



Rôle des paramètres atmosphériques et hydrodynamiques dans les submersions récentes du port de Bonifacio

Anne-Eléonore PAQUIER ¹, Benoît ABADIE ¹, Rémi THIEBLEMONT ²,
Julie MUGICA ¹, Klervi HAMON-KERIVEL ³, Louis FERRADOU ⁴

1. BRGM, Direction régionale Corse, Immeuble Agostini, ZI de Furiani, 20600 Bastia, France.
ae.paquier@brgm.fr
2. BRGM, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France.
3. Syndicat mixte Baie de Somme - Grand Littoral Picard, 1 rue de l'Hôtel Dieu, 80100 Abbeville, France.
4. BRGM, DR PACA, 117 Av. de Luminy, BP 168, 13276 Marseille Cedex 9, France.

Résumé :

Le port de Bonifacio se situe au fond d'un goulet rocheux orienté Est-Ouest. Par deux fois, au printemps 2021 et à l'été 2022, par temps calme, des phénomènes de submersion marine ont eu lieu sur le port, créant des dégâts matériels importants. Suite aux expertises de ces événements, la DDT2A et le BRGM ont lancé une étude basée sur de l'instrumentation hydrodynamique pour la caractérisation des niveaux d'eau dans le goulet et améliorer la gestion et la prévention de ces épisodes de submersion marine localisés. Des mesures de pression atmosphérique, de vitesse et de direction du vent (en fond de goulet) ainsi que de niveau d'eau à haute fréquence (en fond et entrée de goulet) sont en cours depuis juillet 2023. L'analyse des premiers résultats montre qu'entre la topographie spécifique des quais du port de Bonifacio (points bas), la variation du niveau d'eau liée à la marée, la morphologie du goulet induisant la génération et la propagation d'ondes longues dans le port et le passage de basses pressions atmosphériques, il existe des variations de niveau d'eau suffisantes pour faire déborder le port lorsque plusieurs paramètres se juxtaposent. L'influence du vent sur un éventuel balancement du plan d'eau dans le goulet et celle des variations saisonnière et interannuelle du niveau marin moyen seront également à étudier dans la suite de l'étude. Les gradients de variation de niveau d'eau générés par les différents processus et leurs concomitances possibles restent à analyser sur une série de données plus longue (en cours d'acquisition).

Keywords:

Risques côtiers, Transfert d'énergie entre ondes, Submersion, Basses pressions atmosphériques.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

1. Introduction

Le port de Bonifacio, au sud de la Corse, a connu deux événements de submersion en 13 mois entre mai 2021 et juin 2022. Ils ont été reliés à un météo-tsunami (onde générée par un événement atmosphérique) dans l'étude récente de VURILJ et al. (2023). Lors du premier événement, le 24 mai 2021, le niveau de l'eau est monté jusqu'à 30 cm au-dessus des quais, inondant de nombreux bâtiments voisins (MUGICA *et al.*, 2021). Lors du deuxième événement, le 28 juin 2022, des témoins ont observé une oscillation du niveau d'eau d'une hauteur non rapportée et d'une période d'environ deux minutes pendant plusieurs heures avant le débordement du port (PAQUIER & HAMON-KERIVEL, 2022). Il existe peu de relevés d'inondations sur le port de Bonifacio. Un article de presse du Petit Bastiais fait état d'une inondation à Bonifacio le 1er septembre 1890, lors d'une « tempête de vent » durant laquelle le niveau de la mer est monté de près de 4 m et a inondé le port avant de se retirer, laissant une partie du port à sec (LE PETIT BASTIAIS, 1890). Contrairement à l'inondation du port de 1890, les inondations de 2021 et 2022 à Bonifacio se sont produites par temps relativement calme.

