

## Projet

# asSistance à la Navigation pour l'Accès aux Ports en Sécurité



ACTIVITÉ T2.1: MISE EN ŒUVRE DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

PRODUIT T2.1.3: VALIDATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES

Partner responsable: UNIGE

Partenaires contributeurs: UTLN, CNR-ISMAR, LaMMA

## **SOMMAIRE**

<b><i>Description du produit</i></b> .....	<b><i>i</i></b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>2. MODÉLISATION DU PORT DE GENES</b> .....	<b>1</b>
<b>3. MODÉLISATION DE LA BAIE DE TOULON</b> .....	<b>11</b>
<b>4. MODÉLISATION DU GOLFE DE LA SPEZIA</b> .....	<b>12</b>
<b>5. Bibliographie</b> .....	<b>19</b>

## **Description du produit**

Ce rapport présente la validation des modèles numériques utilisés pour la caractérisation du climat marin dans les zones d'étude du projet SINAPSI. En particulier, des études de cas sont présentées pour la validation des modèles hydrodynamiques dans le Port de Gênes, la Baie de Toulon et le Golfe de La Spezia.

Il convient de noter que seuls les résultats des modèles susmentionnés sont présentés dans ce produit, en les comparant aux données mesurées prises comme référence pour vérifier la justesse de la modélisation. Pour une description détaillée des modèles, c'est-à-dire les équations sur lesquelles ils sont basés et les schémas numériques adoptés pour les résoudre, veuillez vous référer au rapport T2.1.1. - "DÉFINITION DE MODÈLES NUMÉRIQUES POUR LA DYNAMIQUE MARINE DES PORTS".

## **1. INTRODUCTION**

L'hydrodynamique des baies et des zones portuaires est fortement conditionnée non seulement par les forçages environnementaux météorologiques et maritimes qui s'exercent sur elles (tels que le climat des vagues, les vents, les excursions de marée, etc.), mais aussi par leur géométrie particulière, qui peut modifier considérablement les régimes des courants et des vagues.

En vertu de ce qui précède, l'analyse des processus physiques dans les géométries composites peut difficilement faire appel à des formules paramétriques simplifiées, et les équations complexes qui régissent l'hydrodynamique côtière ne peuvent pas non plus être résolues de manière analytique. Au lieu de cela, il est courant d'utiliser des modèles numériques capables de simuler les processus littoraux en détail d'un point de vue eulérien (dynamique de la concentration) et lagrangien (dispersion des masses et des objets).

Actuellement, il existe de nombreux modèles numériques disponibles, comme indiqué dans le produit T2.1.1. - "DÉFINITION DES MODÈLES NUMÉRIQUES POUR LA DYNAMIQUE DES PORTS MARITIMES". Le choix du modèle le plus approprié pour le cas considéré dépend du type de processus à examiner, et doit nécessairement être effectué avec la prudence nécessaire. Dans ce rapport, on évalue les performances de deux modèles numériques différents, utilisés pour le calcul de l'hydrodynamique dans trois zones d'étude différentes qui font partie du projet SINAPSI : le port de Gênes, la baie de Toulon et le golfe de La Spezia.

## **2. MODÉLISATION DU PORT DE GENES**

Le DICCA de l'Université de Gênes a mis au point un modèle numérique tridimensionnel de la suite Delft3D, développée et gérée par Deltares (anciennement Delft Hydraulics ; <https://www.deltares.nl/en/>), qui consiste en une variété de modules qui s'interfaçent dynamiquement pour l'échange de données et de résultats, chacun d'entre eux traitant d'un domaine d'intérêt particulier tel que les flux, le transport de sédiments, les vagues, la qualité de l'eau, les développements morphologiques et l'écologie.

Parmi les modules disponibles incorporés dans le paquet, celui adopté dans le présent travail est Delft3D-FLOW, un système intégré de modélisation de l'écoulement et du transport qui permet une approche multidisciplinaire et des calculs 3D pour les régions côtières, fluviales et estuariennes, utilisé pour étudier les eaux du port de Gênes et de ses zones adjacentes. Ce modèle est l'un des outils les plus robustes et les plus fiables

**PRODUIT N. T2.1.3**

pour l'étude de la dynamique des courants, du transport des sédiments, des changements de niveau, des vagues et de la qualité de l'eau, tant du point de vue de l'application que du développement et de la recherche.

Le domaine de calcul développé pour la zone de Gênes est représenté sur la figure 1 ; il est constitué de deux maillages de calcul différents greffés l'un sur l'autre, avec une résolution variable comme indiqué dans le tableau 1.

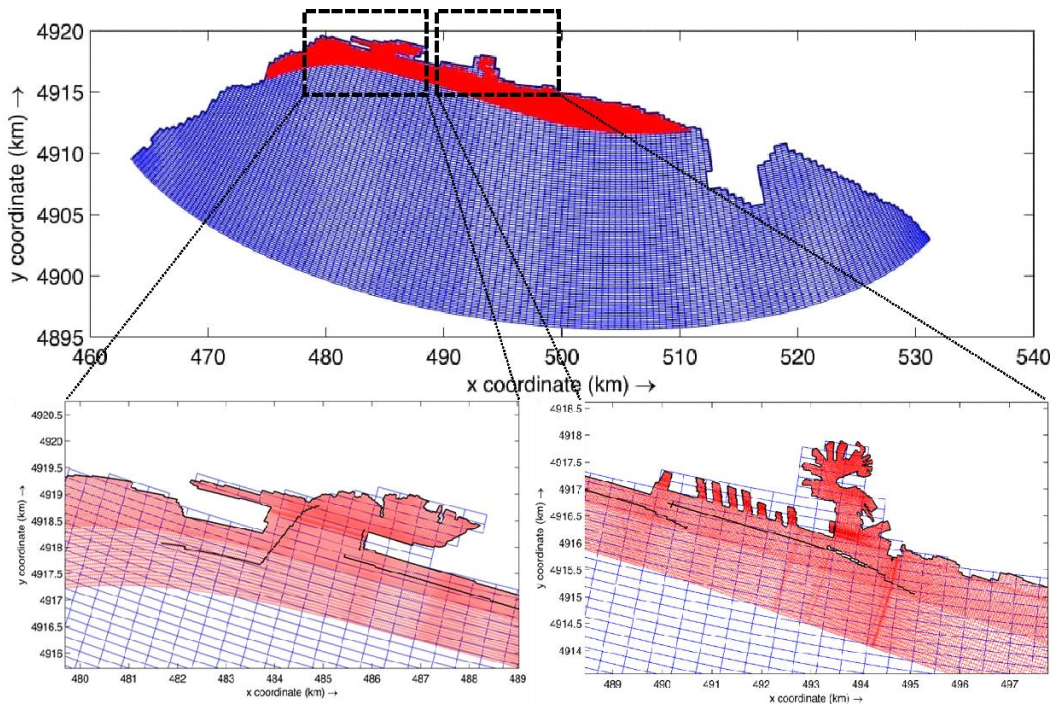


Figure 1. maillage de calcul pour le port de Gênes.

Delft3D-FLOW utilise une méthode de différences finies 'cyclique' (C-FDM) pour résoudre les équations de quantité de mouvement et de continuité horizontale sur les nœuds de la grille de calcul (Figure 1).



Tableau 1. Propriétés du maillage de calcul - domaine de Gênes.

Propriétés de la grille (interne/externe)	11418/60413
Nombre de cellules direction M	138/1028
Nombre de cellules direction N	116/185
Rapport de cellules direction M	1.1/1.1
Rapport de cellules direction N	1.1/1.1
Direction du bord d'extension M	705 m~175 m / 5 m~96 m
Direction du bord d'extension N	79 m~197 m / 5 m~117 m
Résolution de la grille (port intérieur)	112 m~356 m / 8 m~87 m
orthogonalité	0~0.02 / 0~0.01

Le modèle a été forcé avec les scénarios météo-marins introduits dans le produit T2.1.2, afin de calculer les modèles hydrodynamiques les plus significatifs pour la zone considérée. En plus des données sur les vagues, extraites du service de rétrodiffusion de DICCA, le modèle a également été forcé avec les excursions de marée reproduites in situ à l'aide du logiciel TPXO (<https://www.tpxo.net/global/tpxo9-atlas>), propagées du large vers la côte avec les vagues de mer (plus courtes), afin de dériver les séries de niveaux dans la zone portuaire en correspondance avec les scénarios mentionnés ci-dessus.

