



Interreg



UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



GIREPAM



AREA MARINA PROTETTA
TAVOLARA
PUNTA CODA CAVALLO



MINISTERO DELL'AMBIENTE
RISORSE ENERGETICHE

**CONVENTION POUR L'ÉTUDE MÉTÉOROMARINE ET
L'ANALYSE DES DONNÉES BATHYMÉTRIQUES AFIN
D'ÉVALUER LA TENDANCE DES COURANTS DE SURFACE
PAR RAPPORT AUX PRINCIPAUX RÉGIMES DE VENT ET
DE MOUVEMENT DES VAGUES SUR LES PLAGES DE CALA
BRANDINCHI ET DE PORTO TAVERNA DANS L'A.M.P. DE
TAVOLARA PUNTA CODA CAVALLO.**

Rep. N. 18 du 24/10/2019

RAPPORT TECHNIQUE

Andrea Cucco, Simone Simeone, Angelo Perilli, Giovanni Quattrocchi, Walter
Brambilla, Monica Pinna, Fabio Antognarelli, Filippo Angotzi*

IAS-Istituto per lo Studio degli Impatti Antropici e Sostenibilità in ambiente marino – Sezione di
Oristano. Torregrande, Loc. Sa Mardini, 09170

*Contacts: andrea.cucco@cnr.it



La cooperazione al cuore del Mediterraneo

La coopération au coeur de la Méditerranée

Introduction

Dans le bassin méditerranéen, le long des étendues de la mer côtière jusqu'à une profondeur maximale de 40 mètres se trouvent les prairies de *Posidonia oceanica*, une phanérogame marine endémique à cette mer.

Les prairies représentent une biocénose très complexe et bien structurée, caractérisée par une grande variabilité biologique des communautés végétales et animales qu'elles abritent.

La *P. oceanica* est une espèce végétale pluriannuelle dont le cycle de maturation de l'appareil foliaire est caractérisé par une croissance continue, un détachement pendant la période automnale et une repousse pendant la période hivernale.

Ce processus de croissance et de détachement du système foliaire conduit souvent à des accumulations le long des côtes près ou devant les prairies de *P. oceanica*. En particulier, comme les feuilles ont une flottabilité négative, l'accumulation sur le rivage se produit en raison du mouvement des vagues et des courants qu'elles génèrent.

En particulier, près des plages et des côtes rocheuses, surtout après des tempêtes intenses, il est courant de voir des accumulations verticales de feuilles mortes de *P. oceanica* le long du rivage, appelées Banquette.

Ces accumulations persistent souvent *in situ* pendant la période hivernale et, dans certains cas, tout au long de l'année, créant, dans certains contextes, l'émergence de conflits pour la baignade et/ou l'utilisation récréative des côtes sableuses.

D'un point de vue morphologique, en effet, la présence de la Banquette constitue une protection de la côte contre les processus d'érosion et leur élimination est fortement déconseillée, voire totalement interdite.

Une alternative de gestion est offerte par l'enlèvement temporaire des banquettes qui, pendant les mois d'été, peuvent être déplacées vers les zones situées derrière la plage, puis stockées près du littoral pendant les mois d'automne. Cette procédure implique le choix du site de repositionnement en fonction des besoins logistiques et des exigences morphologiques et océanographiques.

Cette étude vise à identifier pour deux plages, Porto Taverna et Cala Brandinchi (voir figure 1), situées dans la zone marine protégée de Tavolara Punta Coda Cavallo, les zones les plus appropriées pour le repositionnement en automne le

long du littoral des accumulations de feuilles de *P. oceanica*. Dans le cas présent, l'objectif est d'étudier, pour les deux sites, quels sont les zones de côte les plus adaptés au transport off-shore par les vagues et les courants des feuilles de *P. oceanica* qui y sont relâchées.

À cette fin, une approche numérique basée sur l'utilisation de modèles hydrodynamiques, ondamétriques et de transport a été suivie pour simuler les principaux processus physiques qui contribuent à la dispersion des feuilles de *P. oceanica* une fois immergées près du littoral. En outre, en préparation de l'analyse du modèle, une série de mesures bathymétriques a été effectuée près des côtes d'intérêt et le climat météo-marin qui caractérise les deux zones examinées a été analysé.

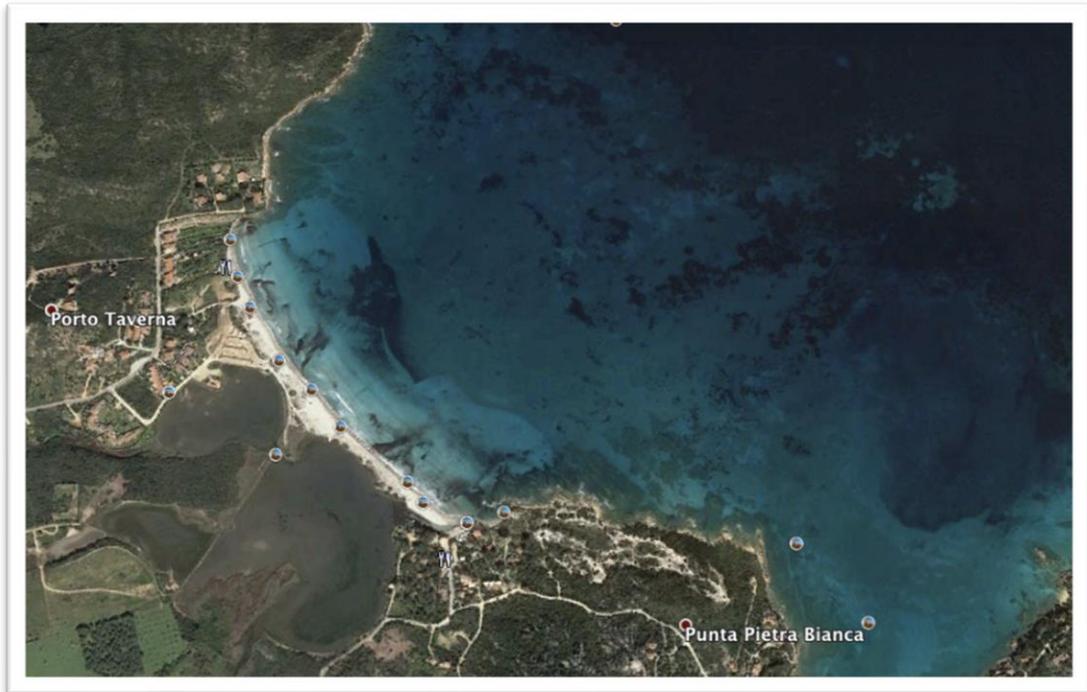


FIGURE 1 : la classification géographique des zones étudiées : Porto Taverna (panneau supérieur) et Cala Brandinchi (panneau inférieur)

1. LES DONNÉES BATHYMÉTRIQUES

La collecte d'informations géométriques et bathymétriques précises des zones étudiées était nécessaire pour la mise en œuvre et l'application d'un modèle

numérique de circulation et de transport utile pour simuler les processus de dispersion des feuilles de *P. oceanica* le long des côtes sableuses. En particulier, afin de réaliser les grilles de calcul numérique pour les 2 plages examinées, il est nécessaire de disposer à la fois de bathymétries de détail des zones côtières et de pentes des profils du rivage.

En ce qui concerne les données bathymétriques, les données des relevés historiques effectués pour le compte de l'A.M.P. Tavolara Punta Coda Cavallo (AMP-TPCC) et des cartes des zones de relevés disponibles aux échelles géographiques suivantes ont été identifiées et collectées :

- Carte IGM 043 à l'échelle 1:100000
- Carte IIM 322 à l'échelle 1:25000
- Carte IIM 318 à l'échelle 1:10000

Les données fournies par l'AMP-TPCC ont été unifiées par des méthodes d'interpolation pour obtenir un premier modèle numérique du fond marin (DTM) caractérisé par l'utilisation de données antérieures, comme le montre la figure 2.

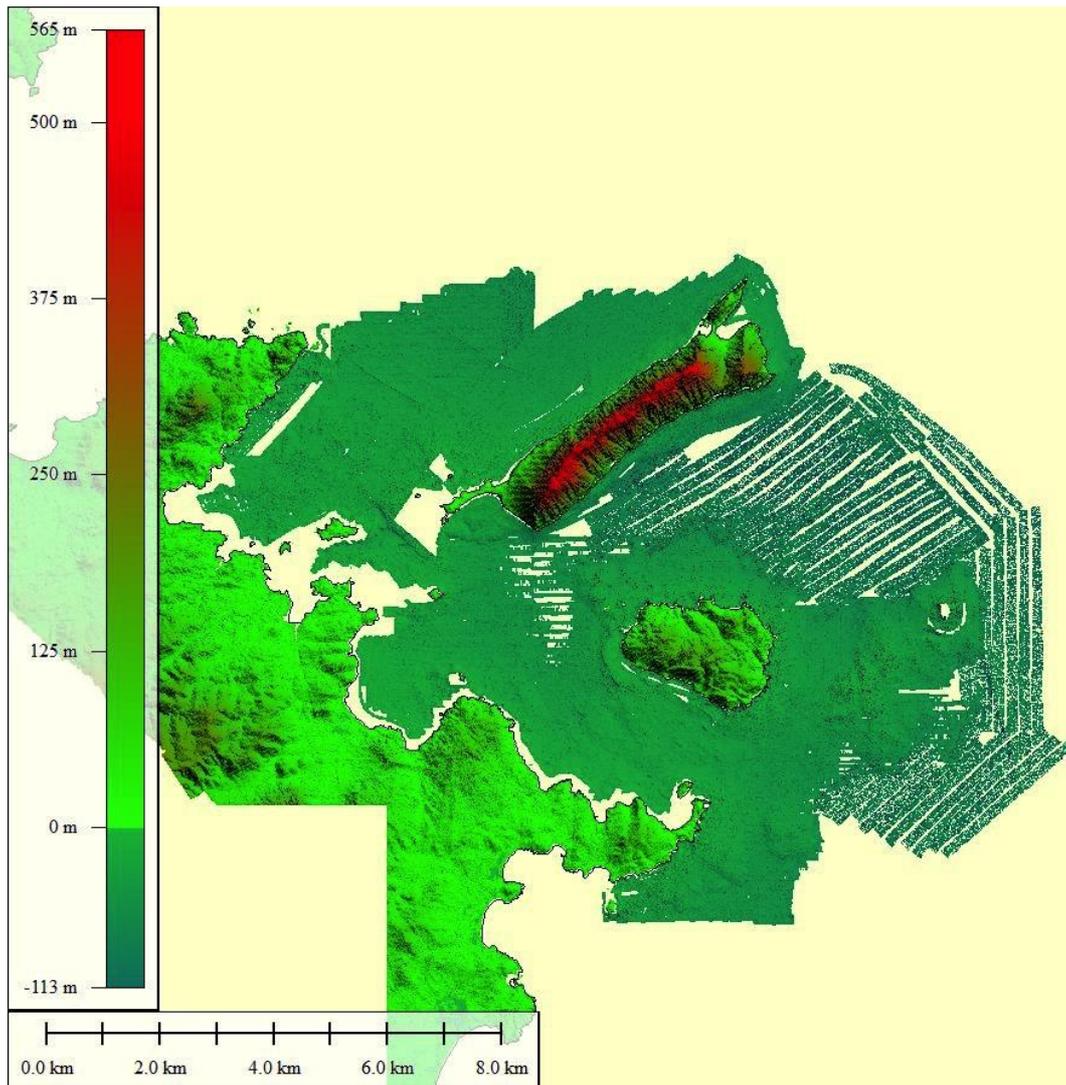


FIGURE 2 : les données bathymétriques (DTM) fournies par l'AMP-TPCC

Par la suite, les données cartographiques ont été numérisées et combinées, par des procédures d'unification et d'interpolation, avec les données bathymétriques fournies par l'AMP-TPCC (voir figure 2), obtenant ainsi une bathymétrie incluant à la fois la zone côtière d'intérêt et toute l'étendue de haute mer devant le golfe d'Olbia (voir figure 3).

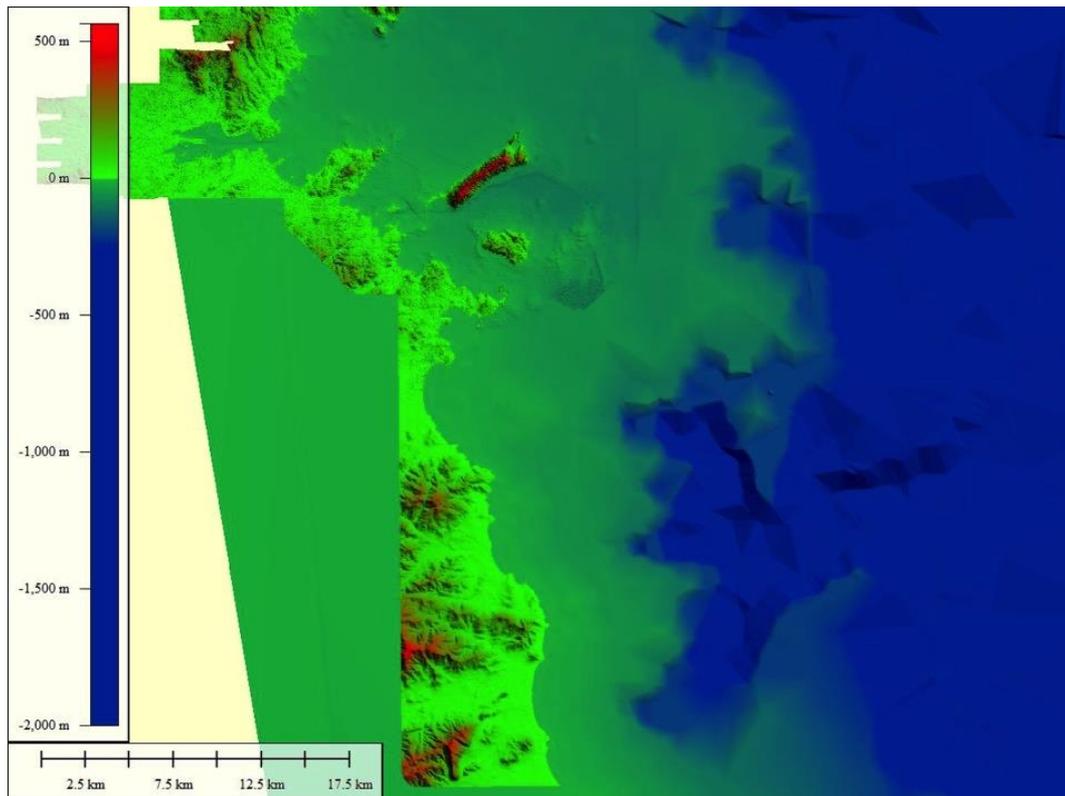


FIGURE 3 : la reproduction des données bathymétriques pour la zone d'intérêt intégrées aux informations détaillées fournies par l'AMP-TPCC

Ces données ont ensuite été combinées avec un ensemble de données bathymétriques à l'échelle du bassin méditerranéen caractérisé par une résolution spatiale de l'ordre de quelques km et disponible en ligne à l'adresse <https://www.gebco.net>.

Enfin, dans le but d'avoir une information détaillée de la zone côtière de la plage de Porto Taverna, l'AMP-TPCC a fourni un DTM de la zone de plage submergée obtenu à partir des données bathymétriques collectées lors des campagnes précédentes (projet RESMAR) en utilisant un MBES et une série de profils de plage équidistants. Les données disponibles ont été traitées par Global Mapper afin d'obtenir un DTM unique sur lequel mettre en œuvre la grille numérique du modèle de calcul. Le résultat final des procédures d'unification et d'interpolation est présenté dans la figure 4.

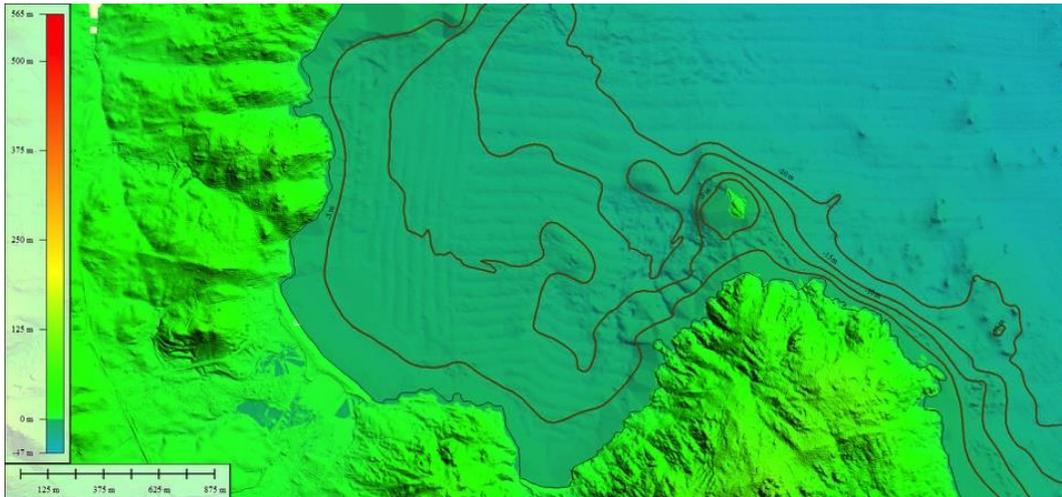


FIGURE 4 : le détail des données bathymétriques pour la zone de Porto Taverna

Pour le calcul du *run-up* de la plage de Porto Taverna, on a utilisé les profils de la plage émergée acquis précédemment par l'AMP-TPCC. En particulier, la pente moyenne des profils de plage depuis la berme jusqu'à la profondeur d'environ 0,4 m a été calculée, obtenant une valeur égale à 0,07.