La présente étude vise à identifier et comprendre les paramètres pouvant provoquer une élévation du niveau d'eau dans le port de Bonifacio. Le signalement d'oscillations de la surface de l'eau ont conduit à émettre l'hypothèse que les inondations de 2021 et 2022 pourraient être dues à des ondes longues se propageant dans le goulet. Le rôle des variations de la pression atmosphérique a également été étudié

2. Matériel et méthodes

2.1 Site d'étude

Le port de Bonifacio est situé au sud de la Corse au fond d'un goulet de 33 000 m² orienté est-ouest, mesurant 1 500 m en longueur et 150 m en largeur (Figure 1). L'ouverture sur la mer située au sud-sud-ouest (SSO) du goulet mesure 260 m de large. Les vents dominants à Bonifacio sont d'ouest et nord-ouest avec une vitesse moyenne d'environ 7m/s (source: Windfinder.com). Dans le goulet, à environ 380 m au nord-nord-ouest de l'entrée, la profondeur est moins importante (zone à environ -13m NGF) tandis que le reste du goulet atteint une profondeur d'environ 20 m. Le port de commerce est situé au milieu du goulet et le port de plaisance au fond du goulet (largeur de 130 m ; profondeur d'environ 5 m).



Figure 1. Localisation du port de Bonifacio et des capteurs.

2.2 Instrumentation et échantillonnages

Les mesures atmosphériques et hydrodynamiques ont commencé début juillet 2023 et vont être réalisées durant 14 mois. Les conditions atmosphériques dans le goulet ont été mesurées à l'aide d'une station météorologique Davis Vantage Pro2 équipée d'une console WeatherLink. La station météo a été installée sur le toit de la capitainerie du port de Bonifacio à $4,06 \pm 0,01$ m (au-dessus du RAC09) ; le baromètre était situé dans le bureau à $1,62 \pm 0,01$ m (au-dessus de RAC09). La pression atmosphérique ainsi que la vitesse et la direction du vent sont mesurées toutes les 60 s, permettant une résolution temporelle plus fine et plus localisée que les données Météo France. Les données sont transmises à un serveur en temps réel.

Deux capteurs de pression Virtuoso RBR échantillonnant à 2 Hz ont été déployés en entrée et fond de goulet. La localisation et la hauteur des capteurs ont été mesurées à l'aide d'un DGPS Trimble connecté au réseau de correction en temps réel Actisat. Le CP1 a été fixé sur une barre inox sur falaise surplombant l'eau à $-0,463$ m au-dessous du RAC09 (Référence Altimétrique Corse 09). Le CP2 a été fixé au quai en fond de goulet à une profondeur de $-1,179$ m au-dessus du RAC09.

Des mesures altimétriques du quai sud ont été réalisées au DGPS pour comprendre comment les submersions se propagent en fonction des différents niveaux d'eau atteint.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

2.3 Traitement des données

Pour prendre en compte une éventuelle dérive des capteurs de pression de la colonne d'eau, des mesures de calibration ont été réalisées avant et après chaque immersion (mesures de 3 niveaux d'eau dans un seau à des heures précises). Cependant, ces données n'ont pas encore été traitées mais permettront dans le futur de corriger les niveaux d'eau décrits ici.

Les données de pression de la colonne d'eau ont d'abord été corrigées de la pression atmosphérique. Les séries temporelles ont ensuite été traitées par analyse spectrale pour identifier les différentes composantes des fluctuations de la surface libre : SW pour la houle, WW pour la mer du vent, IGL et IGC pour les ondes infragravitaires (séparés en deux par rapport aux pics observés en fonction des spectres mesurés ; IGC et IGL pour infragravitaires courtes et longues) et VLF pour les ondes de plus basse fréquence généralement liées aux oscillations propres des bassins (LOCALETTI *et al.*, 2017, PAQUIER *et al.*, 2018). Les VLF ont été intégrées sur l'ensemble de fréquences $[6,33 \cdot 10^{-4} ; 6 \cdot 10^{-3}]$ Hz sur des bursts de 2h. Les autres ondes ont été intégrées sur des bursts de 20 min ; les IGL sur l'ensemble $[6 \cdot 10^{-3} ; 9,61 \cdot 10^{-3}]$ Hz, les IGC sur l'ensemble $[9,61 \cdot 10^{-3} ; 4,3 \cdot 10^{-2}]$ Hz, les SW sur l'ensemble $[4,3 \cdot 10^{-2} ; 1,5 \cdot 10^{-1}]$ Hz et les WW sur l'ensemble $[1,5 \cdot 10^{-1} ; 10 \cdot 10^{-1}]$ Hz. Les hauteurs significatives associées sont calculées sur chacun de ces ensembles. Les périodes des ondes ont également été extraites de ces analyses spectrales (fréquences de pic, T_p).