Ces mesures ont été comparées aux données fournies par l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), qui dispose d'un réseau de marégraphes (celui situé à Gênes est représenté sur la figure 2). Pour la période comprise entre 1998 (année de création du Réseau marégraphique national) et 2009, ISPRA fournit des données sur la vitesse et la direction du vent, la température de l'air et de l'eau, la pression atmosphérique et le niveau pour 26 stations de mesure, toutes avec la même référence altimétrique, bien que la disponibilité de ces données varie légèrement d'une station à l'autre et que la collecte ait commencé à des années différentes et comporte des périodes manquantes. Les données de niveau, qui sont généralement disponibles avec des mesures toutes les 10 minutes, ont été observées au moyen d'un capteur hydrométrique à ultrasons qui est présent dans chaque station de mesure de la RMN depuis 1998 et qui est toujours utilisé aujourd'hui. Pour les informations antérieures à





**Interreg**



UNION EUROPÉENNE  
UNIONE EUROPEA



SINAPSI

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

### **PRODUIT N. T2.1.3**

1998 (jusqu'à environ 1970, mais seulement pour certaines stations de mesure), les archives ISPRA comprennent également des données collectées à partir de stations qui existaient avant la création de la RMN et qui étaient exploitées par des services hydrographiques locaux. Cependant, seules des mesures horaires sont disponibles pour le paramètre du niveau de la mer et la collecte de ces données a débuté à des années différentes selon les stations et comporte des périodes manquantes.

Les résultats de la comparaison entre les données simulées (avec Delft3D) et observées (données ISPRA) pour certains des scénarios météo-marins du produit T2.1.2 sont présentés dans les figures 3 à 12.



*Figure 2. station de mesure du niveau de la mer pour la localité de Gênes.*

Les résultats montrent des comparaisons cohérentes à la fois de la phase et de l'amplitude des fluctuations de niveau pour les scénarios 5, 10, 11, 12, tandis que pour

**PRODUIT N. T2.1.3**

les autres scénarios, les fluctuations de phase sont correctement reproduites au prix d'une fiabilité réduite concernant les amplitudes des fluctuations. Ces divergences sont probablement dues à la contribution de l'élévation du niveau moyen de la mer induite par les gradients de pression et/ou les ondes de tempête, plutôt que par des phénomènes plus locaux.

Un résumé des résultats est présenté dans le diagramme de Taylor (Figure 13).

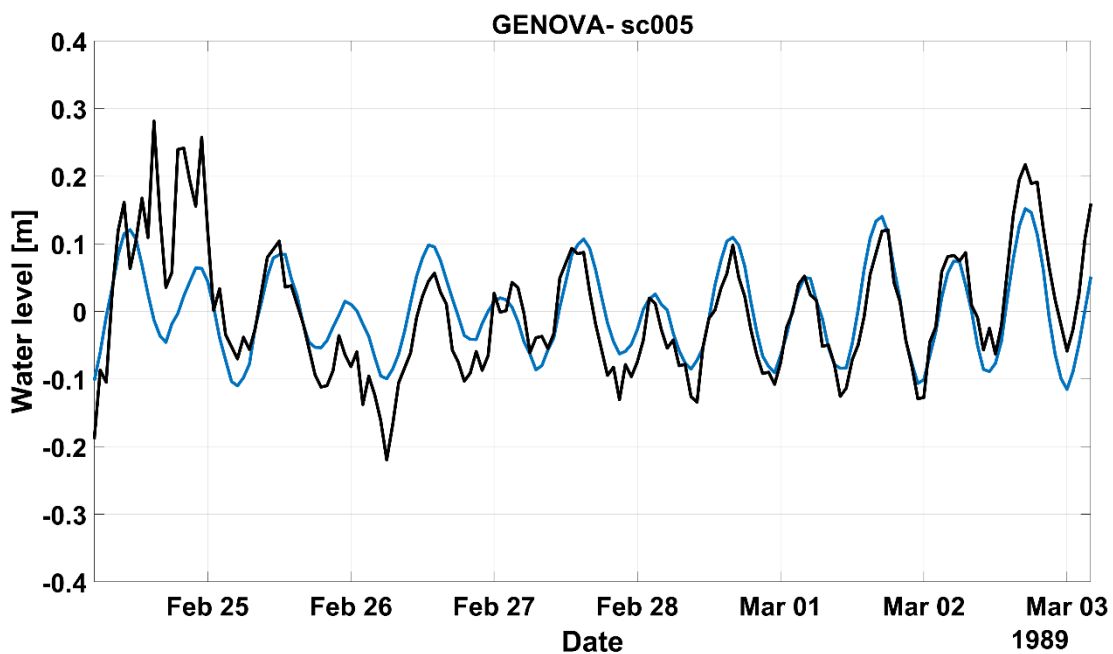


Figure 3 : Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 5 à Gênes.



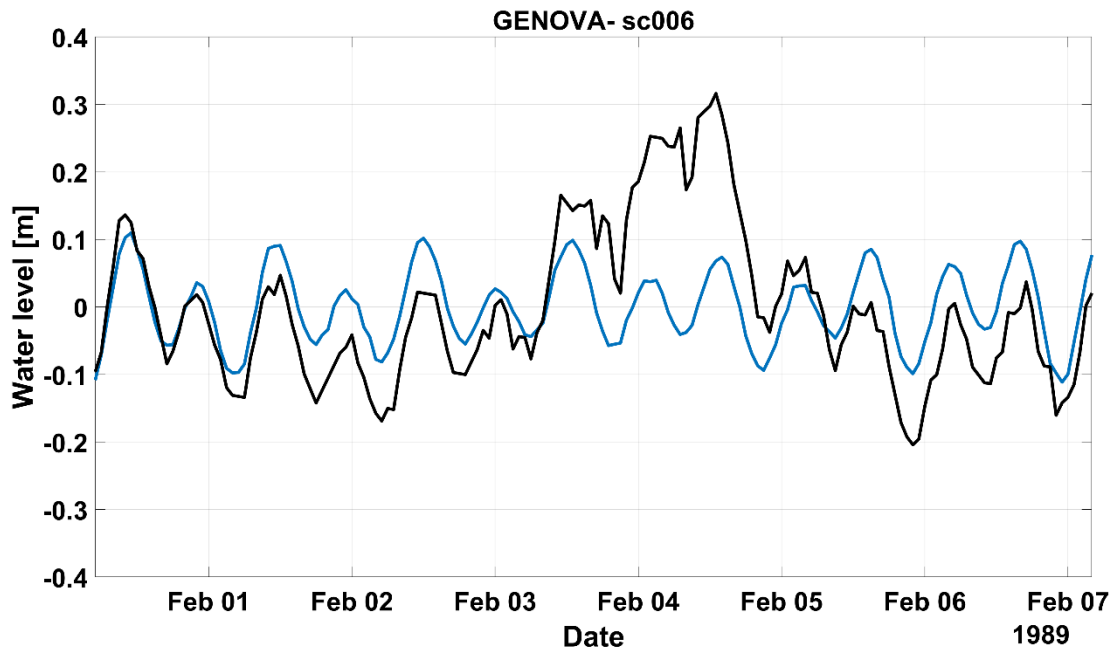


Figure 4 : Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 6 à Gênes.