Dans la région de Cala Brandinchi, pour laquelle les données cartographiques et les données des relevés mises à disposition par l'AMPT n'étaient pas suffisantes pour obtenir un ensemble de données précises, un nouveau relevé bathymétrique et une mesure de la morphologie des profils de plage ont été effectués pour calculer le *run-up*.

La mesure de la profondeur a été effectuée à l'aide d'un ultrason à double fréquence (210 kHz et 28 kHz) à faisceau unique avec une précision de mesure de la profondeur d'environ 10 centimètres. L'échographe se compose d'un transducteur à double fréquence qui agit comme émetteur et récepteur du signal acoustique, d'une unité d'acquisition qui contient l'hardware de fonctionnement et d'un PC interfacé avec l'unité d'acquisition. Le système permet de traiter et de sauvegarder immédiatement les données acquises, soit en format graphique (images jpg) soit en format texte (file ascii). Ces dossiers contiennent toutes les informations relatives à l'acquisition. Le transducteur de l'échographe a été plongé à l'arrière du bateau, pendant les relevés, selon le cas, entre 30 et 35 cm. La valeur de l'immersion du transducteur, qui était constante lors de chaque relevé, a été ajoutée à la valeur de la profondeur mesurée lors de chaque relevé.

La fréquence d'émission et de réception des données par l'échographe a été programmée à 1 Hz, pour obtenir une donnée par seconde. L'utilisation et le déplacement de certains poids à bord ont permis d'équilibrer le bateau lors de chaque visite.

En ce qui concerne le positionnement sur le plan horizontal et sur l'altitude, afin de réduire l'incertitude au minimum, un GPS différentiel a été utilisé pour corriger les données acquises et avoir une incertitude sur le positionnement horizontal inférieure à 10 cm.

Le réseau géodésique de référence utilisé pour la correction d'altitude était celui fourni par l'AMPT et le point utilisé pour cette correction était le point Picchetto N°12 situé à Cala Brandinchi.

Les relevés ont eu lieu le 17 et le 18 juillet 2019, selon les itinéraires tracés dans la figure 5. Compte tenu de la période à laquelle le relevé a été effectué, en raison de la présence de baigneurs et de bateaux, il n'a pas été possible de suivre toutes les traces prévues. Toutefois, le nombre des relevés a été suffisant pour l'étude.

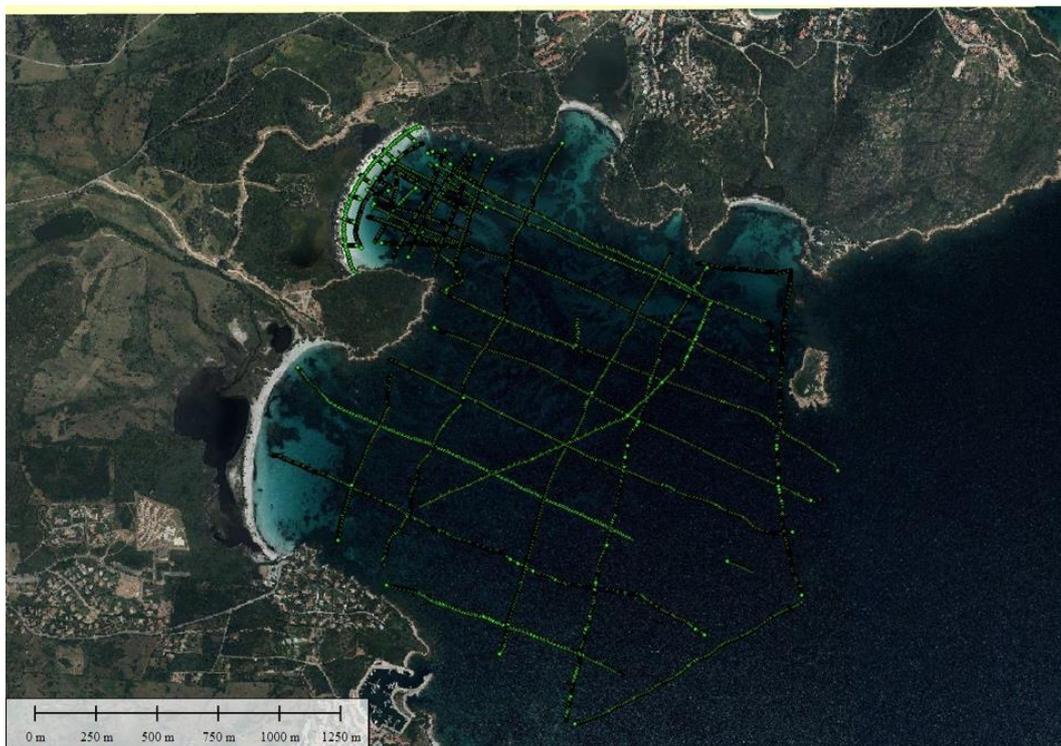


FIGURE 5 : les traces d'acquisition bathymétrique pour la zone de Cala Brandinchi

Ci-dessous, dans la figure 6, quelques exemples de sections réalisées avec l'*echosounder* 210 kHz.

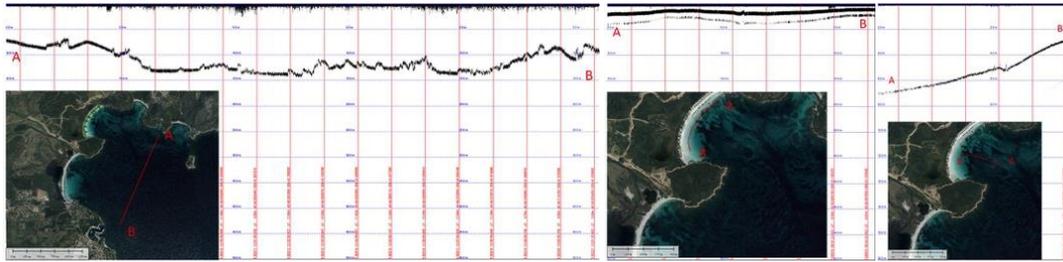


FIGURE 6 : des exemples de tracés bathymétriques réalisés à Cala Brandinchi

En combinant les relevés *in situ* et les données déjà disponibles, il a été possible d'obtenir un DTM précis à la fois pour la face extérieure et pour la zone proche du littoral de la plage en question.

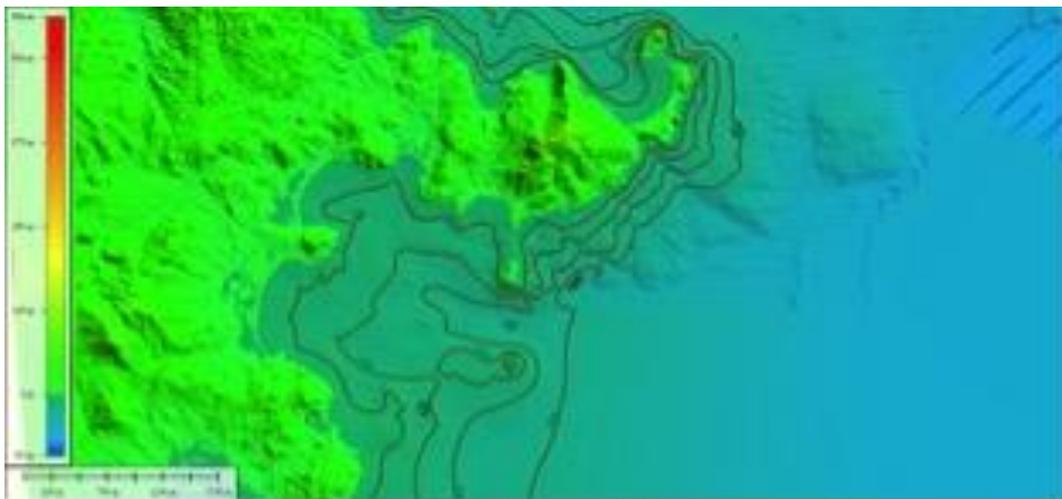


FIGURE 7: le détail bathymétrique de la zone de Cala Brandinchi obtenu par l'intégration des données acquises et déjà présentes dans l'AMPT

Pour la même zone, les profils des plages ont été calculés à l'aide d'un GPS différentiel Navcom starfire 3040. L'exécution des profils avait pour seul but d'obtenir la pente moyenne de la plage pour le calcul du *run-up* des vagues. La figure 8 montre les trajectoires le long desquelles les profils du littoral ont été calculés.



FIGURE 8: les traces d'acquisition des profils pour le calcul du run-up à Cala Brandinchi

Par l'acquisition ponctuelle de la hauteur et de la position de chaque tracé, les 7 profils ont été calculés comme le montre la figure 9.

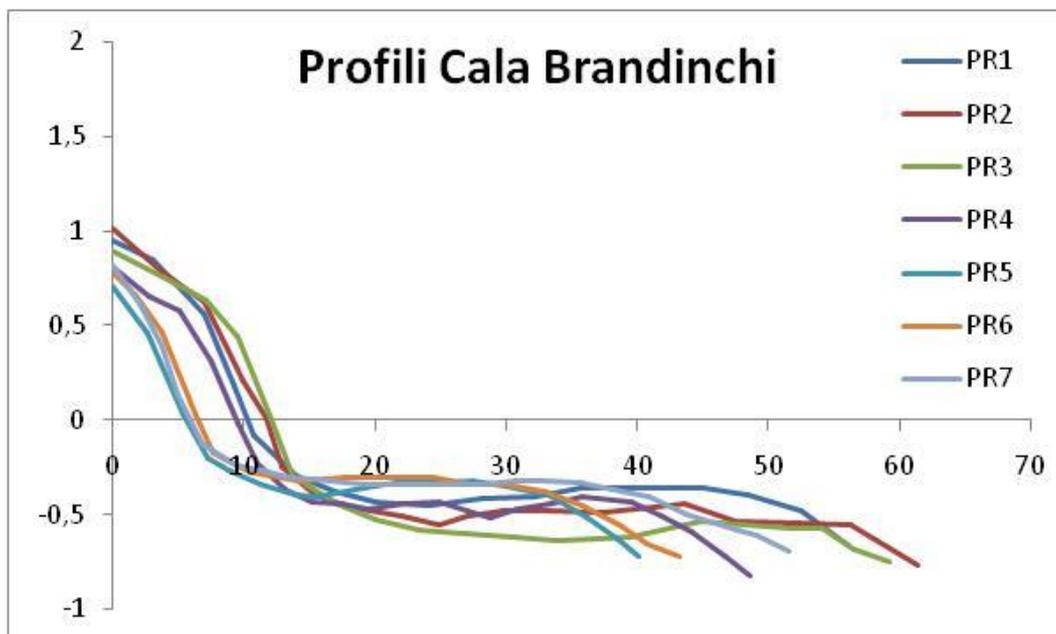


FIGURE 9: l'évolution des profils altimétriques pour le calcul du run-up de Cala Brandinchi

Pour calculer le *run-up*, on a déduit la pente moyenne des profils de plage depuis les bermas jusqu'à une profondeur d'environ 0,4 m. La pente moyenne de la plage de Cala Brandinchi était d'environ 0,07. Pour le calcul du *run-up*, on a utilisé une formule de Stockdon simplifiée (Stockdon 2006).

2. L'ANALYSE DES DONNÉES SUR LA MÉTEOMARINE

Afin d'analyser les caractéristiques du mouvement des vagues dans les 2 zones examinées, l'ensemble de données sur les vagues publié par la plateforme COPERNICUS (<http://marine.copernicus.eu>) a été pris en compte. En particulier, les données relatives aux paramètres principaux des vagues pour le point dont les coordonnées sont 40.843462° E et 9.809011° N ont été extraites. Ce point est représentatif des 2 zones d'intérêt car il se trouve en face et dans une étendue de mer exposée aux régimes principaux de vent affectant la zone. L'ensemble de données utilisées provient d'un *backtesting* du *Mediterranean Waves Forecasting System* qui comprend 12 années de données, de Février 2006 à Décembre 2017. L'ensemble de données comprend les paramètres principaux des vagues, c'est-à-dire la hauteur significative (SWH), la période moyenne, la période de pointe et la direction moyenne (DIR) sur une base horaire et à une résolution spatiale de $1/24^\circ$ degré (environ 4,6 km). Les données dérivent d'un système de prévision basé sur le modèle de vagues WAM Cycle 4.5.4 qui, mis en œuvre en mer Méditerranée et étendant sa grille de calcul au-delà du détroit de Gibraltar, est développé comme une séquence greffée d'une grille de calcul moins résolue ($1/6^\circ$) couvrant le domaine de l'océan Atlantique. Le spectre des ondes est résolu avec 24 cases directionnelles et 32 cases de fréquence.

La figure 10 montre les tendances temporelles du SWH pour l'ensemble de la période considérée. Comme le montre la variation d'intensité, la saisonnalité est le principal mode de modulation du climat des vagues dans la zone examinée, avec des pics en automne et en hiver et des valeurs faibles et moyennes au printemps et en été.

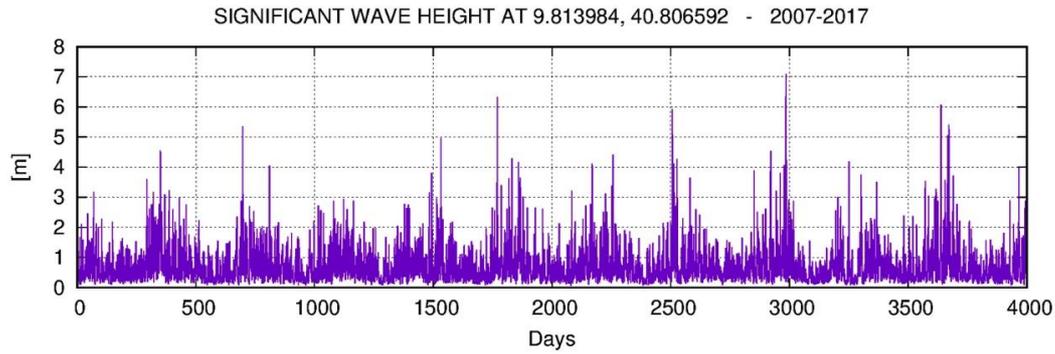


FIGURE 10: la tendenza temporale de la SWH proche de la zone d'intérêt exprimée en m et sur une base horaire pour tout l'intervalle de 10 ans considéré entre 2007 et 2017

La figure 11 montre les mêmes données temporelles de SWH liées à la direction d'origine en mode *scatter plot*. Ce graphique permet d'identifier les *fetch* principaux de vagues dans la zone d'intérêt qui, qualitativement, correspondent aux secteurs N-NE et SE.

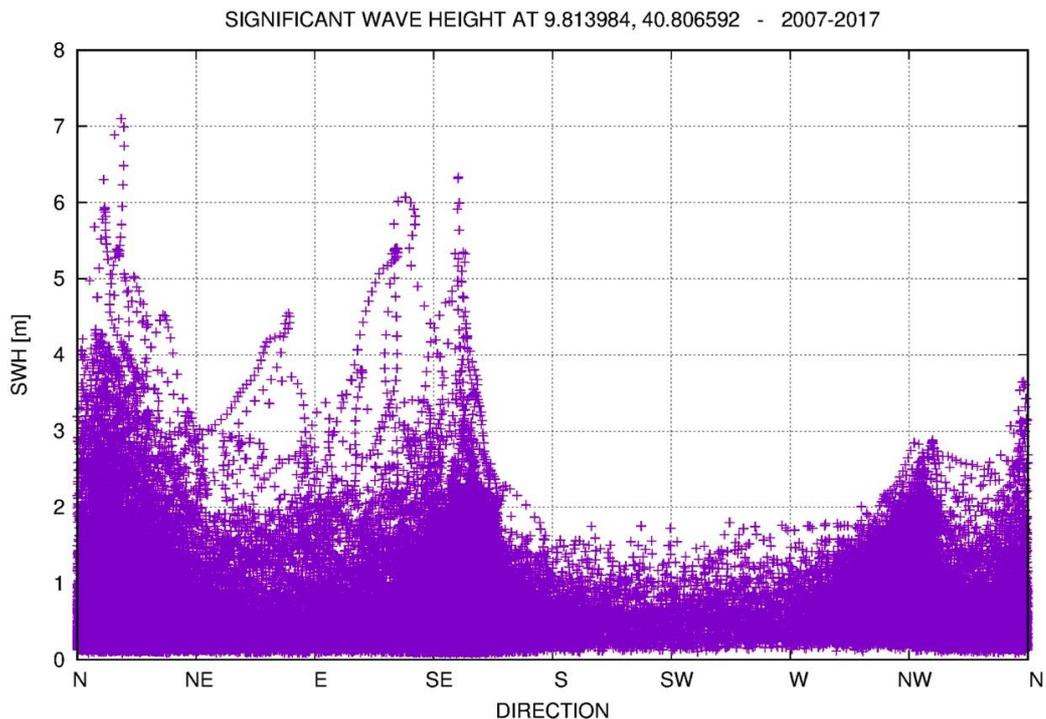


FIGURE 11: le scatter plot entre la SWH et la direction d'origine du mouvement des ondes pour tout le dataset météorologique considéré

La figure 12 montre les analyses des distributions statistiques obtenues sur une base saisonnière pour l'entier dataset. Les 4 graphiques polaires montrent, pour

chaque saison, la distribution de fréquences de 6 classes d'intensité de SWH, comprises entre 0 et plus de 6 m, et pour chaque intervalle de direction équidistante de 15°.