3. Résultats et discussion

3.1 Hauteurs du quai sud

Les mesures altimétriques réalisées sur le quai sud montrent des différentiels importants entre le rebord du quai en partie ouest (1,1 m), le rebord du quai en partie centrale (station d'avitaillement, point le plus bas à 0,7 m) et la rue située en arrière des quais (entre 0,4 et 0,8m). A l'ouest de la station d'avitaillement, la rue est toutefois surélevée ce qui protège relativement la partie ouest de la rue en cas d'inondation par la station d'avitaillement, (Figure 2). Il existe donc trois seuils de niveaux d'eau qui pourraient potentiellement générer des inondations du quai sud : un seuil compris entre 0,6 et 0,8m qui pourrait conduire à des inondations de la rue si les clapets anti-retours des pluviaux ne sont pas fermés ; un seuil compris entre 0,7 et 0,8m qui permettront le débordement par la station d'avitaillement et la partie Est de la rue ; enfin, un seuil de 1,1 m qui générera une submersion comme celles observées en mai 2020 et juin 2021.

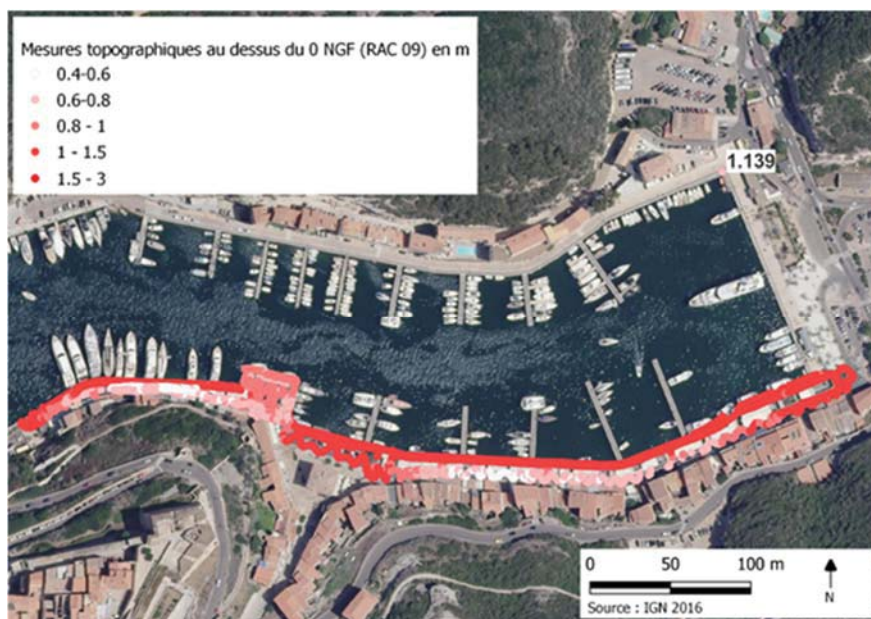


Figure 2. Points altimétriques mesurés sur le quai sud.

3.2 Evolution des hauteurs d'onde depuis le large vers le fond de goulet

La figure 3 présente les Hs pour chacune des ondes considérées en CP1 et CP2 sur la semaine exemple du 21/07 au 28/07 ainsi que HS_{sw+ww} au large (bouée CANDHIS de Bonifacio, CEREMA DIRM-Med.). La houle au large ne dépasse pas 1 m jusqu'au 25/07, et connaît un pic à 5 m le 25/07 et décroît jusqu'au 27/07. La comparaison des hauteurs de SW depuis le large (bouée Candhis) vers le CP1 et le CP2 montre une décroissance importante depuis le large jusqu'en CP1 et une absence d'énergie en CP2. Pourtant, une certaine énergie se propage entre le CP1 et le CP2. Pour en faire l'analyse, nous dissocions 3 périodes A, B, C marquées par 3 rectangles sur la figure 3. Durant la période A, HS_{sw} au large atteint environ 1 m. En entrée de goulet, on observe seulement des ondes courtes de faible hauteur ($HS_{sw} \max=0.2m$, $HS_{ww} \max=0.25m$) ; en fond de port, on note pourtant la présence de VLF atteignant $HS_{VLF}=0.55$ m. Durant la période B, HS_{sw} au large est inférieur à 1 m. En entrée de goulet, on observe seulement des $HS_{ww} < 0.3m$; en fond de port, on note pourtant la présence de VLF ($HS_{ww}=0.9m$, $HS_{IGL2} = 0.15m$, $HS_{IGC} = 0.16m$). Durant la période C, HS_{sw} au large atteint 5m. En entrée de goulet, on observe des $HS_{sw}=1m$ et $HS_{ww}=0.6m$; en fond de port, aucune VLF ne se développe et les IG sont faibles. Ces données montrent qu'il peut donc y avoir un transfert d'énergie entre ondes mais que les SW et WW importantes ne vont pas forcément générer des VLF et IG. A priori, les ondes longues en fond de goulet seront plutôt générées par des ondes courtes de faibles hauteurs en entrée de goulet. Celle-ci ne seraient que peu atténuées le long du goulet d'une profondeur de 20 m ; selon notre hypothèse, elles se propageraient vers le fond du goulet, seraient réfléchies par les structures verticales en fond de port et se