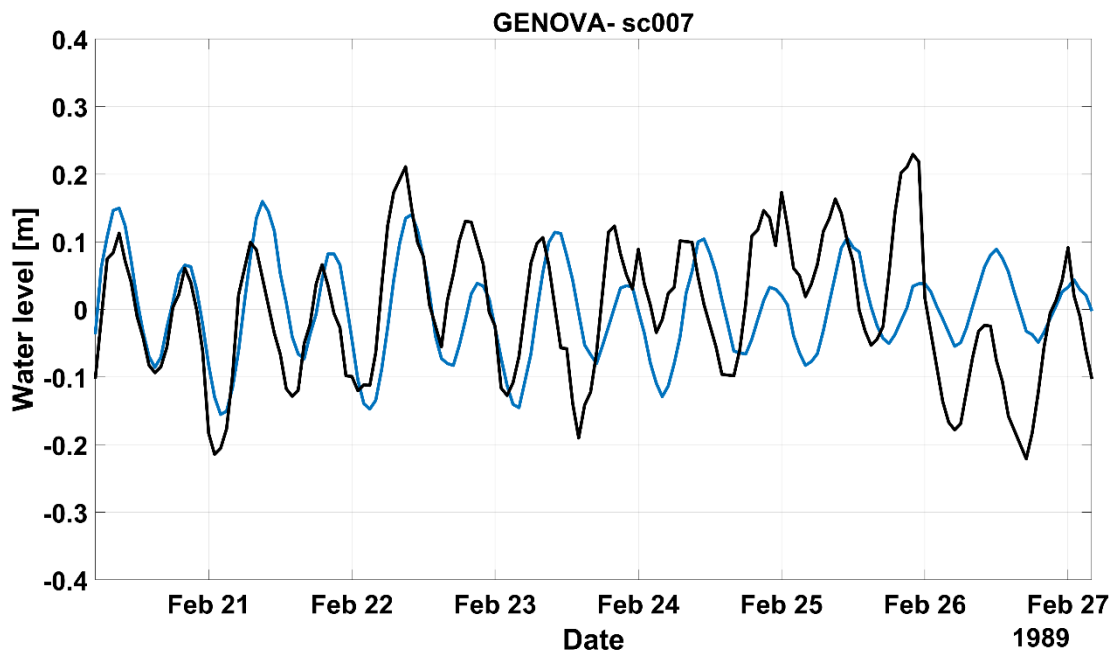


Figure 5 : Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 7 à Gênes.

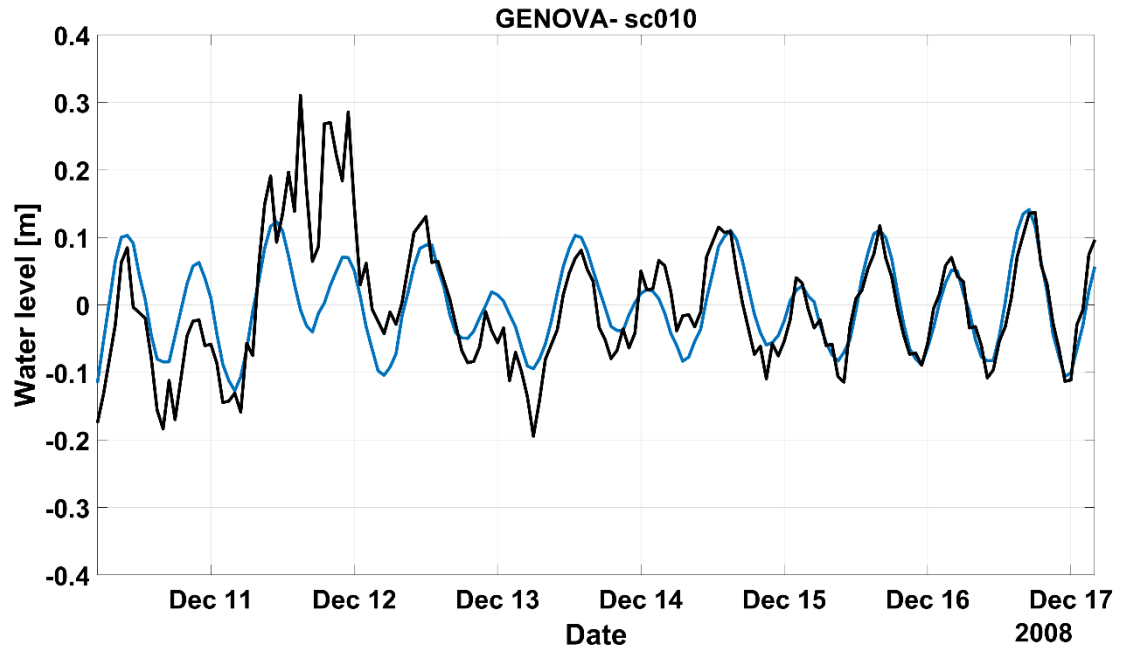


Figure 6 : Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 10 à Gênes.

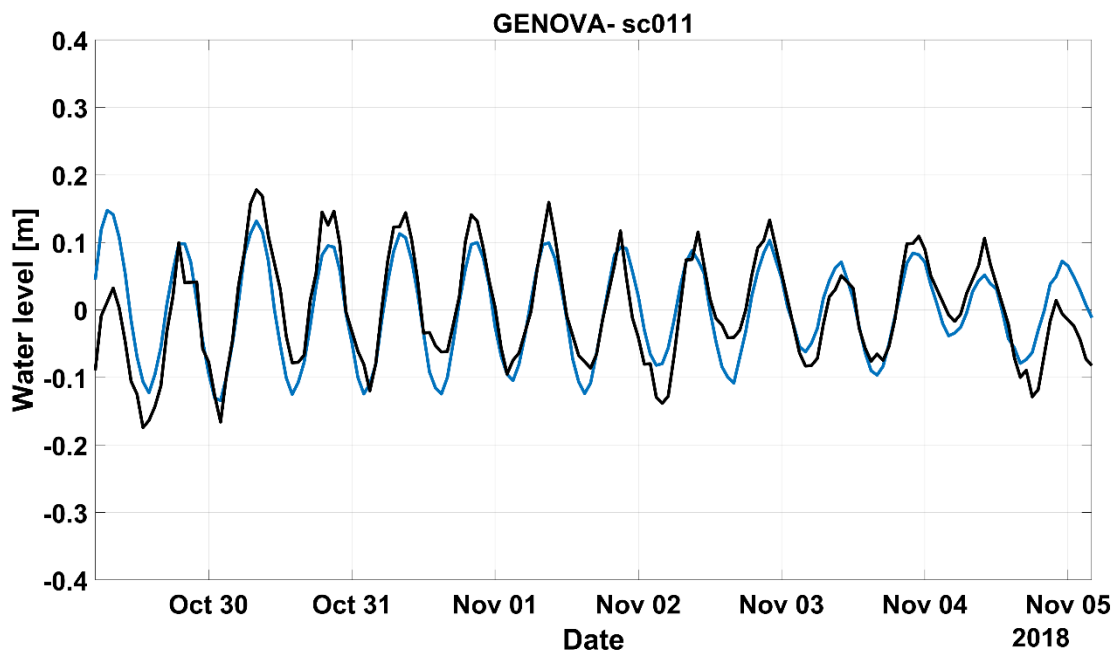


Figure 7 : Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 11 à Gênes.

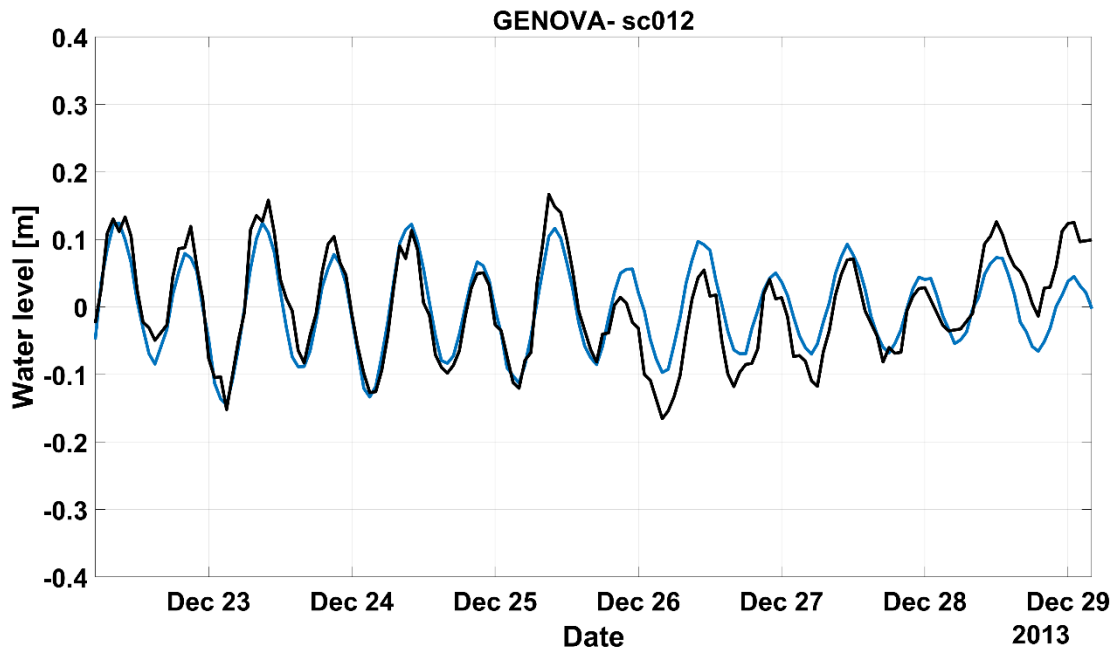


Figure 8. Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 12 à Gênes.