Comme on peut le voir, les intensités maximales sont enregistrées pendant les mois d'hiver et d'automne pour les quadrants NW, NE et SE. En particulier, dans le quadrant nord-ouest, bien que ces événements se produisent dans le point de haute mer considéré, ils ne sont pas intéressants dans la zone strictement côtière car les 2 plages considérées sont protégées de la côte pour de telles éventualités. En été et au printemps, les événements sont réduits en intensité et en fréquence et se concentrent sur le quadrant SE.

De cette enquête qualitative se dégage la prédominance des *fetch* de Grec et de Sirocco dans la caractérisation du climat météo-marin des zones d'étude.

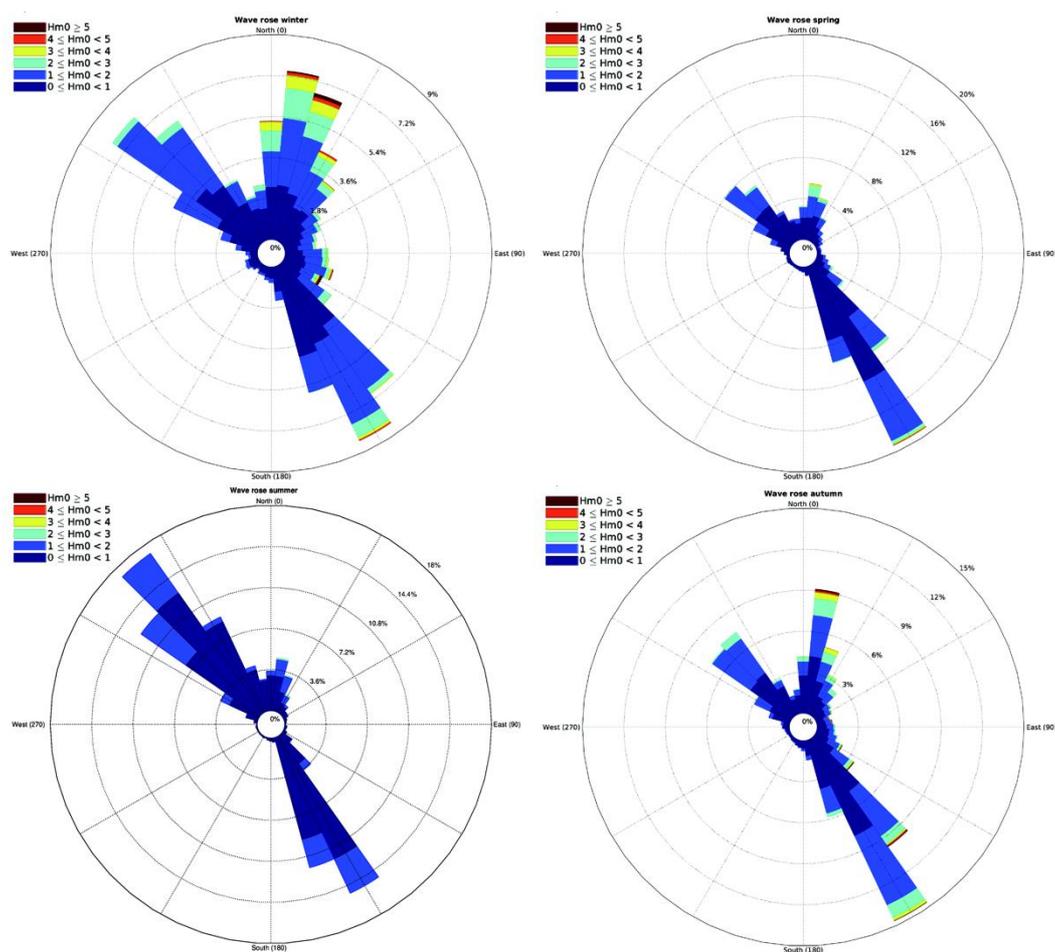


FIGURE 12: le graphique polaire de la distribution de fréquence des événements météorologiques en fonction de la direction et des intervalles de hauteur des vagues sur une base saisonnière

L'ensemble de données ondamétriques pluriannuelles de SWH et DIR décrit ci-dessus a ensuite été analysée quantitativement afin de définir les scénarios météorologiques d'intérêt pour l'étude. En particulier, pour chaque saison et pour chaque secteur de DIR égal à 30°, ont été calculés : la fréquence d'occurrence des événements avec une SWH supérieure à 1 m ; la hauteur moyenne significative des vagues (AVG-SWH) obtenue en faisant la moyenne de toutes les valeurs de SWH supérieures à 0,5 m ; la hauteur moyenne saisonnière maximale des vagues (AVG-MAX) obtenue en faisant la moyenne des valeurs maximales obtenues pour chaque saison ; la hauteur absolue saisonnière maximale des vagues (MAX-SWH). En gras sont indiquées les données relatives aux quadrants dominants, estimées sur la base de la fréquence élevée d'occurrence et de la direction d'origine si elle a ou n'a pas d'incidence sur les côtes étudiées.

L'analyse quantitative montre également que les directions de Grec et de Sirocco sont les *fetch* principaux qui caractérisent le climat météoromarin de la région examinée. Les intensités de SWH sont maximales en hiver et en automne avec des valeurs AVG-MAX de 3,8 m et 3,5 m pour Grec et de 2,7 m et 3,7 m pour Sirocco respectivement. Pour le Grec, les valeurs MAX-SWH sont de 7 m et 5,9 m en hiver et en automne, tandis que pour le Sirocco, les valeurs MAX-SWH sont de 5,4 m et 6,3 m en hiver et en automne, respectivement. Les hauteurs moyennes des vagues suivent une tendance similaire avec des valeurs AVG-SWH de 1,6 m et 1,3 m pour le Grec en hiver et en automne et avec des valeurs AVG-SWH de 1,2 m et 1,2 m pour le Sirocco en hiver et en automne.

HIVER				
SECTOR	OCCUR.	AVG - SWH	AVG-MAX	MAX - SWH
0-30	2659	1,6	3,8	7,1
30-60	1104	1,2	2,6	4,5
60-90	623	1,2	2,4	3,7
90-120	804	1,3	2,5	5,2
120-150	2040	1,2	2,7	5,4
150-180	1532	1,0	2,1	3,8
180-210	199	0,8	1,3	1,7
210-240	157	0,8	1,3	1,8
240-270	216	0,9	1,4	1,8
270-300	598	0,9	1,5	1,8
300-330	2487	1,1	2,2	2,8
330-360	1028	1,1	2,6	3,6

PRINTEMPS				
SECTOR	OCCUR.	AVG - SWH	AVG-MAX	MAX - SWH
0-30	1716	1,2	2,6	4,0
30-60	524	0,9	1,7	2,6
60-90	175	1,0	1,3	2,6
90-120	403	1,0	1,5	2,5
120-150	3190	1,0	2,3	5,0
150-180	2798	0,9	1,8	3,5
180-210	142	0,8	1,0	1,6
210-240	126	0,7	1,0	1,6
240-270	140	0,7	1,1	1,6
270-300	626	0,9	1,4	1,9
300-330	2523	1,0	1,9	2,3
330-360	909	0,8	1,7	2,4

TABLEAU 1 : la distribution de fréquence (OCCUR) des événements météorologiques selon l'intervalle de direction d'origine (SECTOR) et les statistiques connexes sur la hauteur moyenne (AVG-SWH), la hauteur moyenne maximale (AVG-MAX) et la hauteur maximale enregistrée (MAX-SWH) pour les saisons d'hiver et de printemps au cours de la période considérée (2007-2017)

<i>ÉTÉ</i>				
<i>SECTOR</i>	<i>OCCUR.</i>	<i>AVG - SWH</i>	<i>AVG-MAX</i>	<i>MAX - SWH</i>
0-30	1020	0,9	1,6	2,4
30-60	214	0,9	1,0	2,4
60-90	67	0,6	0,7	1,3
90-120	40	0,7	0,6	0,9
120-150	942	0,8	1,2	1,7
150-180	2125	0,8	1,5	2,0
180-210	46	0,7	0,7	1,1
210-240	26	0,7	0,6	1,1
240-270	25	0,7	0,7	1,0
270-300	228	0,8	1,0	1,2
300-330	3565	0,9	1,6	1,8
330-360	1163	0,7	1,3	2,1

<i>AUTOMNE</i>				
<i>SECTOR</i>	<i>OCCUR.</i>	<i>AVG - SWH</i>	<i>AVG-MAX</i>	<i>MAX - SWH</i>
0-30	3000	1,3	3,5	5,9
30-60	947	1,2	2,4	3,4
60-90	537	1,2	2,0	4,5
90-120	736	1,1	2,4	5,7
120-150	3580	1,2	3,7	6,3
150-180	2323	1,0	2,4	3,5
180-210	239	0,8	1,2	1,6
210-240	121	0,8	1,1	1,5
240-270	171	0,8	1,2	1,8
270-300	610	0,9	1,4	2,0
300-330	2886	1,1	2,3	2,9
330-360	968	0,9	2,3	2,8

TABLEAU 2 : la distribution de fréquence (OCCUR) des événements météorologiques selon l'intervalle de direction d'origine (SECTOR) et les statistiques connexes sur la hauteur moyenne (AVG-SWH), la hauteur maximale moyenne (AVG-MAX) et la hauteur maximale enregistrée (MAX-SWH) pour les saisons d'été et d'automne au cours de la période considérée (2007-2017)

3. LA MÉTHODE NUMÉRIQUE

Afin de reproduire la dynamique de la circulation côtière dans les 2 études de cas en relation avec les scénarios météorologiques prédéfinis, une approche de modélisation numérique a été utilisée. En particulier, un modèle hydrodynamique tridimensionnel (SHYFEM, Umgiesser et al., 2004) basé sur la méthode des éléments finis a été utilisé, couplé à un modèle spectral de vagues (WWM, Roland et al., 2009) et à un modèle de simulation du transport de particules dispersées dans la colonne d'eau (Cucco et al., 2016). Cet instrument a été appliqué afin de reproduire les champs de hauteur et de direction des vagues, les champs tridimensionnels des courants induits par le vent et les vagues et les processus de transport et de dépôt au fond des feuilles de *P. oceanica* déposées près du littoral. Voici une brève description du modèle hydrodynamique SHYFEM, du modèle spectral de vagues WWM et du modèle de transport.

3.1. LE MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

SHYFEM (Shallow Water Hydrodynamic Finite Element Model) est une suite de modèles numériques constituée d'un modèle hydrodynamique open-source développé par les chercheurs du C.N.R., auquel sont couplés diverses modules numériques capables d'aborder plusieurs questions environnementales. Compte tenu de ses caractéristiques, cet instrument est utilisé par la communauté scientifique internationale spécifiquement pour reproduire la circulation de l'eau et la propagation des vagues dans les environnements côtiers tels que les lagunes, les estuaires et les zones portuaires. Le modèle hydrodynamique résout le système d'équations des eaux peu profondes en 3 dimensions avec une approximation de Boussinesq en horizontal et une approximation hydrostatique en vertical dans leur formulation avec les niveaux d'eau et le transport. (Umgiesser et al., 2004; <https://github.com/SHYFEM-model/shyfer>). Le modèle est capable de reproduire le champ de mouvement induit par les gradients de pression barotropique, barocline et atmosphérique, la friction à l'interface air-mer et à l'interface fond marin-topographie, l'advection non linéaire par des processus turbulents le long de la verticale et l'action du mouvement des vagues.

Le modèle utilise la méthode des éléments finis pour l'intégration spatiale et une

méthode mi-implicite pour l'intégration temporelle du système d'équations considéré. En particulier, le système d'équations résolues par le modèle est décrit ci-dessous :

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial U_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial U_l}{\partial y} - fV_l \\
& = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho^i dz - \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^{top(l)} - \tau_x^{bottom(l)}) \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial V_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial U_l}{\partial y} \right) + \frac{F_l^x}{\rho h_l} + gh_l \frac{\partial \eta}{\partial x} + gh_l \beta \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\
& \frac{\partial V_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial V_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial V_l}{\partial y} + fU_l \\
& = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho^i dz - \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^{top(l)} - \tau_y^{bottom(l)}) \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial V_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial V_l}{\partial y} \right) + \frac{F_l^y}{\rho h_l} + gh_l \frac{\partial \eta}{\partial y} + gh_l \beta \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\
& \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_l \frac{\partial U_l}{\partial z} + \sum_l \frac{\partial V_l}{\partial y} = 0
\end{aligned}$$

où l indique la couche verticale, U_l et V_l les composantes horizontales du transport dans les directions x et y pour chaque couche, u_l et v_l les vitesses horizontales, p_a la pression atmosphérique, g l'accélération de la gravité, f le paramètre de Coriolis, ζ le niveau de l'eau, ρ_0 la valeur de référence de la densité de l'eau de mer, $\rho = \rho_0 + \rho'$ la densité de l'eau de mer, τ les composantes du *stress* horizontales à l'interface supérieure (haut) et inférieure (bas) de chaque couche, H_l l'épaisseur de la couche, H_l la profondeur du fond de la couche l , A_h la viscosité pour la résolution de la dynamique de la sous-grille (*eddy viscosity*). Pour le calcul de la diffusivité verticale et de la viscosité, le modèle appelé GOTM (General Ocean Turbulence Model, Burchard and Petersen 1999) a été utilisé. Le couplage avec le modèle spectral de l'onde se fait par le calcul du gradient des *Radiation stress* (F_x et F_y) induit par l'onde (Longuet-Higgins et Steward, 1964) selon la formulation proposée par Xia et al., (2004) capable de reproduire la variabilité verticale de leur intensité.

Le modèle considère également le degré de forçage induit par l'action directe des principales composantes astronomiques de la marée selon la formulation du Potentiel de Marée d'Equilibre et de la Charge de Marée avec η et β qui constituent: la somme des potentiels de marée de chaque composante astronomique multipliée par le facteur d'élasticité correspondant et un facteur qui prend en compte la charge de marée, respectivement. Les conditions limites sont définies à la fois pour les surfaces supérieure et inférieure et pour les bords du domaine de calcul. Dans ce cas, les termes de frottement à l'interface pour les surfaces supérieure et inférieure sont définis comme :

$$\begin{aligned}\tau_x^{surface} &= c_D \rho_a w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2} & \tau_x^{bottom} &= c_B \rho_0 u_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \\ \tau_y^{surface} &= c_D \rho_a w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2} & \tau_y^{bottom} &= c_B \rho_0 v_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2}\end{aligned}$$

où C_D est le coefficient de frottement du vent, C_B le frottement de fond, ρ_a la densité de l'air, (w_x, w_y) les composantes de la vitesse du vent et (u_L, v_L) les composantes de la vitesse

Le SHYFEM utilise deux types de conditions aux limites horizontales. Sur les bords ouverts, les valeurs pour ζ sont fixées selon la condition de Dirchlet, tandis que sur les bords fermés, il est possible de fixer à la fois le mode *full slip* qui prévoit l'annulation des composantes de la vitesse normale uniquement et le mode *no slip* qui prévoit l'annulation de la vitesse sur le bord fermé. Pour plus de détails sur le traitement numérique, voir Umgiesser et al. (2004) et le manuel d'utilisation du modèle téléchargeable par le site <https://github.com/SHYFEM-model/shyferm>.

3.2. MODÈLE DE VAGUE

WWM est un modèle de vague spectrale de troisième génération qui utilise la méthode des éléments finis pour la résolution des Wave Action Equation (WAE). Dans le système de référence cartésien, les WAE sont les suivants :

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \nabla_x (C_x N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (C_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta N) = S_{tot}$$

où N est le spectre de la densité d'énergie (Action des Ondes), t est le temps, x et y les vecteurs unitaires de l'espace géographique, C_x est la vitesse de propagation, C_σ et C_θ sont les vitesses de propagation dans l'espace des fréquences σ et dans l'espace des directions θ . Le modèle de vagues est couplé au modèle

hydrodynamique par le système FIFO, qui permet l'échange bidirectionnel d'informations à des intervalles de temps prédéfinis entre 2 processus. Les deux modèles utilisent la même grille de calcul par éléments finis et, à des étapes d'intégration prédéfinies, le modèle hydrodynamique fournit les champs de vitesse et les profondeurs de chaque élément de calcul en tenant compte des variations dues aux niveaux de surface. Ces informations sont utilisées par le modèle d'onde pour calculer les processus de réfraction dû au courant et les processus de *shoaling*. En particulier, les vitesses de propagation dans les différents espaces sont définies comme suit:

$$C_x = C_g + \mathbf{U}$$

$$C_\theta = \frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial m} + \mathbf{k} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s}$$

$$C_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial H} \left(\frac{\partial H}{\partial t} + U_A \cdot \nabla_x H \right) + C_g \mathbf{k} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s}$$

où \mathbf{U} est le vecteur vitesse calculé par le modèle hydrodynamique, par rapport au premier niveau dans le cas d'une approximation *Deep Water* et obtenu comme moyenne le long de la colonne d'eau dans l'approximation *Shallow Water*, s et m les directions le long de la propagation de l'onde et perpendiculairement à celle-ci, \mathbf{k} est le vecteur nombre d'onde constitué de k_x et k_y et k le module, C_g est la vitesse de groupe et H la profondeur fournie par le modèle hydrodynamique. Le modèle résout l'advection dans l'espace géographique au moyen de schémas numériques à éléments finis (*Residual Distribution Schemes*) tandis qu'il résout les composantes spectrales de l'advection au moyen d'un schéma plus rapide (Tolman, 1995).