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

recomposeraient pour générer une seiche, comme cela a pu être observé dans de nombreux ports.

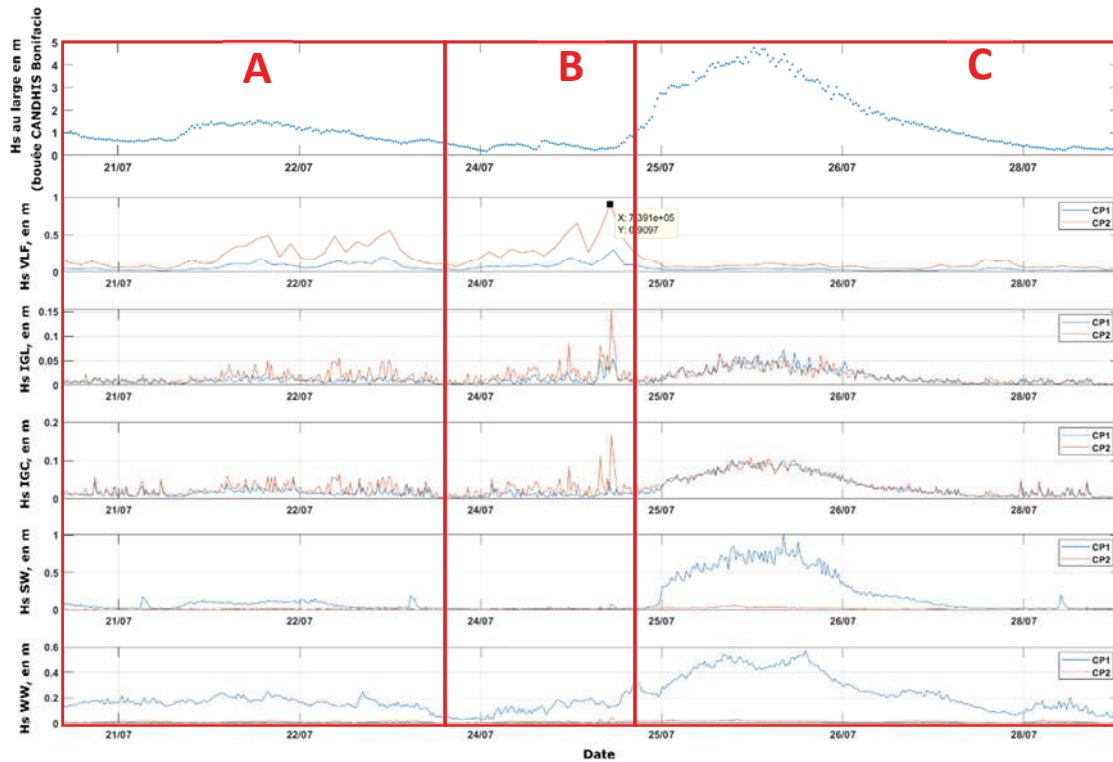


Figure 3. Hs des différentes ondes lors d'une période d'une semaine en juillet 2023 (21 au 28/07/23).