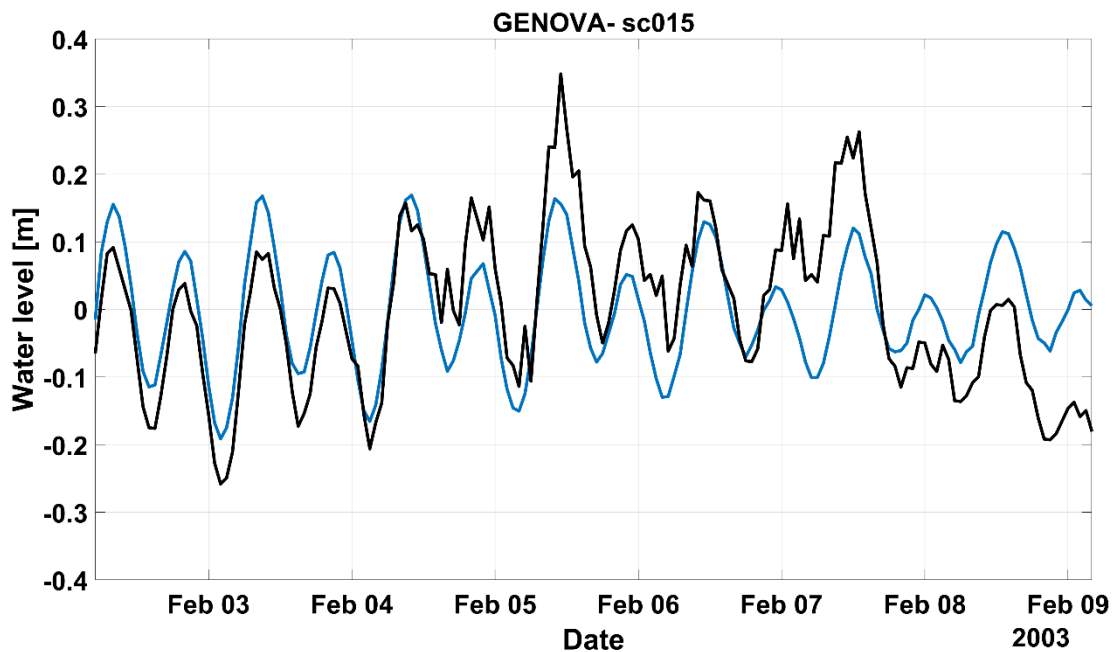


Figure 9. Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 15 à Gênes.

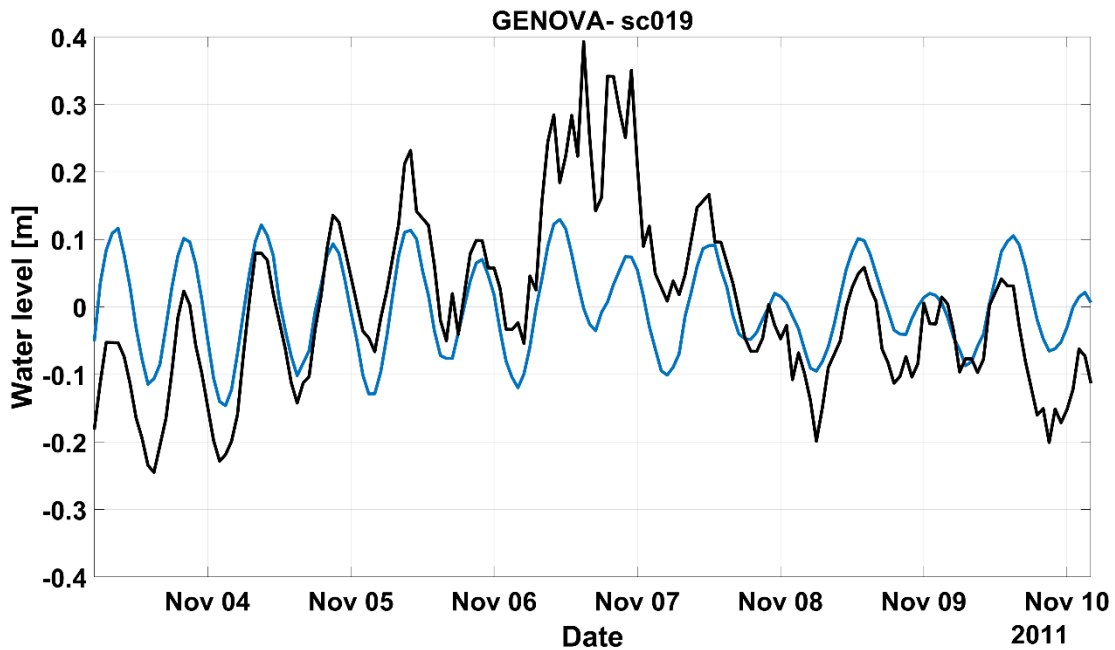


Figure 10. Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 19 à Gênes.

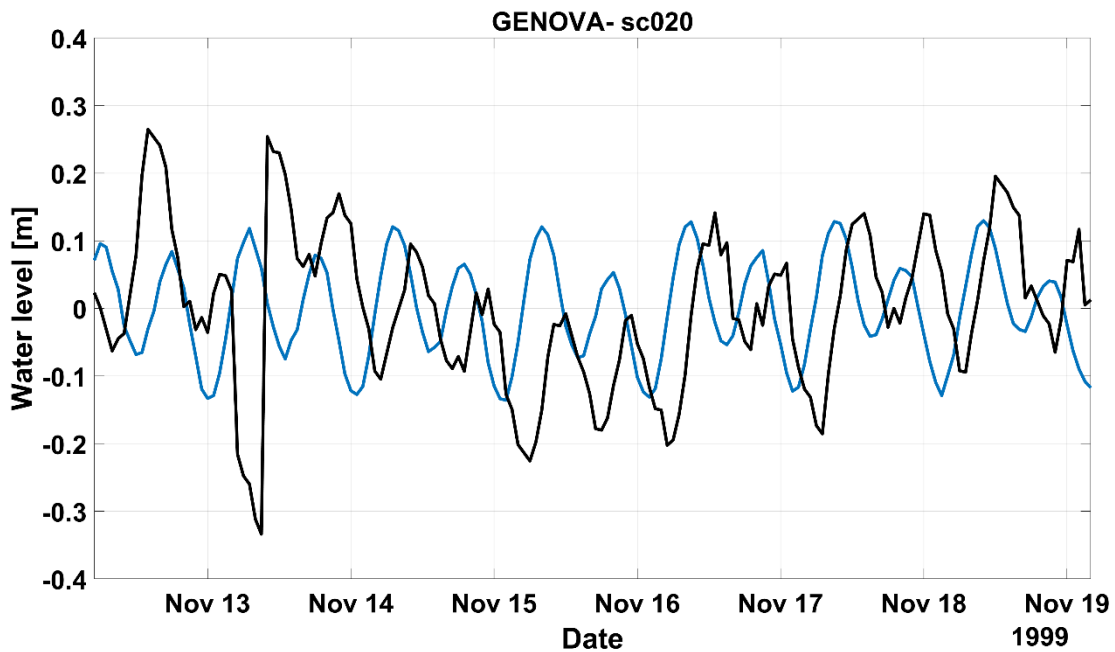


Figure 11. Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 20 à Gênes.

