MURAT A., HEBERT B. (2019). *The morpho-sedimentology of an artificial roadstead (Cherbourg, France)*. Journal of Maps, 15(2), 677-685, <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1642247>
- MÉAR Y., POIZOT E., BAUX N. (2020). *Influence des travaux de construction du terre-plein EMR en rade de Cherbourg-en-Cotentin. Bathymétrie. Comparaison 2012 et 2018*. Rapport d'étude CNAM-INTECHMER, Tourlaville, Cherbourg-en-Cotentin.
- POIZOT E., MÉAR Y., GUILLOU S., BIBEAU E. (2021). *High resolution characteristics of turbulence tidal of a fish farm structure in a tidal environment*. Applied Ocean Research, 108, 102541, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102541>
- RIVIER A., LE HIR P., BAILLY DU BOIS P., LAGUIONIE P., MORILLON M. (2017). *Numerical modelling of heterogeneous sediment transport: new insights for particulate radionuclide transport and deposition*. R.D. Troels Aagaard, David Fuhrman (Editor), Coastal Dynamics, Helsingør, Denmark, pp. 1767-1778.