3.3 Influence de la pression atmosphérique sur les niveaux d'eau en fond de goulet

L'influence de la pression atmosphérique sur le niveau dans le port de Bonifacio peut-être importante : sur la période de mesure actuelle, entre juillet 2023 et février 2024, elle a varié entre 991.4 hPa et 1038 hPa. Cela représente une variation possible de 0.465 m du niveau d'eau. Le 20/10/2023, la rue en arrière du port (section ouest à minima d'après les témoignages recueillis) a été inondée sans que le bord du quai ne soit dépassé (Figure 4, $H_{\max}=0.93\text{m}$ à 10 h33 UTC). Cet événement de haut niveau d'eau a été observé le même jour à Saint-Florent (2B) et sur plusieurs sites de la côte de la région PACA entre Marseille et Saint-Tropez par deux auteurs du présent papier, donc potentiellement fiable à un phénomène de basse pression à l'échelle des bassins thyrien et liguro-provençal et un potentiel météotsunami (VURILJ *et al.*, 2023). De plus, ce phénomène a eu lieu en octobre, qui correspond à la période où le cycle saisonnier du niveau marin moyen en méditerranée atteint un anomalie maximale de près de 10 cm (SANNINO *et al.*, 2022). Les données de niveau d'eau et de pression atmosphérique observées dans le port de Bonifacio (Figure 4) indiquent qu'une basse pression passait alors au dessus du port (Min=994 hPa de 07h38 à 08h06 et 995 hPa durant l'inondation de la rue). La marée

était montante avec 0.55m de hauteur d'eau à 10h35-10h40 UTC (Marée basse : 05h43 UTC, 0.43 m ; marée haute : 12h19 UTC, 0.64 m ; <https://maree.shom.fr/harbor/BONIFACIO/hlt/0?date=2023-10-20&utc=standard>). Les hauteurs d'onde mesurées simultanément à CP2 montre que $H_{sVLF}=0.68m$. Vu le niveau d'eau maximum mesuré, cette inondation semble s'être propagée par le réseau pluvial. En effet, la rue située juste au sud du quai Sud a une hauteur inférieure à celle du quai (0.5 à 0.8m NGF contre 1.1 m NGF pour le quai, Figure 2) et a pourtant été inondée par un niveau d'eau de 0.92 m NGF : l'eau est donc passée par le réseau pluvial pour l'inonder. L'accumulation d'une basse pression atmosphérique, d'une marée montante et d'une VLF d'ampleur moyenne pour le port de Bonifacio n'ont pas permis le débordement complet du port. Cependant, il manquait seulement une vingtaine de centimètres pour atteindre le bord du quai. Or, durant la période de suivi (7 mois pour l'instant), nous avons observé des ondes longues (marée, VLF et IG) d'une hauteur plus importante et des basses pressions plus extrêmes. Des événements de submersion plus importants peuvent donc se produire comme cela a été le cas en 2021 et 2022.