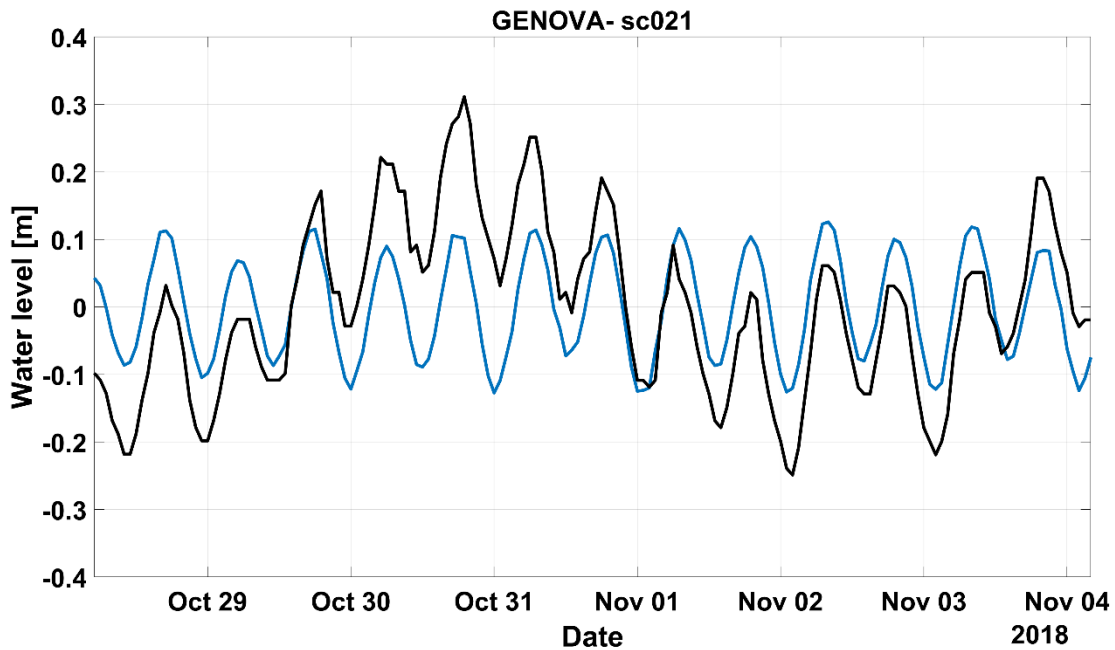


Figure 12. Comparaison des séries observées (en noir) et simulées (en bleu) pour le scénario 21 à Gênes.

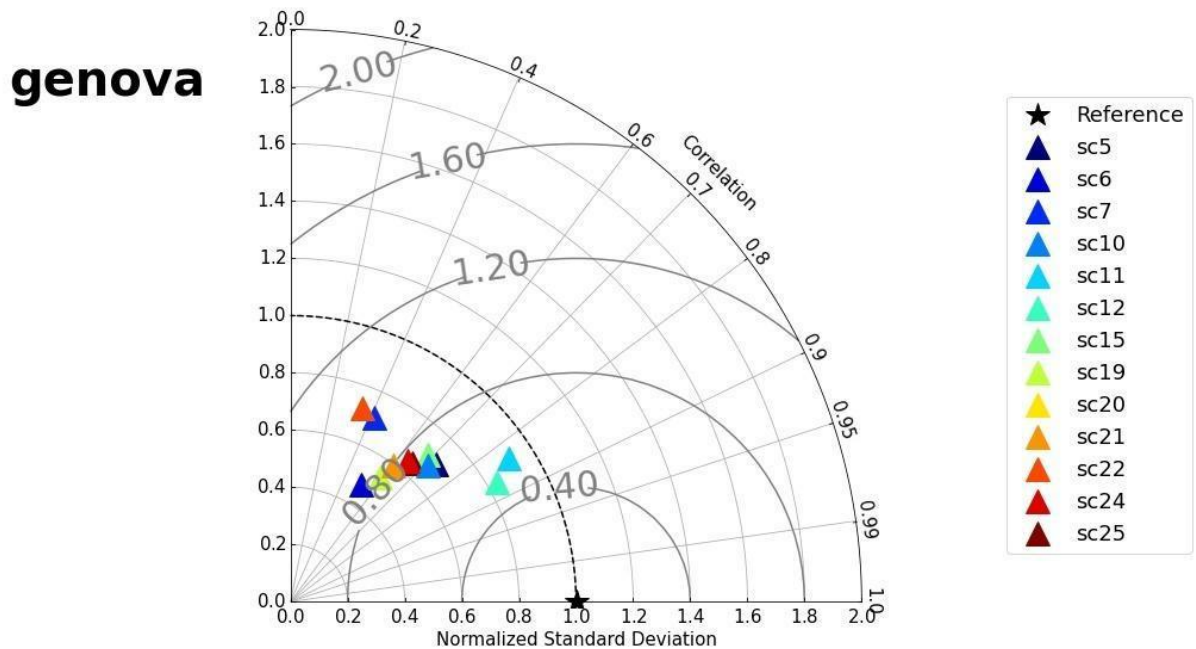


Figure 13. Diagramme de Taylor pour la comparaison entre les données de niveau mesurées et observées dans le port de Gênes (un alignement parfait entre les séries tomberait au niveau de l'étoile noire).

### **3. MODÉLISATION DE LA BAIE DE TOULON**

Un modèle numérique à trois mailles emboîtées successives (c'est-à-dire trois mailles emboîtées les unes sur les autres) a été développé et validé par l'Université de Toulon, et fonctionne actuellement de manière opérationnelle, produisant des simulations à très haute résolution du Golfe du Lion à la Baie de Toulon.

La configuration opérationnelle PSY4V3R1, développée par Mercator Océan et couvrant toute la Méditerranée, est utilisée pour alimenter la première couche de la chaîne de modélisation à l'échelle régionale par les bords ouverts (<http://www.mercator-ocean.fr>). La résolution spatiale est d'environ 1/12 degré sur l'horizontale, caractérisée par 50 niveaux verticaux et 130 niveaux verticaux dans la région du Golfe du Lion avec la configuration GLAZUR64.

Le niveau suivant est atteint avec NIDOR192, qui couvre la zone côtière du Var à une résolution d'environ 400 m. Ces trois configurations sont basées sur le modèle de circulation générale NEMO, qui résout numériquement les équations primitives 3D sur une grille C en coordonnées z. Il s'agit d'un modèle hydrostatique, avec l'approximation de Boussinesq, l'option TKE pour la fermeture de la turbulence et une formulation paramétrique pour le forçage atmosphérique.

Le dernier maillon de la chaîne de modélisation est la configuration TBAY100, qui couvre la rade semi-fermée de Toulon avec une résolution de 100 m et est basée sur le modèle de circulation générale du MIT (MITgcm) dans sa version hydrostatique. Ce modèle est un modèle à surface libre, en coordonnées z, et la discrétisation est en volumes finis.

Les trois configurations sont forcées par des données atmosphériques (vent, flux thermique, évaporation) produites par le modèle opérationnel ARPEGE de Météo-France. En particulier, les données obtenues avec les simulations numériques de la configuration TBAY100 ont été comparées aux données échantillonnées par les 3 ADCPs positionnés dans la rade de Toulon.

L'analyse fréquentielle en énergie cinétique présentée dans la figure 14 permet d'évaluer le modèle numérique. Les deux spectres sont très proches et les principaux pics d'énergie (12 et 24 heures) mesurés par l'ADCP sont bien présents dans les simulations. De plus, les pentes caractérisant les cascades d'énergie sub- et supra-inertielles sont similaires, bien que pour les hautes fréquences le modèle sous-estime légèrement l'énergie totale.



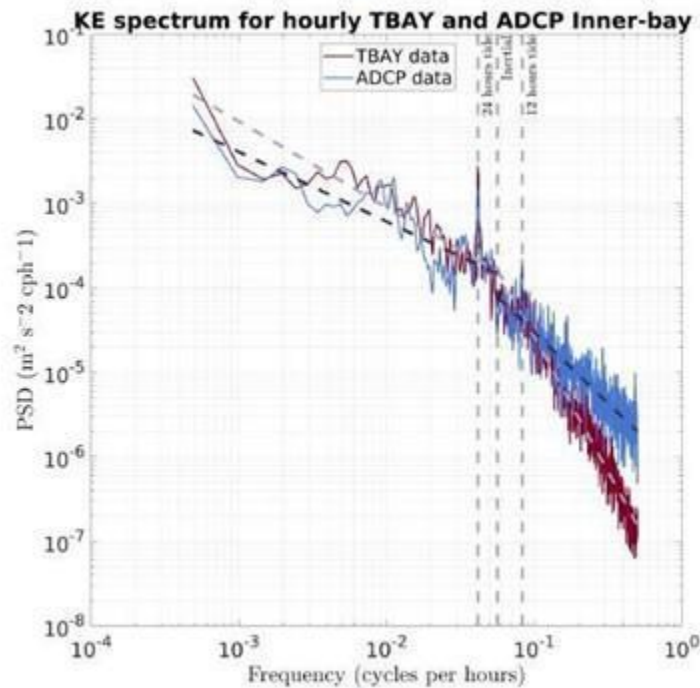


Figure 14. Densité spectrale de l'énergie cinétique calculée à partir des courants mesurés par la station ADCP 3 à la surface (bleu) et simulés par le modèle (rouge).