Le terme source S_{tot} est expliqué comme suit :

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl4} + S_{ds} + S_{nl3} + S_{br} + S_{df}$$

et comprend le terme d'apport énergétique dû au vent S_n , les termes pour la simulation des processus d'interaction non linéaire entre les vagues soit en eau profonde soit en eau peu profonde S_{nl4} et S_{nl3} , les termes de dissipation d'énergie par *whitecapping* et *depth-induced breaking* S_{ds} et S_{br} , et le terme de dissipation par frottement au fond S_{df} .

WWM et SHYFEM sont appariés selon le mode FIFO qui prévoit, à chaque

intervalle de calcul prédéfini, d'activer un transfert de données du modèle de vagues vers le modèle hydrodynamique et vice versa. En particulier, une fois que les données de courant et de profondeur du modèle hydrodynamique sont reçues, le modèle d'onde calcule les termes de la contrainte de rayonnement dans la formulation de Xia et al. (2004). Il est fait référence à Roland et al. (2008) et Ferrarin et al. (2013) pour une description détaillée du modèle hydrodynamique et de l'approche utilisée pour le couplage des deux modules numériques.

3.3. LE MODÈLE DE TRANSPORT

Le modèle hydrodynamique SHYFEM-WWM est apparié à un modèle pour la simulation des processus de transport et de dispersion de substances dispersées dans l'eau, avec un comportement actif ou passif. Ce modèle est basé sur une approche lagrangienne de la solution de l'équation advection-dispersion. Connu sous le nom de *Particle Tracking Model* (PTM). Le module ci-dessus permet de résoudre l'ensemble des équations différentielles suivantes :

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u_a + u_d$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = v_a + v_d$$

où u_a , v_a sont les vitesses advectives pour chaque niveau l et u_d , v_d sont les composantes diffusives calculées le long des axes x et y . Les composantes u_d et v_d sont exprimées comme suit:

$$u_a = \alpha_c u_l + \alpha_w w_x$$

$$v_a = \alpha_c v_l + \alpha_w w_y$$

où u_l , v_l sont les vitesses calculées pour le premier niveau vertical par le modèle hydrodynamique SHYFEM ; w_x , w_y sont les composantes du transport des vagues de Stokes et sont les facteurs de correction pour le Stokes-drift du courant. Les composantes horizontales des vitesses de turbulence u_d et v_d sont calculées à l'aide d'une technique de *random walk*. D'un point de vue numérique, la résolution de cet ensemble d'équations est couplée avec le système d'équations hydrodynamiques. Voir Cucco et al. (2009, 2016) pour une description détaillée de la méthode numérique utilisée.

4. SETUP MODÈLE NUMÉRIQUE

Ce paragraphe décrit le domaine de calcul sur lequel les systèmes d'équations décrits ci-dessus sont améliorés et le setup des simulations numériques.

4.1. LE DOMAINE NUMÉRIQUE

Le modèle SHYFEM utilise la méthode des éléments finis pour l'intégration spatiale des équations de mouvement. Cette méthode permet une discrétisation du domaine d'investigation grâce à l'utilisation de grilles de calcul non structurées constituées d'éléments triangulaires de forme et de taille variables. Cette méthode permet de reproduire des géométries complexes telles que celles qui caractérisent les zones côtières.

Pour les deux études de cas, 2 grilles de calcul basées sur des éléments triangulaires de forme et de taille variables avec une résolution spatiale comprise entre 5 m, pour les zones proches des 2 plages et 5 km pour les zones ultrapériphériques, ont été mises en place. Cette résolution permet une description détaillée de la géométrie et de la morphologie des zones côtières examinées. Les 2 domaines comprennent tout le bassin tyrrhénien et la plus grande partie du Canal de Sicile, avec une résolution plus élevée le long des couloirs qui caractérisent les principaux régimes de vent capables de générer le mouvement des vagues le long de la côte Est de la Sardaigne, c'est-à-dire le Grec du NE et le Sirocco du SE. Telle extension est motivée par le choix d'utiliser des données de vent réalistes comme éléments de forçage du modèle numérique afin de reproduire la génération et la propagation du mouvement des vagues sans avoir besoin d'imposer des conditions aux limites, en fait, dans les 2 cas, tout le domaine de calcul est caractérisé par une condition de *Closed Boundary*. Dans les figures 13 et 14, panneaux de gauche, les grilles de calcul utilisées pour les 2 études de cas sont présentées sous forme intégrale et à différents niveaux d'agrandissement. Comme on peut le constater, l'augmentation de la résolution spatiale se fait à la fois en correspondance des principaux chenaux de vent et à proximité des 2 plages. À cette augmentation de la densité des éléments correspond une augmentation de la précision du calcul numérique.

La reproduction des caractéristiques bathymétriques des deux domaines d'étude

a été réalisée à l'aide des données bathymétriques intégrées décrites au point 2. Dans les figures 13 et 14, les panneaux de droite, les détails bathymétriques tels qu'ils sont utilisés par le modèle numérique sont indiqués. En ce qui concerne la direction verticale, le modèle prévoit l'utilisation d'une discrétisation en *z-levels* de 15 niveaux avec un pas variable de 0,5 m à 500 mètres.

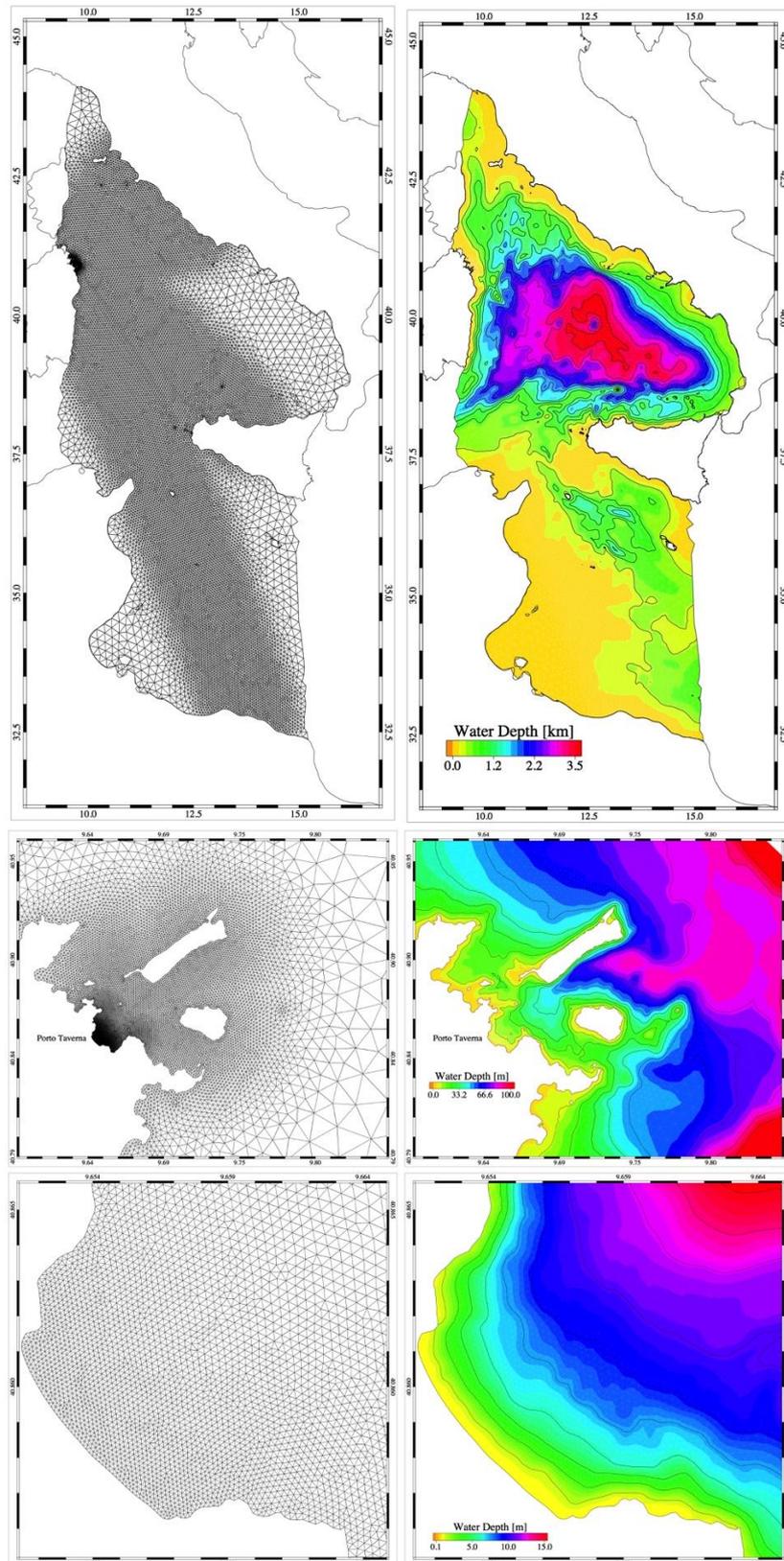


FIGURE 13 : la grille de calcul du modèle hydrodynamique, ondamétrique et de transport (panneaux de gauche) et détail bathymétrique (panneaux de droite) utilisés pour l'étude de cas de Porto Taverna. Zone complète et zoom.

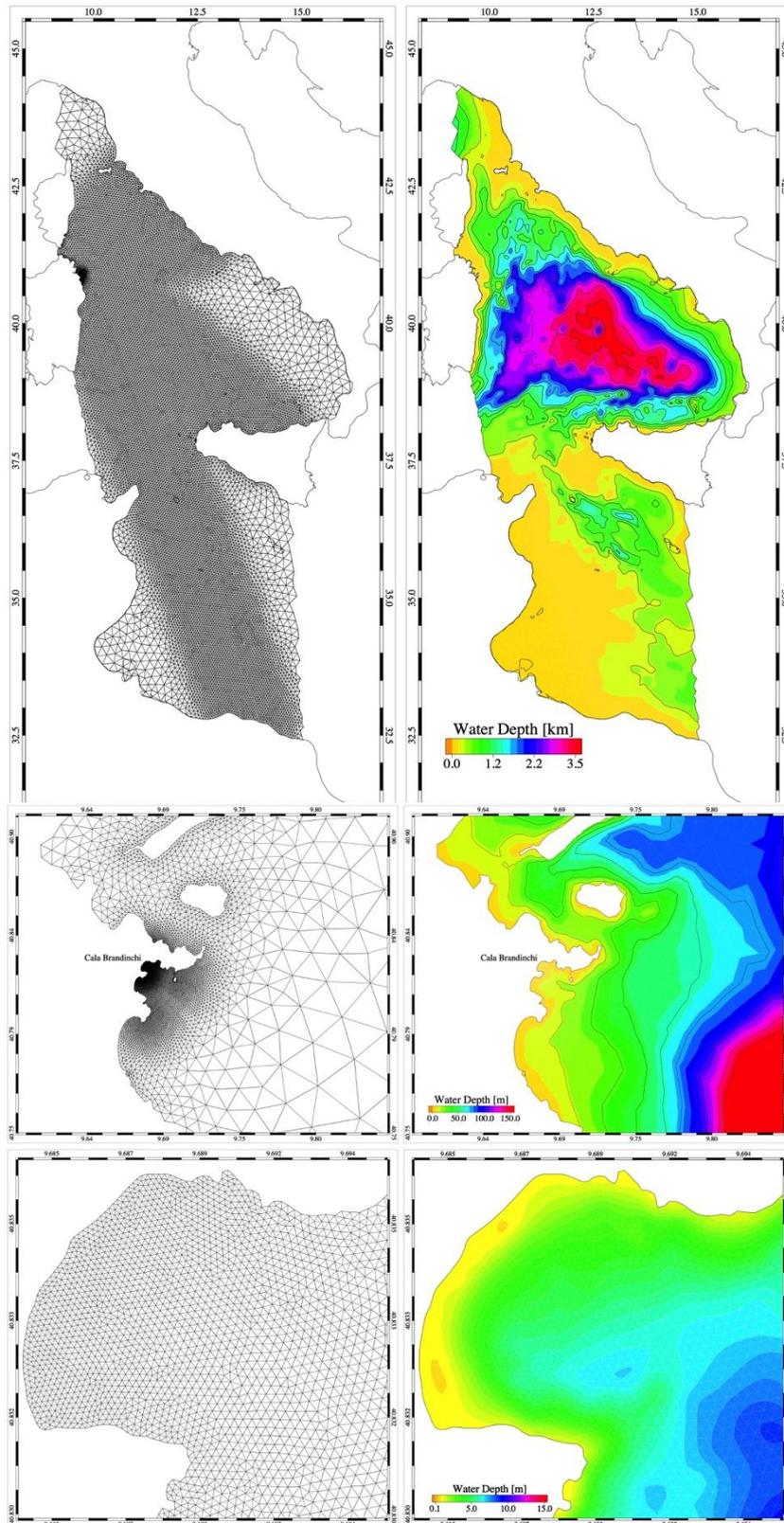


FIGURE 14: la griglia di calcolo del modello idrodinamico, ondametrico e di trasporto (panneau di gauche) e dettaglio bathymetrico (panneau di droite) utilizzati per l'étude de cas de la Cala Brandinchi. Zone completa e zoom.

4.2. LE SETUP DES SIMULATIONS

L'estimation des caractéristiques de dispersion des parties côtières des 2 zones d'étude a été réalisée selon le schéma conceptuel décrit à la figure 15 et en suivant les actions séquentielles énumérées ci-dessous :

- 1) Définition des scénarios météo marins;
- 2) Reproduction de la circulation de l'eau et de la propagation des vagues pour chaque scénario envisagé ;
- 3) Reproduction du transport des particules numériques émulant les feuilles de *P. Oceanica* rejetées sur le littoral pour chaque scénario considéré ;
- 4) Calcul des distances parcourues par les différentes particules entre le moment de leur libération et le moment de leur dépôt au fond et calcul et cartographie de l'indice de dispersivité pour chaque scénario météoromarine considéré.

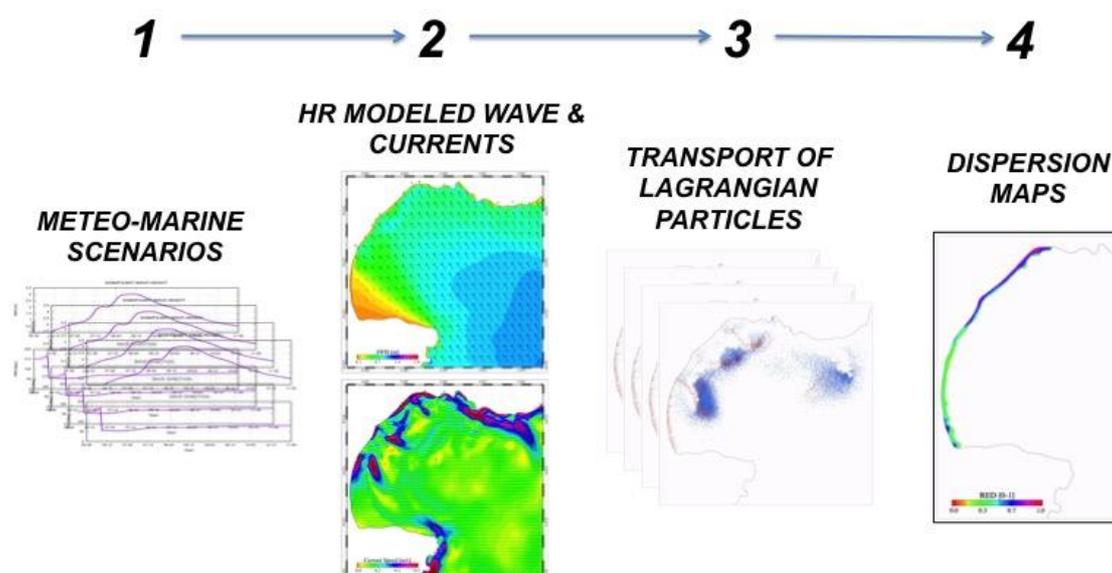


FIGURE 15: le schéma de l'approche numérique utilisée

4.2.1. SCÉNARIOS MÉTEO-MARINS

Pour reproduire la circulation de l'eau et la propagation du mouvement des vagues près des 2 plages de Porto Taverna et Cala Brandinchi, seul le vent a été utilisé comme forçage météoromarine du modèle numérique.