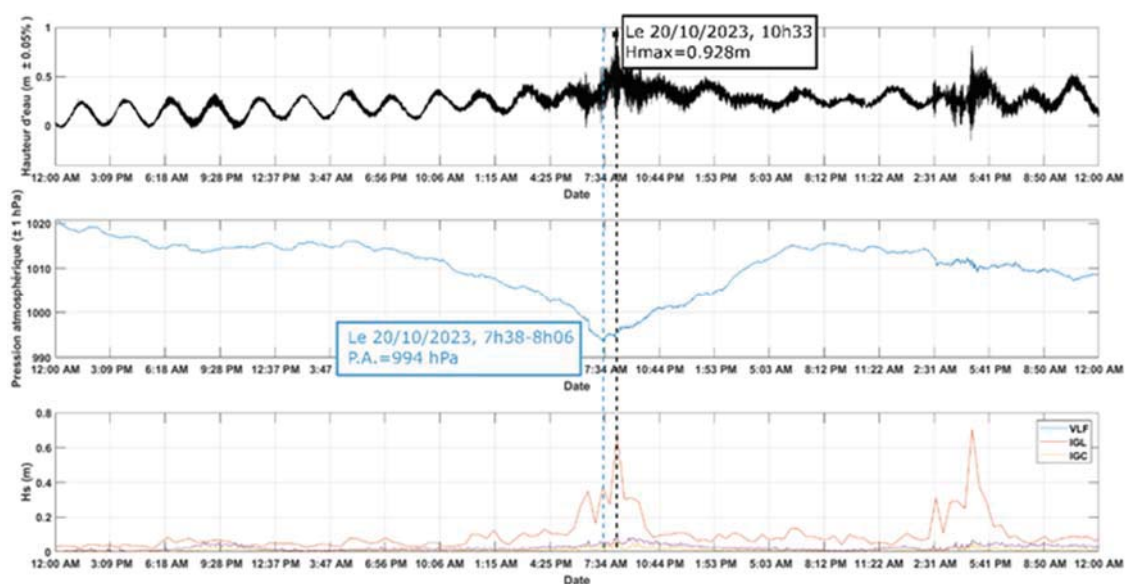


Figure 4. Hauteur d'eau, pression atmosphérique et H_s des ondes longues dans le port de Bonifacio durant le présumé météo-tsunami du 20/10/2023.

4. Conclusions

Les quais du port de Bonifacio ont une topographie qui les expose à des risques de submersion marine. La morphologie du goulet induisant la génération et la propagation d'ondes longues dans le port et le passage de basses pressions atmosphériques sont deux facteurs évidents des submersions passées. La concomitance marée, basse pression atmosphérique et passage d'ondes longues participe à déterminer les événements de submersions du port de Bonifacio. L'influence du vent sur un éventuel balancement du

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

plan d'eau dans le goulet (PAUGAM *et al.*, 2021) et les variations saisonnières et interannuelles du niveau marin moyen seront également à analyser et intégrer dans la suite de l'étude. En effet, les observations satellitaires montrent des variations du niveau de la surface de l'eau allant de -7 cm en mars à + 7 cm en octobre dans l'ouest de la Méditerranée, ainsi que des variations interannuelles et une élévation à plus long terme du niveau marin induite par le changement climatique (SANNINO *et al.*, 2022). Il reste encore de nombreuses analyses à mener sur la transformation des ondes dans le goulet, sur la quantification des intervalles de variations de niveau d'eau dûes aux différents paramètres sur un plus long jeu de données ainsi que sur leurs concomitances.

5. Références

- LE PETIT BASTIAIS. (1890). *La tempête à Bonifacio*, 01 septembre 1890, p. 01, Accessible sur gallica.bnf.fr.
- LOCATELLI F., SOUS D., REY V., CHEVALIER C., BOUCHETTE F., TOUBOUL J., DEVENON J.L. (2017). *Wave transformation over the Ouano reef barrier, New Caledonia*. Coastal Dynamics 2017, Jun 2017, Helsingor, Denmark. Proceedings of Coastal Dynamics 2017.
- MUGICA J., BALLOUIN Y., HAMON-KERIVEL K. (2021). *Avis technique sur le phénomène de submersion marine dans le port de Bonifacio (Corse-du-Sud) le 24 mai 2021*. BRGM.
- PAQUIER A.-E., MEULE S, SOUS D., OUDARD T., LARROUDE P., ROUANET E., GOUJARD A., LE DIREACH L. (2018). *Comprendre le rôle des récifs barrière à Posidonia oceanica dans l'atténuation de l'hydrodynamique : Programme CANOPé* (pp 119-126), doi:10.5150/jngcgc.2018.014
- PAQUIER A.-E., HAMON-KERIVEL. K. (2022). *Avis technique sur le phénomène de submersion marine du port de Bonifacio (Corse-du-sud) le 28 juin 2022*. BRGM.
- PAUGAM C., SOUS D., REY V., MEULÉ S., FAURE V., BOUTRON O., LUNA-LAURENT E., MIGNE E. (2021). *Wind tides and surface friction coefficient in semi-enclosed shallow lagoons*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Volume 257. 107406, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107406>
- SANNINO G., CARILLO A., IACONO R., NAPOLITANO E., PALMA M., PISACANE G., STRUGLIA M.V. (2022) *Modelling present and future climate in the Mediterranean Sea: a focus on sea-level change*. Clim Dyn **59**, 357–391. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06132-w>
- VURILJ M.P., BRNAS T., RUIĆ K., ŠEPIĆ J., BALIĆ M. (2023). *Mediterranean meteotsunamis of May 2021 and June 2022: Observations, data analysis and synoptic background*, Geofizika, Vol 40 (2), <https://doi.org/10.15233/gfz.2023.40.8>