#### 4. MODÉLISATION DU GOLFE DE LA SPEZIA

La circulation marine dans la zone du Golfe de La Spezia est simulée par le CNR-ISMAR à l'aide du modèle Delft3D (Deltares, 2022a). Delft3D est un modèle numérique open-source, à surface libre, qui résout les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible. Le choix du modèle Delft3D est motivé par plusieurs raisons. Tout d'abord, Delft3D est capable de simuler des écoulements non stationnaires dans des eaux relativement peu profondes telles que celles du Golfe et des zones côtières environnantes. Le modèle prend également en compte les effets des marées, des vents et des différences de densité avec différents modèles de fermeture turbulente. Deuxièmement, Delft3D permet de générer des grilles horizontales à haute résolution et de résoudre des géométries complexes grâce à l'utilisation de "barrages minces", c'est-à-dire des barrières infiniment fines qui empêchent l'échange de flux entre deux cellules de calcul adjacentes. Ces éléments sont adaptés à la modélisation de brise-lames, de jetées et de quais tels que ceux que l'on trouve dans la partie intérieure du Golfe. Troisièmement, Delft3D présente des caractéristiques utiles qui seront exploitées à l'avenir : en particulier, sa capacité non hydrostatique et la possibilité de modéliser les effets des vagues grâce au couplage avec le modèle SWAN (Deltares, 2022b).

### PRODUIT N. T2.1.3

Dans ce produit, la configuration hydrostatique est utilisée et suit la bathymétrie ('sigma') du modèle ainsi que la formulation prédéfinie de l'équation d'état (UNESCO, 1981). Les bords ouverts sont situés au sud, à l'ouest et à l'est du domaine, tandis que le bord nord est fermé en raison du littoral ligure (Figure 15). Le domaine est discrétisé avec une grille horizontale non uniforme de  $980 \times 330$  points : le maillage numérique à haute résolution est uniforme et présente un pas de grille de  $\Delta x = 50$  m dans la zone d'intérêt. Le maillage s'élargit linéairement dans les 20 derniers points à l'approche des trois bords ouverts et atteint une valeur maximale de  $\Delta x = 300$  m. La dimension verticale est divisée en 30 couches 'sigma' qui sont regroupées à la fois en surface et au fond afin de résoudre l'influence du forçage de surface et de la bathymétrie complexe sur la circulation. Les données bathymétriques provenant à la fois de l'Institut Hydrographique de la Marine et de la nouvelle base de données de bathymétrie numérique (DTM) d'EMODnet sont combinées ensemble et interpolées sur la grille de calcul.

Dans cette étude, 12 expériences numériques différentes (tableau 2) sont considérées pour étudier les changements dans les résultats dus à la dynamique tridimensionnelle, aux vents et à la stratification différente de l'eau pour des saisons changeantes. Toutes les simulations commencent au repos avec une surface de niveau de la mer non perturbée. Une condition de non-glissement est appliquée à tous les bords du matériau et un coefficient de Chezy de  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  est utilisé pour le terme de friction du fond. Les valeurs de viscosité et de diffusivité horizontales sont fixées à  $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ , tandis que dans les expériences 3D, un schéma de fermeture turbulent vertical "k-epsilon" est utilisé avec des valeurs de viscosité et de diffusivité verticales du fond fixées à  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Le temps d'intégration pour toutes les expériences est de 7 jours, tandis que le pas de temps est de 6 s pour respecter la condition de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Les valeurs des variables marines simulées telles que la température, la salinité et la vitesse du courant sont enregistrées toutes les heures et à chaque point de grille.

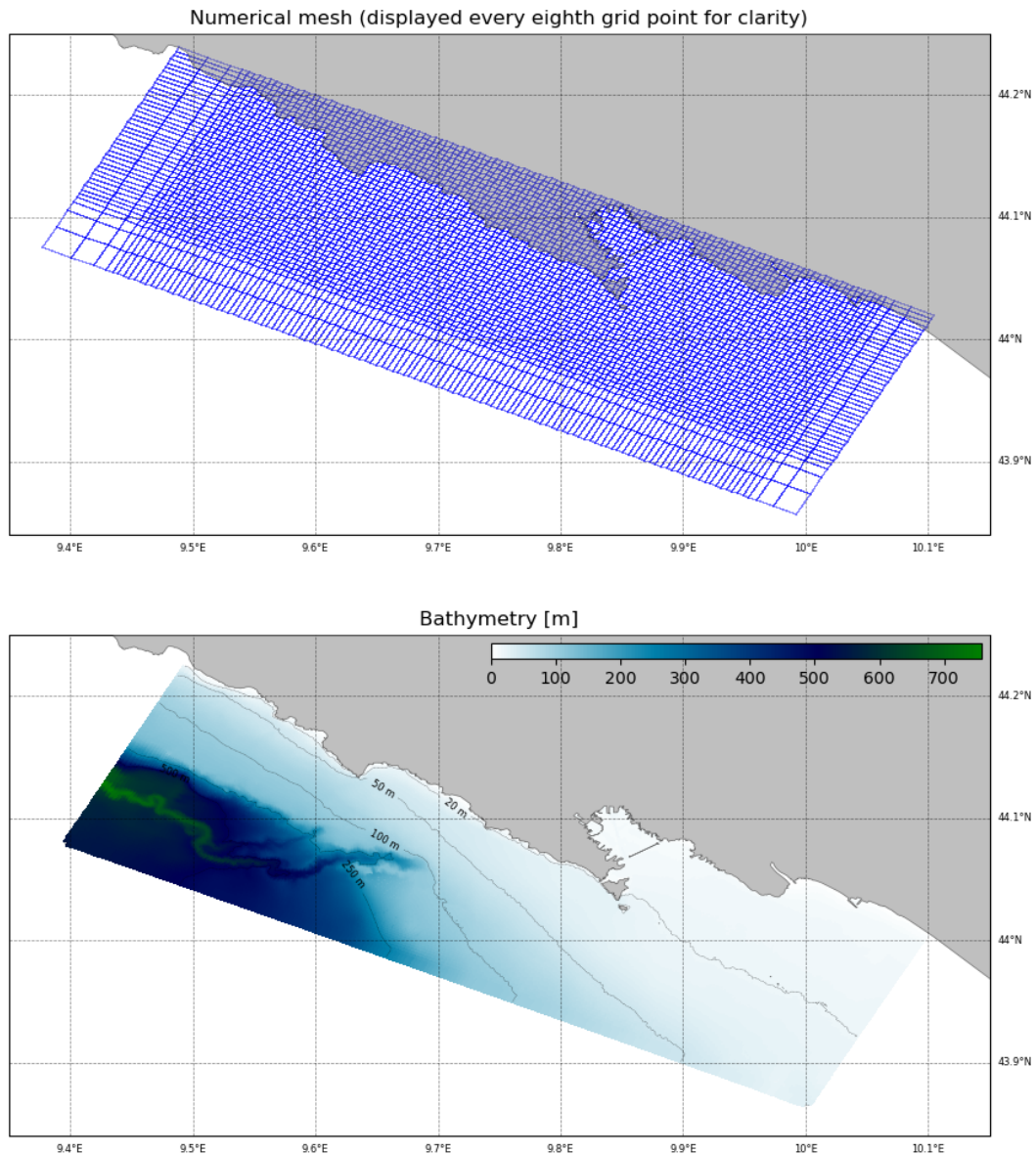


Figure 15. Panneau supérieur : étendue du domaine de calcul et de la grille numérique. Pour plus de clarté, seule une maille de la grille par huit est représentée. Panneau inférieur : bathymétrie (couleur).