Compte tenu des résultats obtenus à partir de l'analyse statistique sur l'intensité et la direction du mouvement des vagues présentés au paragraphe 3, on a identifié soit une série de scénarios synthétiques basés sur l'utilisation d'un forçage

anémométrique de type théorique soit une série de scénarios "réalistes" basés sur l'utilisation de données de vent variables dans le temps et l'espace et produites par des modèles météorologiques numériques disponibles au ECMWF (<https://www.ecmwf.int>).

En ce qui concerne les scénarios synthétiques, deux hauteurs de vagues ont été identifiées pour les 2 régimes ondamétriques principaux, à savoir le Grec et le Sirocco, l'une représentant un état énergétique moyen et l'autre un état énergétique intense, ce qui donne un total de 4 scénarios.

Les tableaux 3 et 4 quantifient les caractéristiques des scénarios synthétiques considérés, c'est-à-dire deux pour le Grec, ST_G1 et ST_G2, caractérisés par SWH maximal de 1,6 et 3,5 et deux pour le Sirocco ST_S1 et ST_S2 avec un SWH maximal de 1,2 et 2,5, respectivement.

Afin de définir l'intensité et la durée du vent capables de reproduire ces niveaux d'énergie, le modèle ondamétrique WWM a été utilisé en mode 1D le long des *fetch* caractéristiques du Grec et du Sirocco pour cette région. Une approche "*Trial & Error*" a donc permis d'identifier l'intensité et la durée des vents nécessaires pour générer ces niveaux ondamétriques.

En ce qui concerne les scénarios réalistes, dans ce cas également, les deux régimes ondamétriques principaux correspondant au Grec et au Sirocco avec la direction d'origine contenue dans les intervalles entre 30° et 60° et entre 130° et 160° respectivement, ont été pris en considération. Compte tenu des résultats de l'analyse des données météorologiques et marines, 3 intervalles énergétiques caractérisés respectivement par une vague moyenne, une mi- haute et une haute, pour un total de 6 scénarios, ont été identifiés pour chaque régime. Pour chaque scénario et pour chaque intervalle énergétique, la hauteur de vague caractéristique respective a été quantifiée, à partir des résultats de l'analyse statistique présentés dans les tableaux 1 et 2. Le tableau 4 présente les acronymes et les caractéristiques énergétiques des 6 scénarios considérés, c'est-à-dire 3 pour le Grec GC1, GC2 et GC3 caractérisés par des hauteurs de vague de 1,6 m, 2,5 m et 4 m et 3 pour le Sirocco SC1, SC2 et SC3 caractérisés par des hauteurs de vague de 1,6 m, 2,7 m et 3 m, respectivement. Pour ce type de scénarios, le modèle numérique de vent de forçage a été défini à partir de données anémométriques

obtenues à partir des modèles atmosphériques disponibles pour la zone examinée et avec une couverture similaire à celle considérée pour l'analyse statistique des données ondamétrique, c'est-à-dire 2007-2017. On a ensuite procédé à l'identification, pour chaque niveau d'énergie de chaque régime, de l'intervalle de temps au cours de la décennie 2007-2017 dans lequel un événement de tempête s'est produit avec des caractéristiques de direction et de hauteur de vague similaires à celles considérées. À cette fin, un algorithme de similarité a été utilisé pour comparer, selon une approche statistique, des ensembles de données complexes avec des intervalles numériques prédéfinies.

Par la suite, pour chaque intervalle de temps ainsi identifié, on a extrait l'ensemble des données de vent correspondant à l'ensemble des données anémométriques produites par le modèle météorologique, obtenant ainsi, pour chaque scénario considéré, un forçage réaliste, variable dans le temps, capable de reproduire l'événement météorologique étudié.

SCÉNARIOS STATIONNAIRES		
SECTEUR	ACRONYME	SWH
GREC	ST_G1	1.6
	ST_G2	3.5
SIROCCO	ST_S1	1.2
	ST_S2	2.5

TABLEAU 2 : des scénarios stationnaires simulés pour les 2 études de cas avec les SWH concernées comme référence

SCÉNARIOS RÉELS		
SECTEUR	ACRONYME	SWH
GREC	GC1	1.6
	GC2	2.5
	GC3	4.0
SIROCCO	SC1	1.6
	SC2	2.7
	SC3	3.0

TABLEAU 3: des scénarios réels simulés pour les 2 études de cas avec les SWH correspondantes considérées comme référence

4.2.2. SETUP MODÈLE NUMÉRIQUE

Pour chaque scénario stationnaire, une simulation de 4 jours a été mise en place, dont les 2 premiers jours pour l'élaboration de la solution numérique et les 2 derniers jours utilisés pour la simulation des processus de transport induits par le vent et les vagues dans les 2 zones d'étude. Pour les scénarios réalistes, les simulations ont duré 10 jours dont 5 jours de spin-up et les restants 5 jours pour la simulation des processus d'intérêt.

Les coefficients de friction du vent, C_D et de friction du fond, C_B , ont été définis, respectivement, par la formulation de Smith et Banke, et celle de Strikler. Enfin, en ce qui concerne le coefficient A_h de viscosité horizontale et le coefficient K de diffusion horizontale, la formulation proposée par Smagorinsky (1993) a été utilisée.

Pour chaque scénario et pour les deux sites d'étude, les champs de courant dans les 3 dimensions, et la distribution spatio-temporelle des principaux paramètres de la vague produits par les simulations numériques hydrodynamiques et ondamétriques ont été utilisés en mode *off line* par le modèle de transport pour la simulation des processus de dispersion des feuilles de *P. Oceanica* (PO) rejetées sur la laisse.

La figure 16 montre le schéma descriptif des processus qui contribuent à la dispersion des feuilles de PO dans la zone côtière.

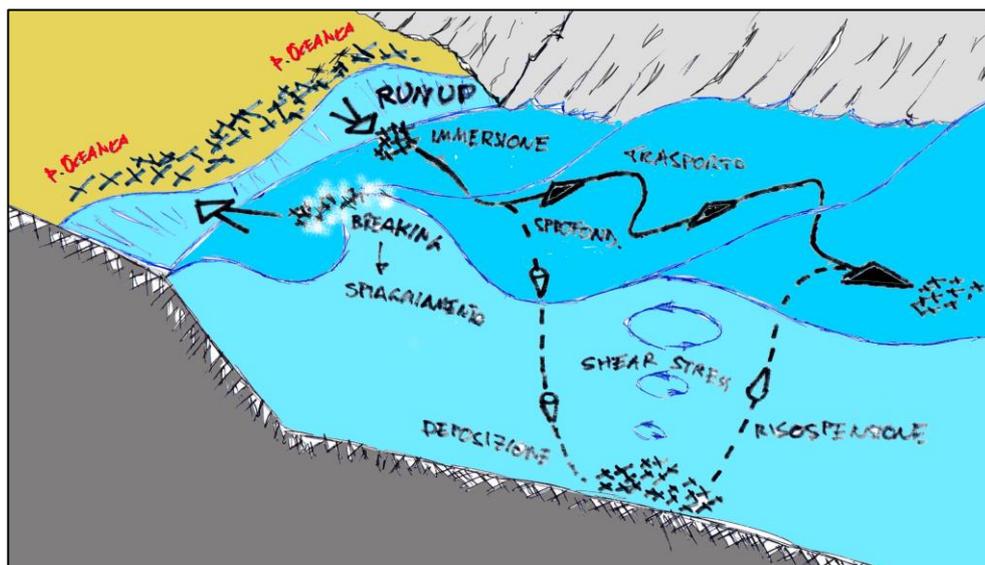


FIGURE 16: le diagramme du processus physique simulé

En particulier, la PO qui s'est déposée près du rivage en raison d'événements de tempêtes majeures peut être entraînée dans l'eau sous l'action du mouvement des vagues sur le rivage (voir **RUN-UP** sur la figure 16). Une fois dans l'eau (voir **IMMERSIONE** dans la figure 16), les feuilles sont transportées par le courant de surface (voir **TRASPORTO** dans la figure 16) jusqu'à ce qu'elles aient absorbé suffisamment d'eau pour commencer à couler (voir **SPROFONDAMENTO** dans la figure 16). À ce stade, le dépôt au fond a lieu (voir **DEPOSIZIONE** à la figure 16) où les feuilles de PO sédimentent moins que l'action directe du mouvement des vagues et du courant (voir **SHEAR-STRESS** à la figure 16) qui, pour certains seuils d'intensité, peut remettre en suspension le PO le long de la colonne d'eau (voir **RISOSPENSIONE** à la figure 16) où elles ressentiront l'effet du transport du courant. Un autre processus considéré est l'échouage de la PO (voir **SPIAGGIAMENTO** dans la figure 16) qui se produit à la suite de l'action des briseurs de vagues qui insistent sur la plage (voir **BREAKING** dans la figure 16). D'un point de vue numérique, les 5 principaux processus qui règlent la dynamique des feuilles de PO près du littoral, à savoir l'IMMERSION, le TRANSPORT, le DÉPÔT, la RESUSPENSION et l'ÉCHOUEMENT, ont été abordés à l'aide de paramètres et de formulations tirés de références bibliographiques (Oldham et al., 2010).

Pour chaque scénario, les feuilles de PO ont été simulées au moyen de particules lagrangiennes libérées en continu dans les éléments de la grille de calcul sur les rivages des 2 plages étudiées. À chaque étape de calcul, l'immersion et le début du transport des particules sont simulés en calculant le *run-up* des vagues incidentes le long du littoral à l'aide de la formulation simplifiée de Stockdon (Stockdon, 2006).

$$R = 1.1 \left(0.35\beta\sqrt{HL} + \frac{\sqrt{HL(0.563\beta^2 + 0.004)}}{2} \right)$$

$$DM = \frac{R}{\sin(\tan^{-1} \beta)}$$

où β est la pente de la plage, calculée à partir des données expérimentales (voir paragraphe 2), H et L sont la hauteur et la période de la vague incidente de la plage qui sont obtenues à partir des données du modèle, R est le run-up exprimé en

termes relatifs et DM est la distance maximale du rivage atteinte par le contre-courant. Pour les valeurs de DM supérieures à 2 m, les particules sont mises en mouvement par les courants, pour les valeurs inférieures, elles sont considérées comme inactives. Cette valeur seuil a été établie en supposant à la fois la plantation de PO à une distance moyenne de 1 m du rivage et une action utile de remontée des vagues uniquement pour un contre-courant qui atteint une distance deux fois supérieure à celle du positionnement de la PO.

Le transport de surface a lieu tant que les feuilles de PO sont sèches. L'intervalle de temps nécessaire pour le trempage a été calculé par des expériences en laboratoire et estimé à 7300 secondes ou environ 2 heures, selon les résultats d'expériences similaires (Oldham et al., 2010).

Après le trempage, et pendant environ 2 heures, les feuilles sont transportées en utilisant les formules décrites au paragraphe 4.3 et en utilisant un facteur de correction du courant égal à 0,7 comme le suggère Oldham et al. 2010 et un coefficient de dispersion obtenu à partir de la formule de Smagorinsky. Pour la dérive de Stokes, un facteur de correction de 0,1 a été utilisé.

Après environ 2 heures de trempage, le naufrage se produit avec une vitesse de décantation de 0,15 m/s (Oldham et al., 2010). Une fois le fond atteint, la PO laisse moins de sédiments que l'action de la vague et du courant qui, pour des seuils de contrainte de *shear-stress* supérieurs à 8×10^{-5} N/m² (Oldham et al., 2010), ramènent les feuilles de PO en suspension pour être à nouveau transportées par le courant.

À chaque pas temporel du modèle, la distance de la côte de chaque particule déposée au fond est calculée. Ensuite, à chaque élément de calcul du modèle à partir duquel les particules numériques ont commencé à bouger, la distance moyenne du rivage parcourue par les particules déposées au fond est associée à chaque élément de calcul du modèle. Ces données sont ensuite cartographiées soit sous forme de distance exprimée en mètres soit normalisées et exprimées sous forme adimensionnelle comme un indice de dispersivité (RED).

5. RÉSULTATS

Les résultats obtenus par les simulations numériques ont été traités et analysés afin d'obtenir des informations quantitatives sur la meilleure position pour la libération des feuilles de PO le long des plages de Porto Taverna et Cala Brandinchi. On trouvera ci-dessous, pour les deux plages, les résultats du modèle hydrodynamique et ondamétrique et les résultats du modèle de transport des feuilles de PO obtenus pour les scénarios stationnaires. Les résultats des scénarios réalistes sont présentés ci-dessous.

5.1. SCÉNARIOS STATIONNAIRES

Voici les résultats obtenus pour les 2 études de cas et les 4 scénarios stationnaires, 2 pour le Grec (ST_G1 et ST_G2) et 2 pour le Sirocco (ST_S1 et ST_S2). Avec le même scénario, les caractéristiques des forces météo marines et donc les hauteurs et les directions des vagues incidentes en mer sont les mêmes pour les deux études de cas. Cela dit, la figure 17 montre les tendances de SWH et DIR au cours des 2 derniers jours de la simulation numérique pour un point situé en dehors de la zone côtière d'intérêt pour les 2 scénarios du Grec. Comme on peut le voir, dans les deux cas, à la suite d'une croissance linéaire de l'intensité du vent et à une direction d'origine constante et homogène, on observe une courbe de croissance asymptotique à la hauteur des vagues avec une valeur maximale atteinte à la fin du premier jour de simulation de 1,6 m pour le cas ST_S1, et de 3,5 m pour le cas ST_S2.

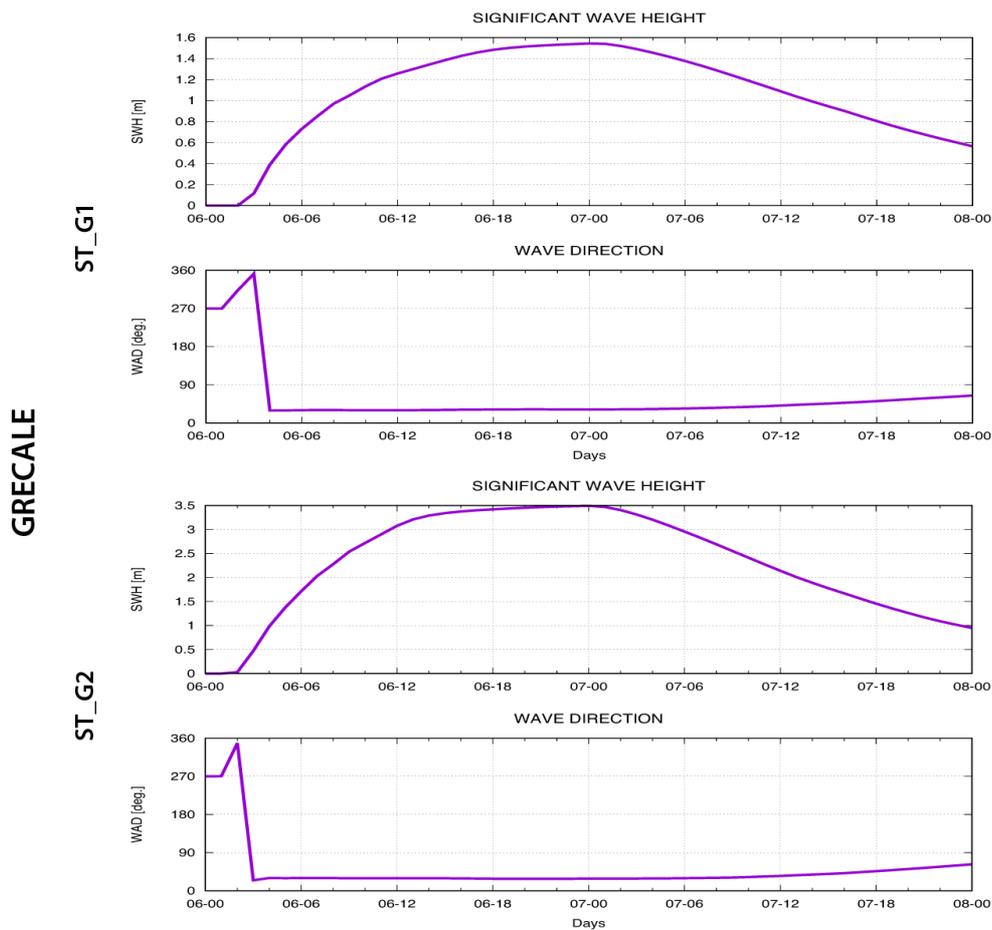


FIGURE 17: l'évolution dans le temps de la SWH (sous-panneaux supérieurs) et de la direction (sous-panneaux inférieurs) pendant l'intervalle simulé pour les scénarios stationnaires du Grec obtenus pour les deux études de cas en pleine mer.

De même, la figure 18 montre les tendances de SWH et DIR pendant les 2 jours de simulation numérique pour le même point extérieur, pour les 2 scénarios Sirocco. Dans ce cas également, on observe une courbe de croissance asymptotique à la hauteur des vagues avec une valeur maximale atteinte à la fin du premier jour de simulation et égale à 1,2 m pour le cas ST_S1 et 2,5 m pour le cas ST_S2.