La méthode "cyclique" (Stelling et Leendertse, 1992) basée sur le schéma d'erreur dissipatif à phase réduite est utilisée pour intégrer implicitement les termes d'advection et de diffusion pour les équations de quantité de mouvement et de traceur. Les sorties numériques à 300 m de résolution horizontale du modèle de circulation générale Ligurian Integrated Modelling Effort (LIMEgcm, Sciascia et al., 2022) sont utilisées aux trois bords ouverts pour considérer la circulation à grande échelle dans la zone. Les moyennes de vitesse climatologiques intégrées verticalement de LIMEgcm sont obtenues en considérant les trois mois d'hiver de janvier, février et mars, et les mois



**Interreg**



UNION EUROPÉENNE  
UNIONE EUROPEA



SINAPSI

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

### **PRODUIT N. T2.1.3**

d'été de juillet, août et septembre pendant les années 2004, 2005 et 2006. Les moyennes sont utilisées comme conditions de type vitesse pour forcer toutes les simulations avec différents profils de vitesse horizontale constante aux trois bords ouverts. Une vitesse sinusoïdale est ajoutée aux profils stables à l'est et à l'ouest afin de reproduire le signal de marée semidiurne observé dans la région et rapporté par Marri et al. (1991) et Borella et al. (1992). Au sud, les vitesses sont ensuite corrigées pour minimiser le flux net et appliquées avec un coefficient de réflexion de 1 an pour mettre en œuvre une condition de frontière mixte et plus de type Riemann (Verboom et Slob, 1984 ; Verboom et Segal, 1987 ; Stelling et Rijkswaterstaat, 1984). Cette condition permet aux signaux de se propager à travers la frontière la plus longue et minimise leur réflexion dans le domaine de calcul. Enfin, une rampe d'un jour est appliquée à toutes les vitesses à la frontière pour faciliter le démarrage des simulations et réduire l'amplitude des ondes courtes introduites à leur début.

Les trois premières expériences numériques sont bidimensionnelles (2D) et les champs de température et de salinité sont uniformément égaux aux valeurs de 13°C et 38 sur l'ensemble du domaine et les trois bords ouverts. Pour étudier le rôle des vents, cette première série de trois expériences considère tout d'abord l'absence de forçage du vent (expérience 2D\_NoWind), et ensuite des vents qui augmentent linéairement de 0 à 5 m/s pendant le premier jour et qui soufflent ensuite régulièrement pendant le reste des simulations. La direction du vent varie dans les deux dernières expériences : dans 2D\_SouthWind et 2D\_NorthWind, les vents soufflent respectivement du sud ("Mezzogiorno" ou vents du sud) et du nord ("Tramontana" ou vents du nord). Cette idéalisation du forçage du vent est en accord avec la direction principale du sud et l'intensité moyenne du vent rapportée dans Gasparini et al. (2009) et avec le régime de brise de mer dans la direction nord-sud observé dans Marri et al. (1991).

*Tableau 2 : Simulations utilisées pour l'étude de la circulation dans le Golfe de La Spezia.*

Numéro et code simulation	Stratification (saison)	Direction du vent (nom commun)	Vitesse du vent
1. 2D_NoWind	Absent	Absent	Absent
2. 2D_SouthWind	Absent	Du sud (Mezzogiorno)	5 m/s
3. 2D_NorthWind	Absent	Depuis le nord (Tramontana)	5 m/s
4. Uniform_NoWind	Absent	Absent	Absent
5. Uniform_SouthWind	Absent	Depuis le sud (Mezzogiorno)	5 m/s
6. Uniform_NorthWind	Absent	Depuis le nord (Tramontana)	5 m/s
7. Summer_NoWind	Été	Absent	Absent
8. Été_SudWind	Été	Depuis le sud (Mezzogiorno)	5 m/s
9. Vent d'été_Nord	Été	Depuis le nord (Tramontana)	5 m/s
10. Winter_NoWind	Hiver	Absent	Absent
11. Vent d'hiver_Sud	Hiver	Depuis le sud (Mezzogiorno)	5 m/s
Vent d'hiver_Nord	Hiver	Depuis le nord (Tramontana)	5 m/s

Toutes les autres expériences sont tridimensionnelles (3D). Dans le premier groupe de simulations tridimensionnelles (expériences Uniform\_NoWind, Uniform\_SouthWind et Uniform\_NorthWind), la résolution explicite de la dimension verticale est à nouveau examinée en l'absence de stratification : dans ces expériences, les champs de température et de salinité sont toujours maintenus sur l'ensemble du domaine et aux trois bords ouverts aux valeurs de 13°C et 38 comme dans les cas bidimensionnels correspondants. Dans les six autres simulations tridimensionnelles, les forçages de vent et de saisonnalité sont modifiés, en considérant la stratification de l'eau en été et en hiver. Pour ces expériences, on utilise les profils verticaux estivaux et hivernaux climatologiques de la température et de la salinité, qui proviennent toujours du modèle LIMEgcm et représentent les valeurs moyennes horizontales saisonnières pour les mêmes mois et années que ceux utilisés pour les moyennes de la vitesse de bord. Ces profils verticaux saisonniers et climatologiques sont répétés horizontalement comme conditions initiales et maintenus constants aux bords ouverts pendant toute la durée



**PRODUIT N. T2.1.3**

des simulations. Dans toutes les simulations tridimensionnelles, les directions et les intensités du vent varient comme dans les expériences bidimensionnelles (voir le tableau 2).

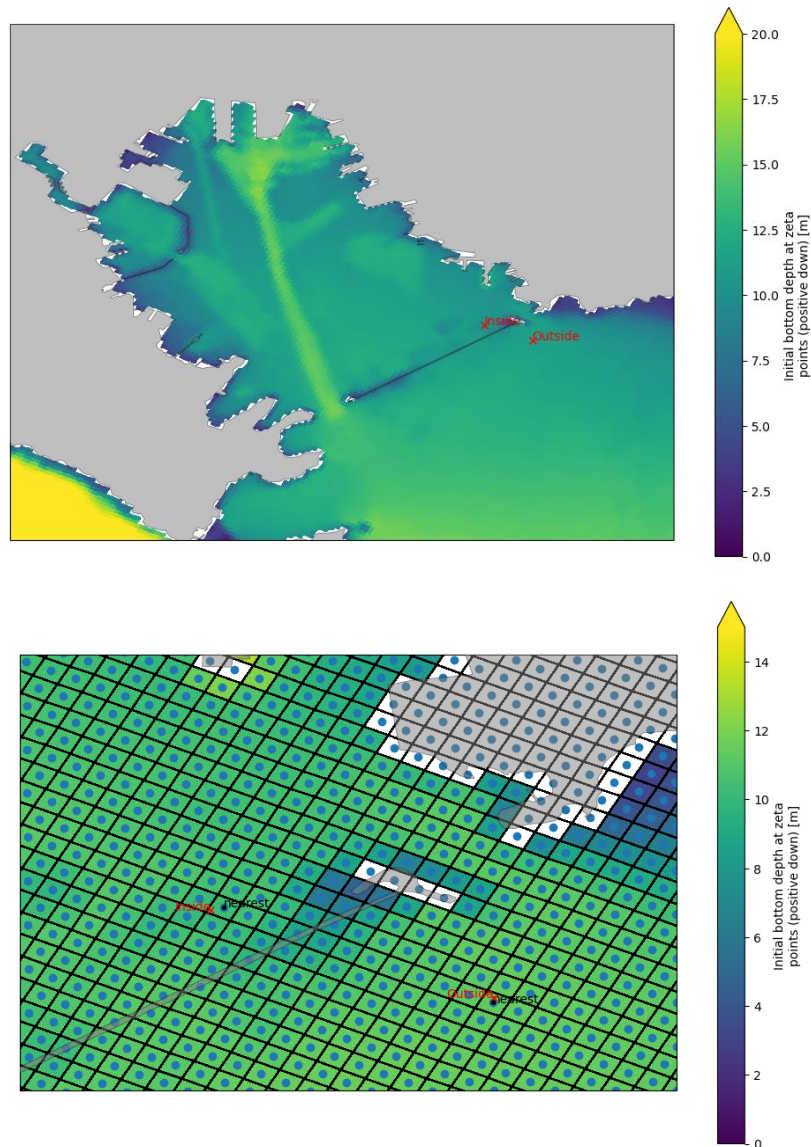


Figure 16. Panneau supérieur : bathymétrie (couleur) et positions des deux courantomètres (croix rouges), à l'extérieur et à l'intérieur du Golfe. Panneau inférieur : bathymétrie (couleur) en chaque point de la grille du modèle (points bleus), positions des deux courantomètres (croix rouges) et points de calcul correspondants pour comparaison avec les vitesses du modèle (points noirs).