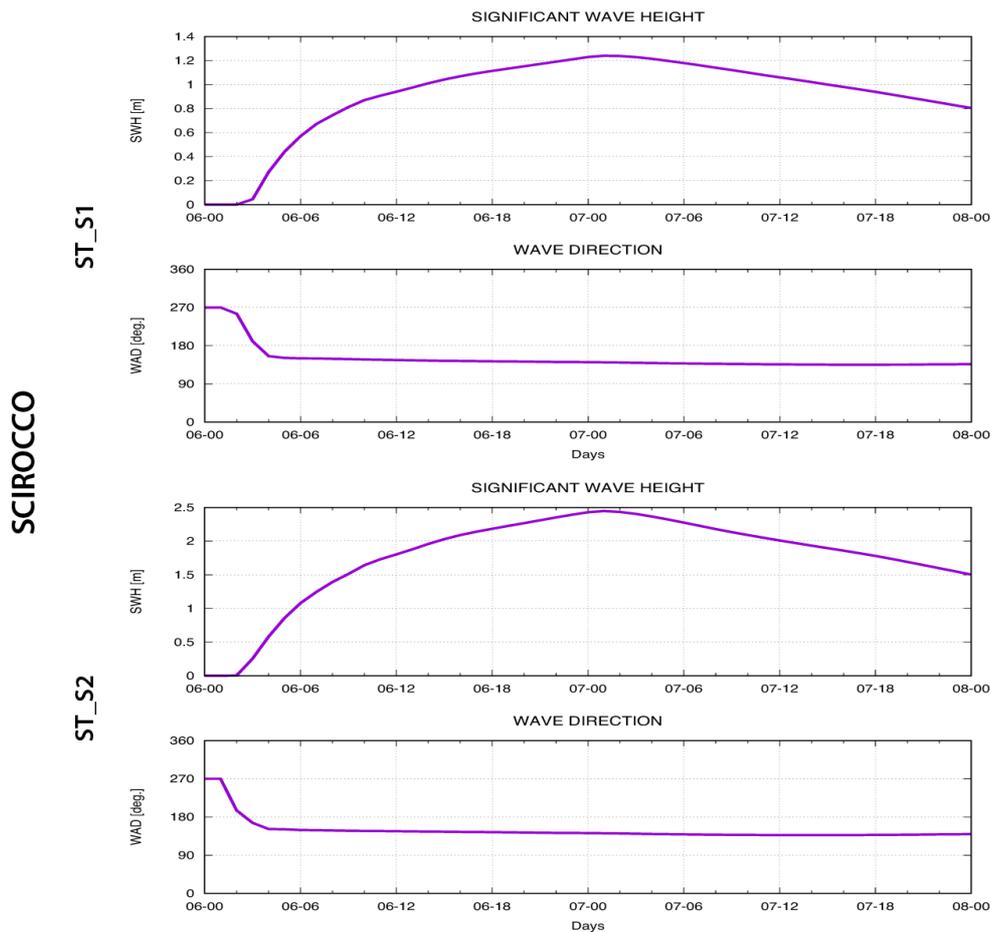


FIGURE 18 : l'évolution dans le temps de la hauteur de mer (sous-panneaux supérieurs) et de la direction (sous-panneaux inférieurs) pendant la plage simulée pour les scénarios stationnaires du Sirocco obtenus pour les deux études de cas en pleine mer.

Les tendances du mouvement des vagues décrites par les graphiques des figures 17 et 18 représentent les conditions météorologiques et maritimes qui caractérisent le temps extérieur pour les deux études de cas pendant les périodes simulées.

Ci-dessous sont présentés les résultats obtenus à partir des simulations numériques pour les 2 études de cas. En particulier, les distributions de SWH et DIR dans la zone en dehors des sites d'étude sont d'abord analysées, puis l'analyse de la circulation de l'eau et de la propagation du mouvement des vagues dans les zones côtières d'intérêt est approfondie. Par la suite, on analysera à la fois les distributions spatiales des distances moyennes parcourues par les particules

rejetées le long du littoral et la variabilité spatiale de la densité moyenne des particules déposées au fond pour chaque scénario simulé.

5.1.1. PORTO TAVERNA

La figure 19 montre la tendance spatiale de SWH et DIR dans la zone étendue devant la plage de Porto Taverna au moment de l'intensité maximale du mouvement de la vague pour chaque scénario stationnaire considéré. Dans le cas des événements Grec, tant pour ST_G1 que ST_G2, la direction d'origine du mouvement des vagues ne permet aucun abri de l'action directe des vagues sur la zone d'intérêt. Dans les deux scénarios, la plage de Porto Taverna est directement affectée par le mouvement des vagues venant du nord-est. Au contraire, en ce qui concerne les événements du Sirocco, tant pour ST_S1 que pour ST_S2, la conformation de la côte permet une couverture partielle de la partie de la côte qui nous intéresse grâce à l'action directe du mouvement des vagues provenant du SE.

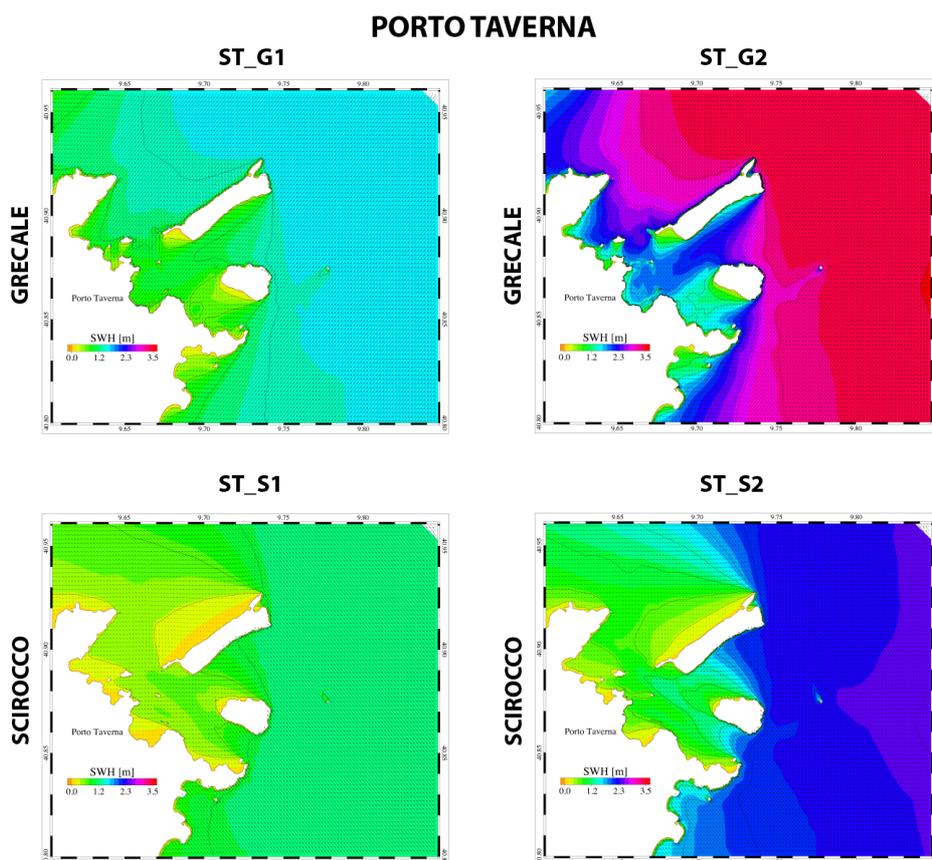


FIGURE 19 : la tendance spatiale du SWH dans la zone extérieure à Porto Taverna, pour les 4 scénarios stationnaires, obtenue pour le moment de puissance maximale

À proximité de la zone d'intérêt, les différentes caractéristiques du mouvement des vagues générées par les 2 régimes de vent pour les deux scénarios énergétiques sont évidentes. La figure 20 montre les tendances de SWH et de DIR telles que décrites dans la figure 19 pour la zone située en face de la plage de Porto Taverna. Comme on peut le voir, dans les deux scénarios de Grecale, la propagation du mouvement des vagues est dirigée perpendiculairement au littoral, ce qui permet d'atteindre des hauteurs de vague de plus d'un mètre près de la plage. Au contraire, dans le cas du vent du Sirocco, le mouvement des vagues affecte le littoral avec un angle aigu et avec des hauteurs de vague, près du littoral, inférieures à un mètre et réparties de façon hétérogène le long de la plage. Dans ce cas, en raison de la forme de la baie, les processus de réfraction n'affectent que partiellement la déviation des rayons des vagues dans une direction perpendiculaire au littoral.

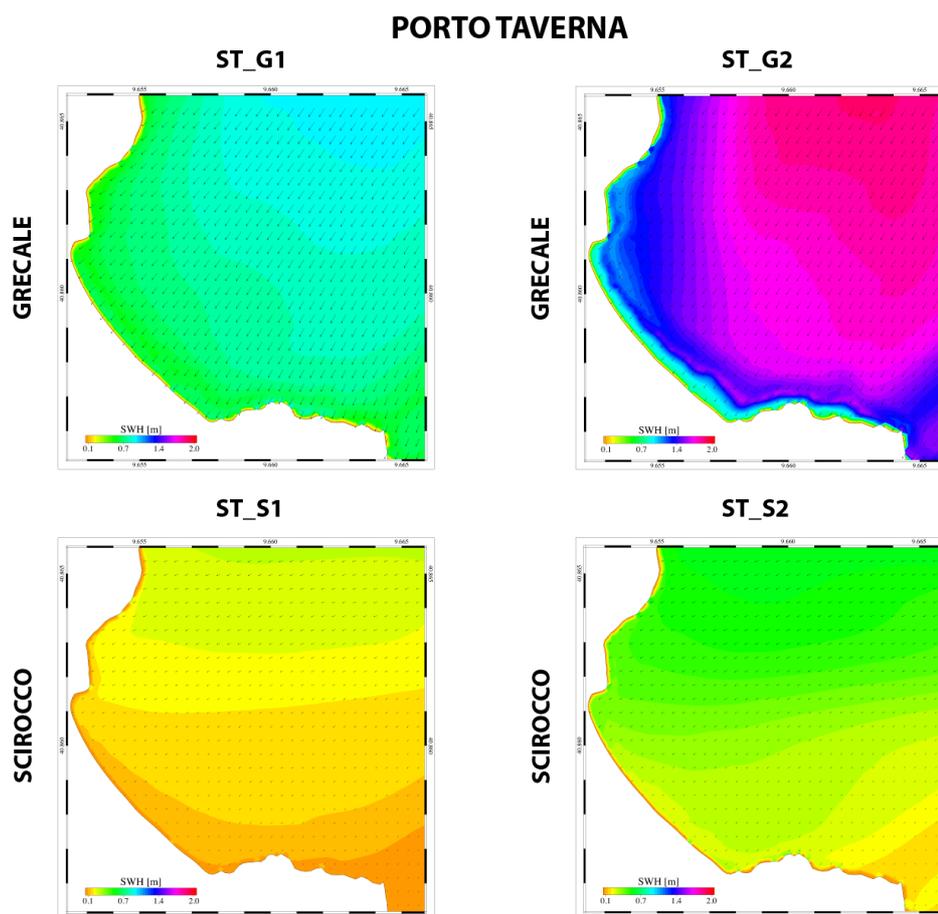


FIGURE 20 : la tendance spatiale de la SWH dans la zone de Porto Taverna, pour les 4 scénarios stationnaires, obtenue pour le moment d'énergie maximale

L'action du vent et du mouvement des vagues produit une circulation côtière qui varie en intensité et en direction selon les scénarios méteo-marins considérés. La figure 21 montre, pour les 4 scénarios stationnaires, la tendance spatiale de la circulation verticale moyenne de l'eau dans la partie de mer faisant face à la plage de Porto Taverna au moment de l'intensité maximale du mouvement des vagues correspondant à la fin de la première journée de simulations.

Dans le cas du scénario Grec ST_G1, la circulation de l'eau dans la partie externe est caractérisée par un écoulement direct vers la plage qui, près de la côte, est divisée en 2 branches dirigées respectivement vers le Nord et le Sud. Les vitesses de courant dans cette zone ne dépassent généralement pas 10 cm/s.

Dans la partie littorale, la dissipation du mouvement des vagues génère, dans la partie nord, un flux dirigé vers le sud caractérisé par une intensité croissante du courant près du littoral, où des vitesses supérieures à 30 cm/s sont simulées. Dans la partie sud, la présence d'une cellule de circulation horaire est évidente, qui chevauche le rivage et la circulation externe. Là encore, les vitesses d'écoulement sont maintenues près du littoral. En ce qui concerne le scénario ST_G2, il y a une correspondance avec le précédent en termes de structure de circulation avec un flux sud qui touche une cellule de circulation horaire située dans la partie sud. Cependant, l'intensité du courant dans ce cas dépasse 45 cm/s près du rivage.

Pour les scénarios Sirocco, ST_S1 et ST_S2, dans les deux cas, l'absence d'impact direct du mouvement des vagues du littoral ne permet pas la génération de cellules et de structures de circulation d'une intensité significative. Comme on peut le voir, le flux est principalement généré par l'action du vent et est homogène et dirigé vers le nord-ouest.

Ce n'est que dans la partie nord du littoral, où le mouvement des vagues est plus intense, qu'il y a génération de structures de circulation complexes.

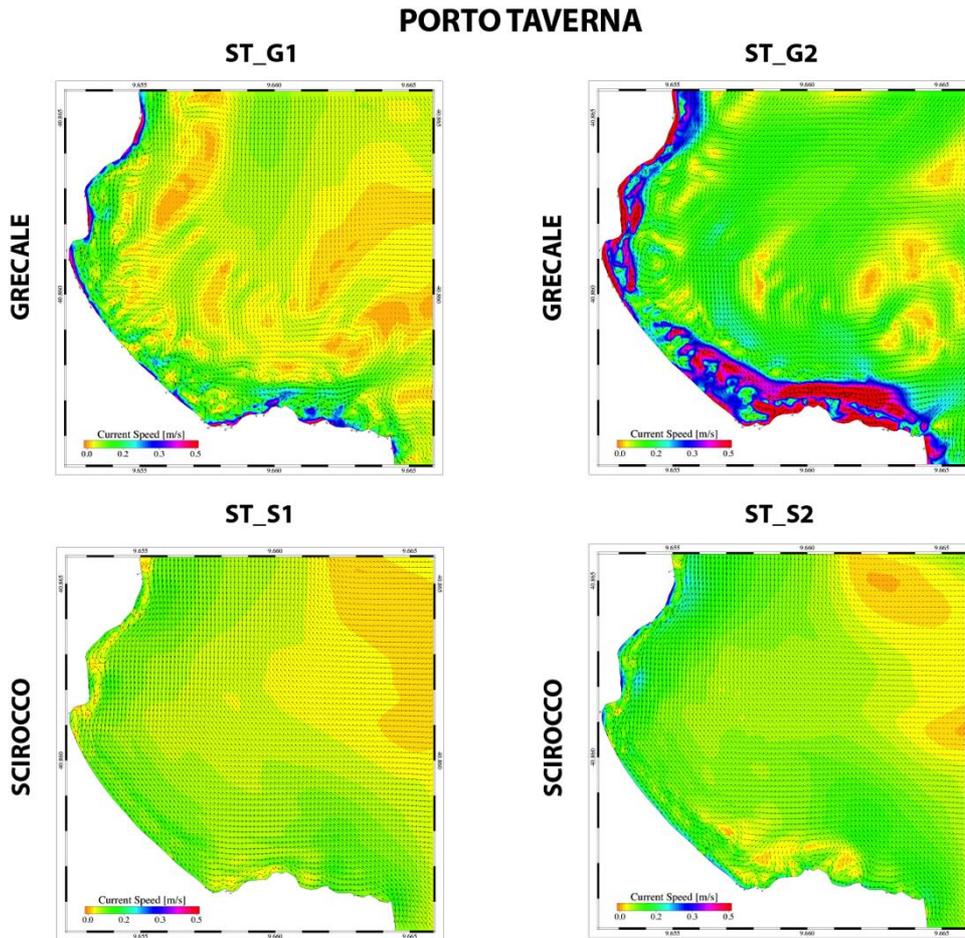


FIGURE 21 : la tendance spatiale du courant moyen dans la zone de Porto Taverna obtenue pour les 4 scénarios simulés au moment de l'énergie maximale de la vague incidente

Comme indiqué au paragraphe 5.2.2, le **TRANSPORT** dû aux courants, partiellement décrit ci-dessus, ne peut avoir lieu que si les feuilles de PO sont entraînées dans l'eau par l'action de la montée des vagues sur le rivage. Ce processus d'**IMMERSION**, calculé selon la procédure décrite au paragraphe 5.2.2, se produit lorsque la distance maximale atteinte à terre (DMS) de la vague incidente dépasse 2 m du rivage.

La figure 22 montre, pour les scénarios du Grec, les tendances temporelles de la SWH calculée en un point situé devant le littoral et les tendances correspondantes de la distance au rivage (DMS) atteinte par les vagues du rivage. Il est à noter que pour le scénario ST_G1, l'immersion, et donc l'activation du processus de transport, a lieu environ 6 heures après le début de l'événement. Dans le cas du

scénario ST_G2, caractérisé par un mouvement de vague plus intense, le début de la simulation du transport des feuilles d'PO se produit après seulement 3 heures à partir du début de la simulation. Dans le premier cas, le rejet de particules dans la mer dure environ 18 heures jusqu'à ce que la hauteur maximale des vagues soit atteinte et que le mouvement des vagues soit réduit en conséquence, tandis que dans ST_G2, le transport est simulé pendant une durée égale à environ 21 heures.

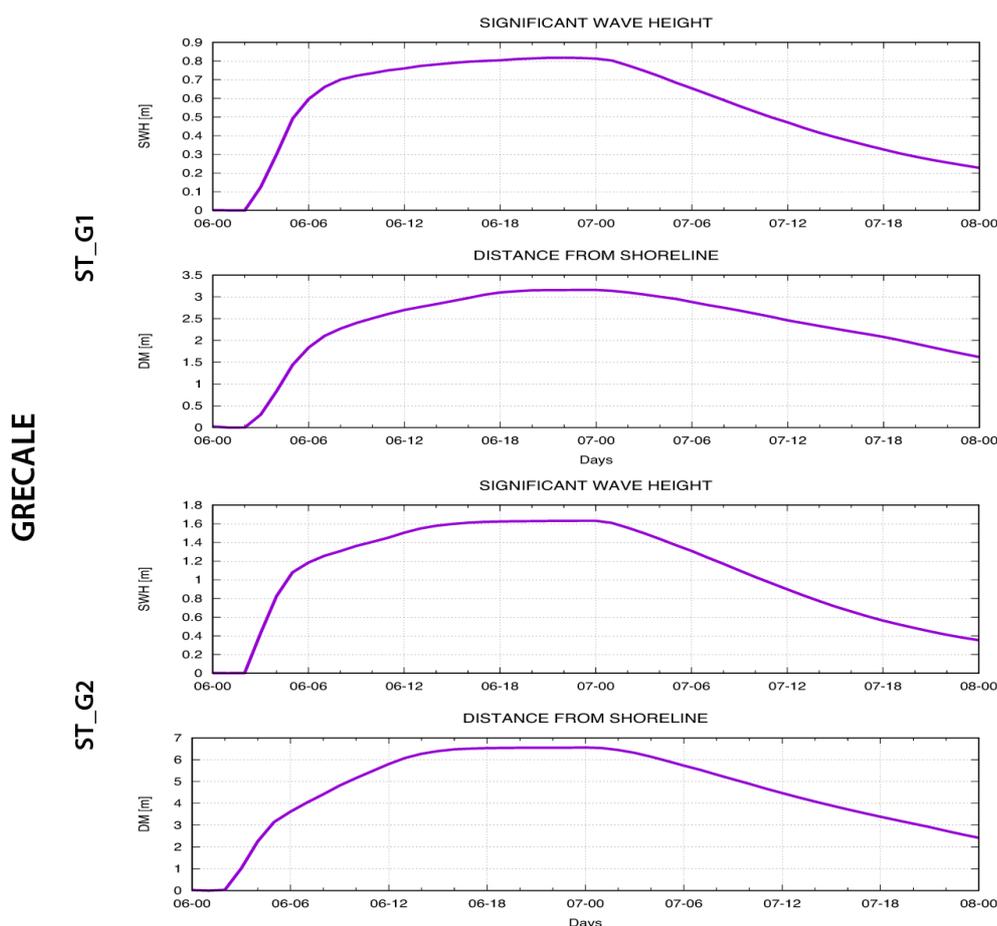


FIGURE 22: la tendance temporelle de la SWH pour un point devant Porto Taverna et la distance maximale atteinte par la vague sur le rivage pour 2 scénarios stationnaires de Grec.

Pour les scénarios Sirocco, la figure 23 montre les tendances de la CES et de la DMS au fil du temps. Notez que pour le scénario ST_S1, la distance maximale des vagues par rapport au rivage n'atteint jamais le seuil d'immersion de 2 m. Par conséquent, pour ce scénario, il n'y a pas d'activation du processus de transport des particules par les courants. Pour le scénario ST_S2, l'immersion et donc l'activation du processus de transport se produit environ 15 heures après le début de

l'événement. Dans ce cas, la libération continue des particules dans la mer dure environ 12 heures jusqu'à ce que la hauteur maximale des vagues soit atteinte.

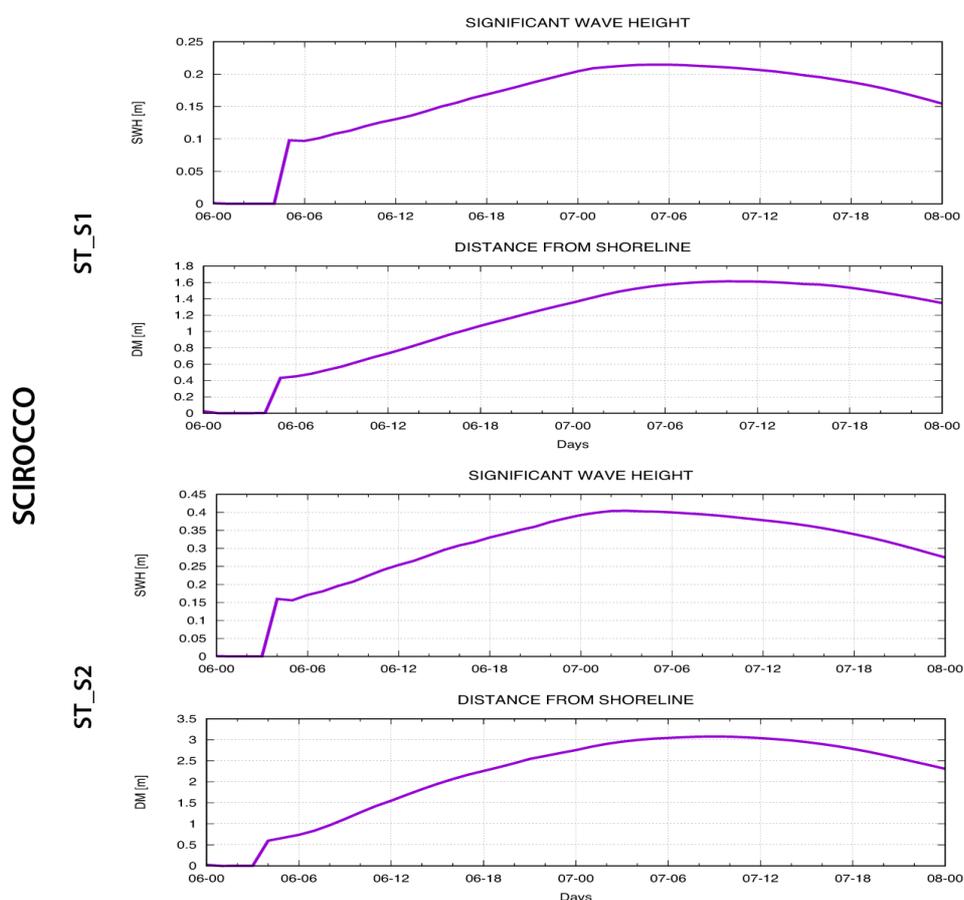


FIGURE 23: l'évolution temporelle de la SWH pour un point situé devant Porto Taverna et la distance maximale atteinte par la vague sur le rivage pour les 2 scénarios stationnaires du Sirocco.

Pour les scénarios où l'immersion des particules se produit, comme décrit au point 5.2.2, le processus de transport, le processus de dépôt et la remise en suspension des feuilles de PO sont simulés. La position et la profondeur le long de la colonne d'eau sont calculées pour chaque particule rejetée en continu dans les éléments de la grille de calcul au niveau du rivage. La distance par rapport au rivage est calculée pour chaque particule déposée et la position initiale de son rejet est enregistrée. Ensuite, pour chaque élément de la grille de calcul adjacent au rivage, on a associé la distance moyenne du rivage calculée en considérant toutes les particules qui y sont relâchées et qui se sont ensuite déposées au fond pendant la simulation.

La figure 24 montre, pour chaque scénario stationnaire, les distributions des distances moyennes du rivage atteintes par les particules une fois déposées au fond.

Pour les deux scénarios du Grec, un gradient Nord-Sud négatif est évident dans la distribution des distances moyennes le long du littoral, avec des valeurs maximales à l'extrême Nord-Ouest et des valeurs minimales à l'extrême Sud-Est de la plage. Pour les scénarios Sirocco, la situation est différente, avec l'absence de conditions d'immersion favorables dans le cas de ST_S1 et une distribution presque homogène, à l'exception d'un maximum relatif dans l'extrême nord-ouest, des distances moyennes le long du littoral dans le cas de ST_S2.

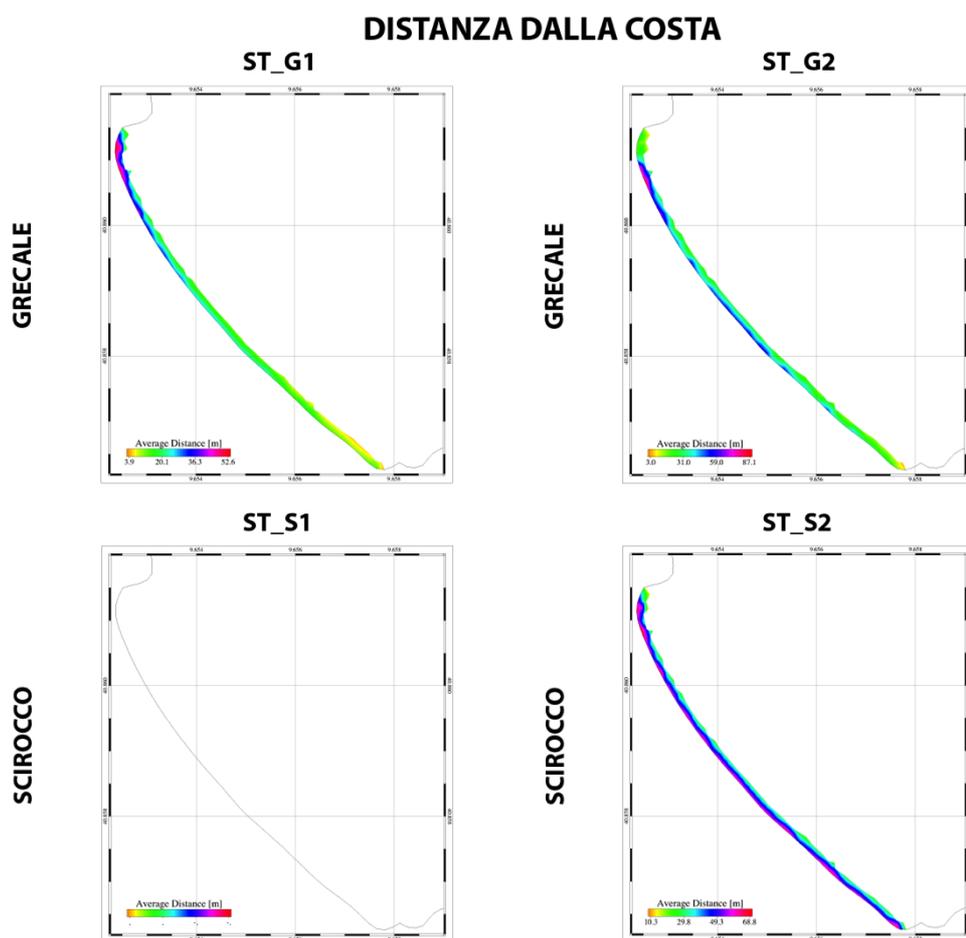


FIGURE 24: la distribuzione des distances moyennes parcourues par les particules rejetées le long du rivage jusqu'à leur dépôt au fond pour l'étude de cas de Porto Taverna pour les 4 scénarios

La figure 25 montre, pour chaque scénario stationnaire, les distributions de la densité moyenne des particules déposées au fond pendant toute la simulation. Comme on peut le voir, dans le cas du Grec, malgré la similarité des distributions de distances moyennes, le dépôt se produit de différentes façons. Dans le premier cas, ST_G1, 2 maxima relatifs sont évidents. L'un en correspondance de la partie centrale de la plage, où l'on relève la convergence entre le flux sud au nord et le flux nord au sud, l'autre en correspondance du centre de la cellule de circulation dans la partie sud de la côte. Dans le cas de ST_G2, les résultats numériques montrent la présence d'une accumulation de particules déposées uniquement à l'extrémité sud de la plage. Pour le scénario du Sirocco ST_S2, la situation est inverse, la plupart des particules se déposant dans la partie nord de la plage.

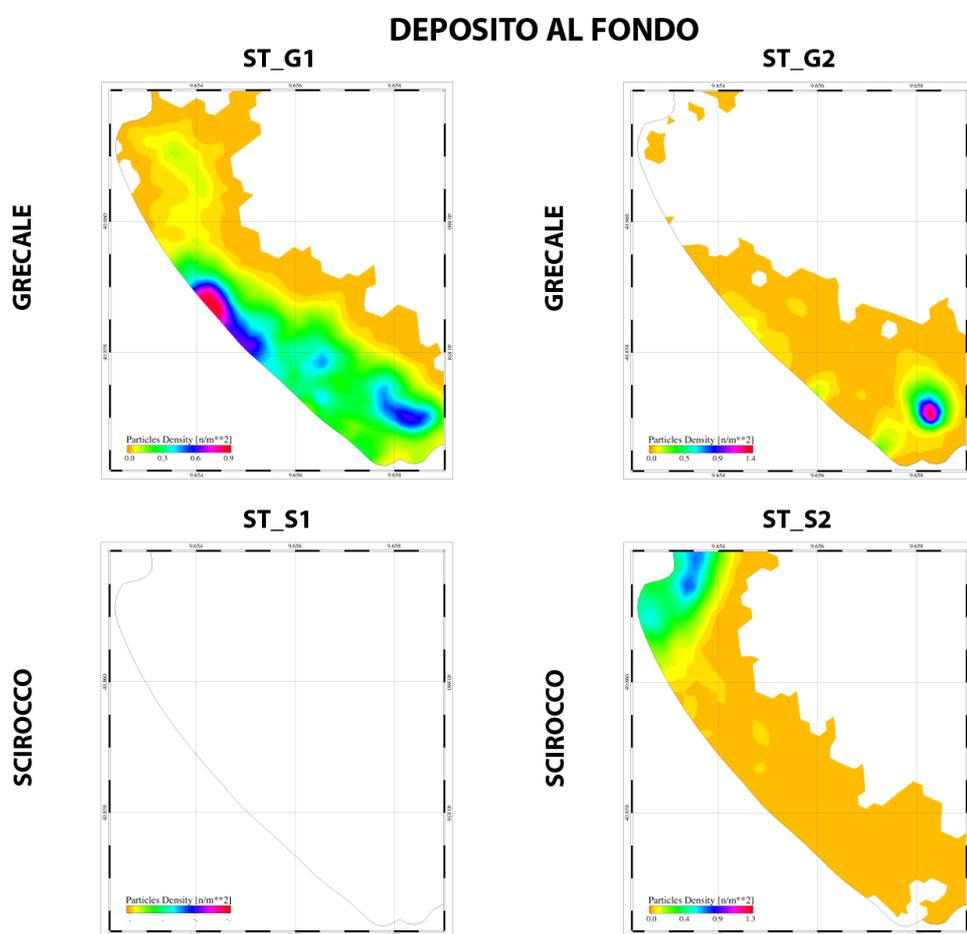


FIGURE 25: la distribution de la densité moyenne des particules déposées au fond pour l'étude de cas de Porto Taverna pour les 4 scénarios

Afin de fournir une indication des zones à partir desquelles les feuilles de PO, une fois submergées, atteignent les plus grandes distances du littoral, les ensembles de données décrits par les panneaux de la figure 24 ont été normalisés et une moyenne pondérée a été faite en considérant les distributions de fréquence de tous les scénarios météo-marins étudiés. Les poids à associer à chaque distribution, pour le calcul de la moyenne, ont été obtenus en considérant les fréquences des événements réels correspondant pour la direction et l'intensité aux scénarios stationnaires simulés (voir tableaux 1 et 2).

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 26 et indiquent, selon une échelle relative entre 0 et 1, les zones du littoral les plus appropriées pour le rejet des feuilles de PO à transporter, une fois submergées, loin du rivage. Le panneau de la figure 26 montre qu'en moyenne, les feuilles de PO, une fois submergées, atteignent de plus grandes distances du rivage si elles sont relâchées dans les zones nord du rivage.

Cette évaluation prend en considération les 4 scénarios météo-marins étudiés et est basée sur les résultats obtenus à partir de la simulation des processus de transport et de dépôt qui ont lieu une fois que les feuilles de PO sont immergées. Tous les processus qui affectent la probabilité d'immersion des feuilles, tels que la variabilité spatiale de la pente du littoral et la conformation de la plage et la présence de bermes ne sont pas pris en compte.