### **PRODUIT N. T2.1.3**

Des mesures expérimentales de vitesse du courant marin mises à disposition par le Centre de recherche sur l'environnement marin de Santa Teresa de l'Agence nationale pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable (ENEA) sont considérées pour la validation. Les mesures ont une fréquence nominale de 1 point de données toutes les 30 min et proviennent de deux courantomètres à point unique (modèle Aanderaa DCS.Z-Pulse) placés à l'extérieur et à l'intérieur du Golfe (Figure 16) à une profondeur moyenne de 5 m environ. Les vitesses du courant marin ont été mesurées en ces deux points en juillet et août 2022.

La simulation tridimensionnelle "Summer\_NoWind", c'est-à-dire la simulation avec stratification estivale et en l'absence de vent, et les positions des deux points de calcul les plus proches des deux courantomètres sont considérées pour la comparaison avec la période de mesure.

La figure 17 montre les box plots comparant les observations et le modèle. La comparaison est satisfaisante si l'on considère que le modèle reconstruit les tendances actuelles dans une semaine d'été climatologique, en l'absence de vent et dans des conditions particulières idéalisées de forçage de marée constant dans sa période et son amplitude. Les mesures expérimentales, par contre, sont évidemment soumises à une variabilité réelle que le modèle ne prend pas en compte actuellement. Malgré ces différences, les valeurs numériques médianes aux deux positions sont réalistes pour les deux composantes et pour les deux positions. De plus, tant les mesures expérimentales que le modèle montrent que le courant à l'intérieur du golfe a une vitesse plus faible et qu'il est environ deux fois moins important que le courant à l'extérieur.

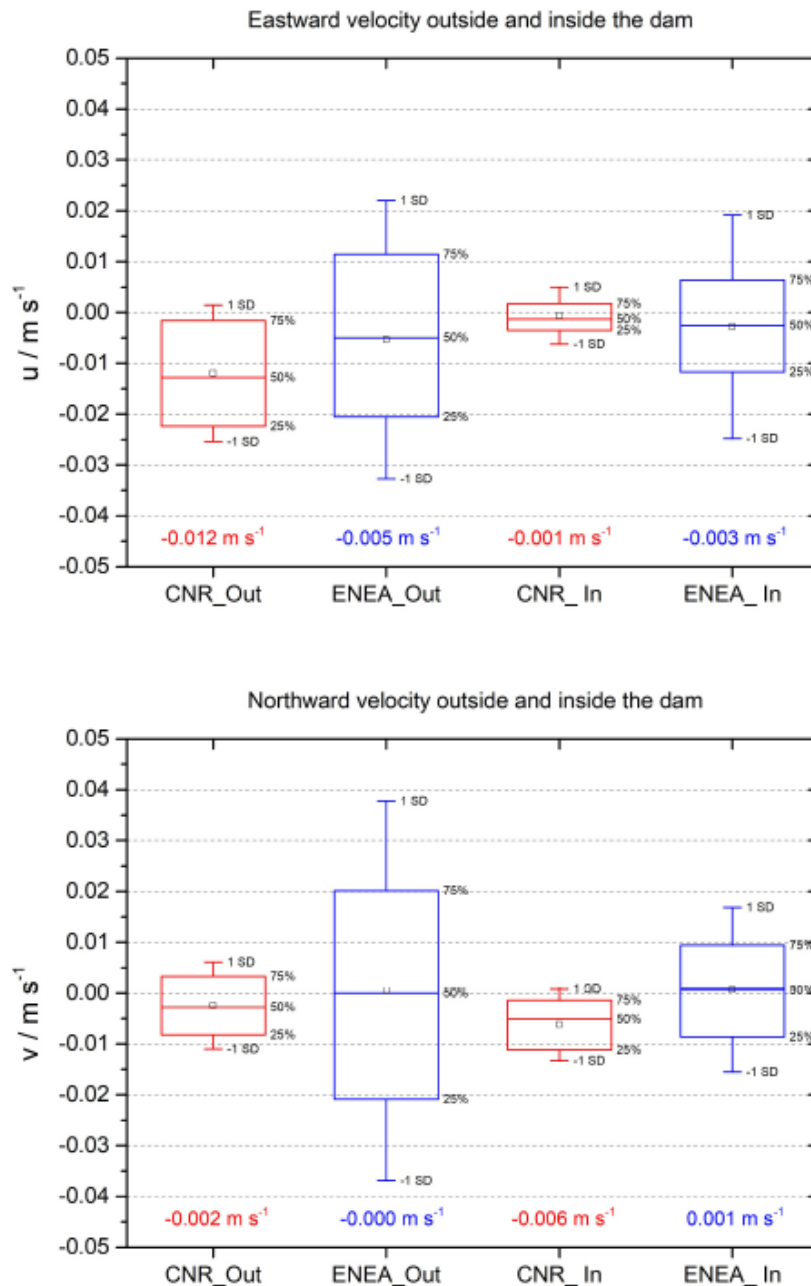


Figure 17. Box-plot comparant le modèle et les observations entre les composantes zonales (panneau supérieur) et méridionales (panneau inférieur) pour des points situés à l'extérieur et à l'intérieur du Golfe.

## 5. Bibliographie

Borella, A., Cambiaghi, M., Marri, P., Meloni, R., Miserocchi, M., Nair, R., et Tomasino, M. : *Gulf of La Spezia : An Analysis of the Mechanisms of Water Exchange between the Inner Gulf and the Open Sea*, pp. 297-312, Thomas Telford, <https://doi.org/10.1680/mt.16897.0021>, 1992

Deltares : *Delft3D-Flow. Simulations d'écoulements hydrodynamiques multidimensionnels et de phénomènes de transport, y compris de sédiments*, Deltares, 2022a.

*Deltares : Delft3D-Wave. Simulation de vagues à crête courte avec SWAN, Deltares, 2022b.*

*Gasparini, G., Abbate, M., Bordone, A., Cerrati, G., Galli, C., Lazzoni, E., and Negri, A. : Circulation and biomass distribution during warm season in the Gulf of La Spezia (north-western Mediterranean), Journal of Marine Systems, 78, S48-S62, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.010>, 2009.*

*Marri, P., Meloni, R., Pontrelli, G., et Purini, R. : A numerical model for tidal and wind driven circulation : An application to the Gulf of La Spezia, Computer Modelling in Ocean Engineering, 91, 1991.*

*Sciascia, R., Guizien, K., et Magaldi, M. G. : Larval dispersal simulations and connectivity predictions for Mediterranean gorgonian species : sensitivity to flow representation and biological traits, ICES Journal of Marine Science, 79, 2043-2054, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac135>, 2022.*

*Stelling, G. et Leendertse, J. : Approximation of Convective Processes by Cyclic AOI Methods, Estuarine and Coastal Modeling, pp. 771-782, 1992.*

*Stelling, G. et Rijkswaterstaat, N. : On the Construction of Computational Methods for Shallow Water Flow Problems, Netherlands Rijkswaterstaat Communications, Government Pub. Office, 1984.*

*UNESCO : Background Papers and Supporting Data on the International Equation of State of Seawater 1980, UNESCO technical papers in marine science, UNESCO, 1981.*

*Verboom, G. et Slob, A. : Weakly-reflective boundary conditions for two-dimensional water flow problems, Advances in Water Resources, 7, 192-197, [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(84\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(84)90018-6), 1984.*

*Verboom, G. K. et Segal, A. : Weakly-Reflective Boundary Conditions for Shallow Water Equations, pp. 115-129, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, [https://doi.org/10.1007/978-3-322-89729-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-322-89729-9_9), 1987.*