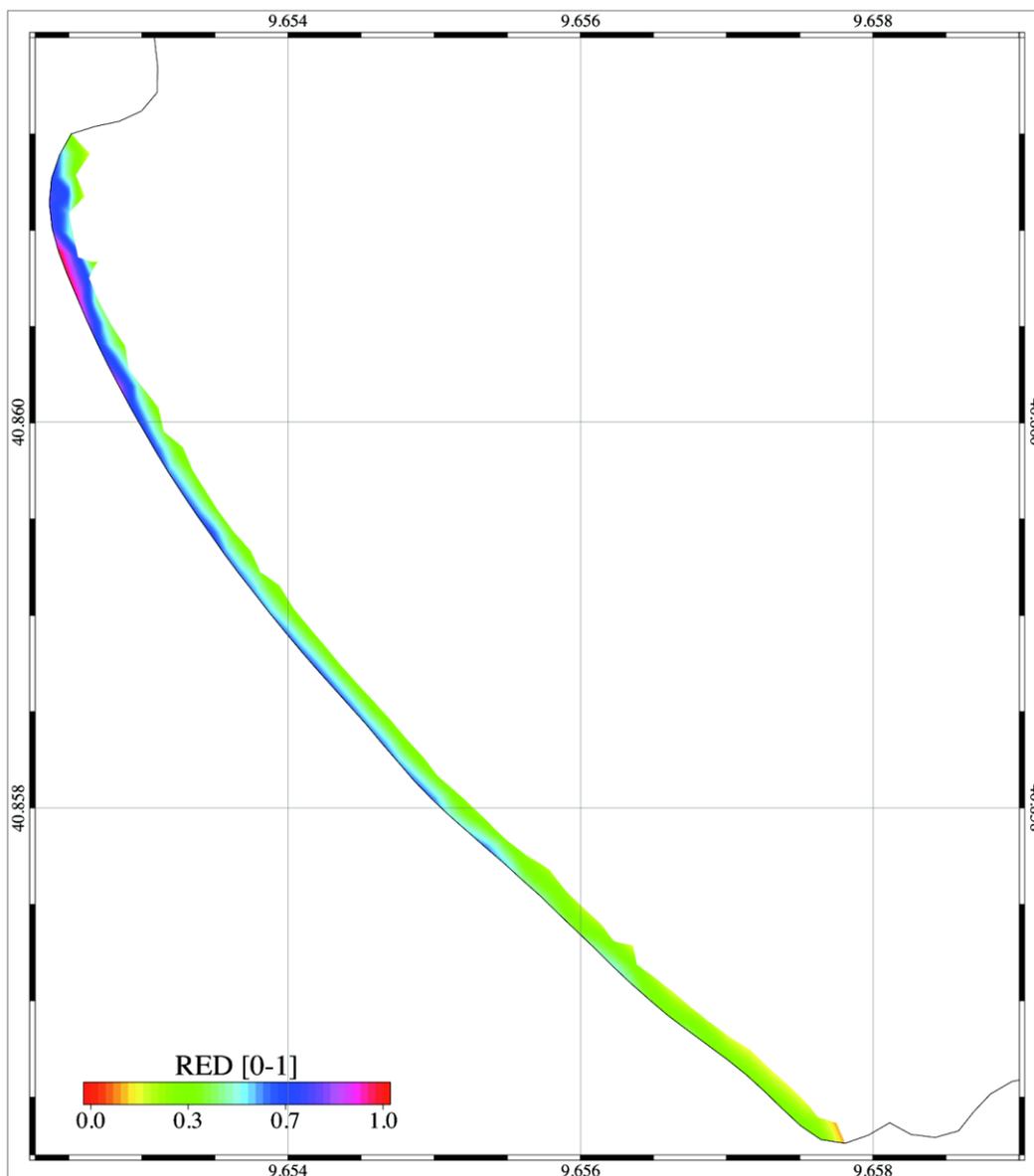


FIGURE 26: la distribution moyenne normalisée sur l'ensemble des scénarios considérés des distances moyennes parcourues par les particules rejetées le long du littoral jusqu'au moment de leur dépôt au fond pour l'étude de cas de Porto Taverna

5.1.2. CALA BRANDINCHI

La figure 27 montre la tendance spatiale de la SWH et de la DIR dans la zone étendue devant la plage de Cala Brandinchi au moment de l'intensité maximale du mouvement des vagues pour les 4 scénarios stationnaires considérés. Dans le cas des événements Grec, tant pour ST_G1 que ST_G2, la conformation de la côte permet une couverture partielle de la zone d'intérêt à partir de l'action directe du mouvement de la vague NE. Au contraire, dans le cas des événements du Sirocco,

tant pour ST_S1 que pour ST_S2, la direction d'origine du mouvement de la vague et la conformation de la côte ne permettent aucun abri de l'action directe des vagues sur la zone d'intérêt. Dans les deux scénarios, la plage de Cala Brandinchi est directement affectée par le mouvement des vagues d'origine SE.

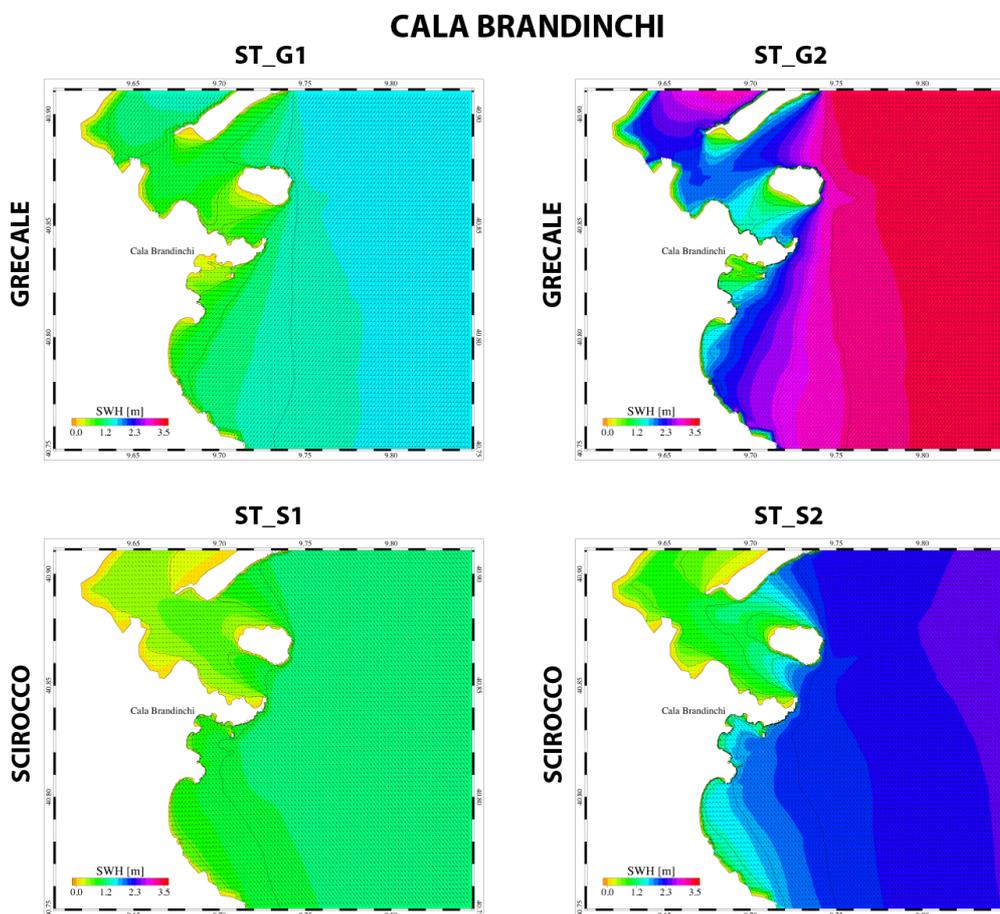


FIGURE 27: la tendance spatiale de la SWH dans la zone hors Cala Brandinchi pour les 4 scénarios stationnaires, obtenue pour le moment de puissance maximale

La figure 28 montre les tendances de la SWH et de la DIR telles que décrites dans la figure 27 pour la zone située devant la plage de Cala Brandinchi. Comme on peut le voir, dans les deux scénarios de Grec, la propagation du mouvement des vagues, bien que dirigée perpendiculairement au littoral à cause des processus de réfraction, ne permet pas d'atteindre des hauteurs de vague, près de la plage, supérieures à un mètre. Au contraire, pour les deux événements du Sirocco, le mouvement de la vague se propage à l'intérieur de la baie avec des hauteurs de

vague élevées même près du rivage où, pour le scénario le plus énergétique, il y a des hauteurs encore plus élevées qu'un mètre.

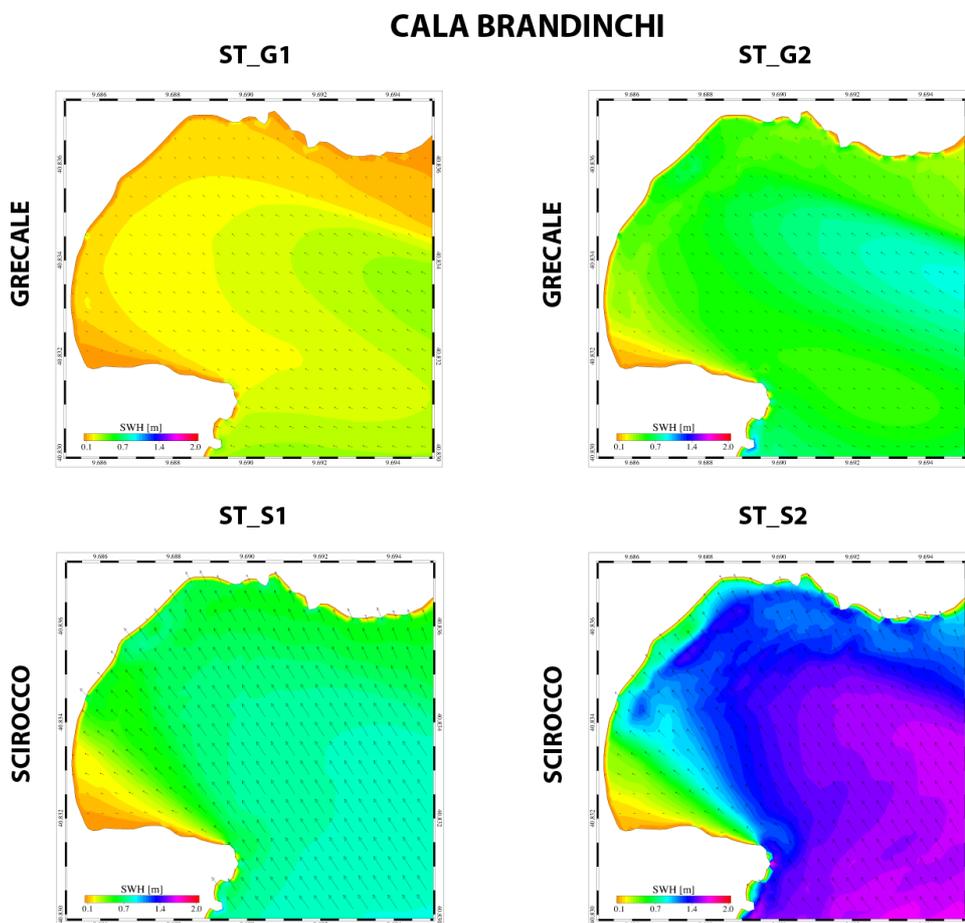


FIGURE 28: la tendance spatiale de la SWH dans la zone de Cala Brandinchi pour les 4 scénarios stationnaires, obtenue pour le moment de puissance maximale

La figure 29 montre, pour les 4 scénarios stationnaires, la tendance spatiale de la circulation verticale moyenne de l'eau dans la partie de mer qui fait face à la plage de Cala Brandinchi au moment de l'intensité maximale du mouvement des vagues correspondant à la fin de la première journée de simulations.

Dans le cas de Grec, le scénario ST_G1, bien que les processus de réfraction permettent l'atteinte partielle de la baie par le mouvement des vagues, les structures de circulation d'intensité pertinente ne sont pas appréciables. Dans ce cas, la circulation dans la baie et à proximité du littoral est principalement induite par l'action du vent qui génère un flux sud qui chevauche la côte. Ce n'est que près

de l'extrémité sud de la plage, à la suite de l'impact direct du mouvement des vagues, qu'une structure anticyclonique est générée, caractérisée par des courants d'intensité réduite. En ce qui concerne le scénario ST_G2, à la suite d'une augmentation de l'énergie du mouvement incident des vagues et de l'intensité du vent, une structure de circulation d'intensité moyenne est générée. Comme dans le cas précédent, le vent du Grec génère un flux à prédominance sud dans une grande partie de la baie avec des valeurs d'intensité même supérieures à 25 cm/s. Dans ce cas, en outre, l'action des processus dissipatifs induit la génération de cellules de circulation côtière caractérisées, dans certaines zones, par une forte intensité de courant même supérieure à 40 cm/s. En particulier, il est possible d'identifier 2 cellules de macro-circulation qui, depuis les extrêmes de la plage, convergent vers la zone centrale de la plage où il y a la présence d'une série de courants de *rip*.

En ce qui concerne les scénarios de Sirocco, la circulation de l'eau, résultant de l'action directe du mouvement des vagues, est caractérisée par une intensité plus élevée que dans les cas de Grec. En particulier, tant pour ST_S1 que ST_S2, la partie externe de la baie est caractérisée par la présence d'une macro-cellule de circulation de type cyclonique générée par l'action directe du vent et l'action des processus de dissipation du mouvement des vagues le long de la côte exposée aux événements du Sirocco, dans la partie nord de la baie. En ce qui concerne la partie la plus proche du littoral, tant dans le cas de ST_S1 que dans celui de ST_S2, plusieurs cellules de circulation sont identifiées avec une intensité de flux variable selon le scénario et qui, dans le cas de ST_S2, peut atteindre même 50 cm/s en correspondance des courants de *rip*.

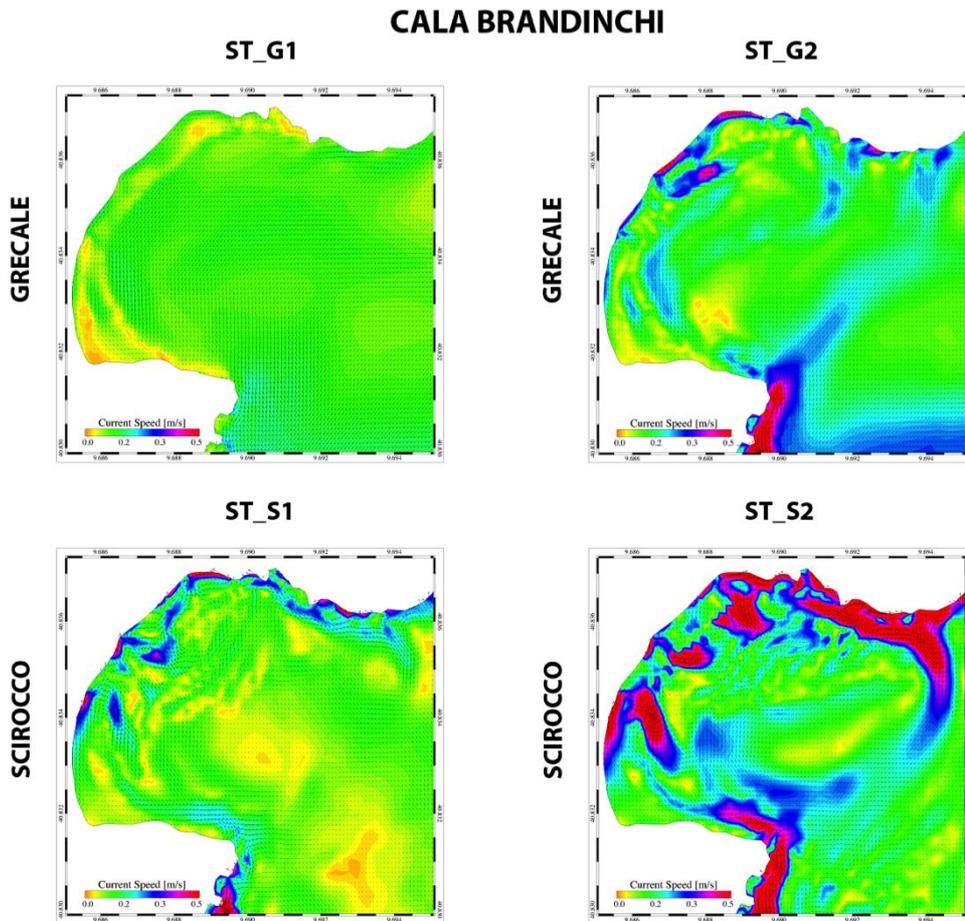


FIGURE 29: la tendenza spaziale del corrente medio nella zona di Cala Brandinchi ottenuta per i 4 scenari simulati al momento dell'energia massima della onda incidente

La figura 30 mostra, per gli scenari del Greco, le tendenze temporali della SWH calcolata in un punto situato davanti al rivage e le tendenze corrispondenti delle distanze dal rivage raggiunte dalle onde a terra, DMS. È importante notare che l'attivazione del processo di trasporto per i DMS superiori a 2 m, non si verifica solo per lo scenario ST_G2 e dopo circa 8 ore dal momento dell'evento. In questo caso, la liberazione continua delle particelle in mare dura circa 16 ore fino a quando la massima altezza delle onde non è raggiunta. Per lo scenario ST_G1, a causa della bassa intensità del movimento delle onde, le particelle lungo la costa non possono essere sottoposte ai processi di trasporto e di deposito.

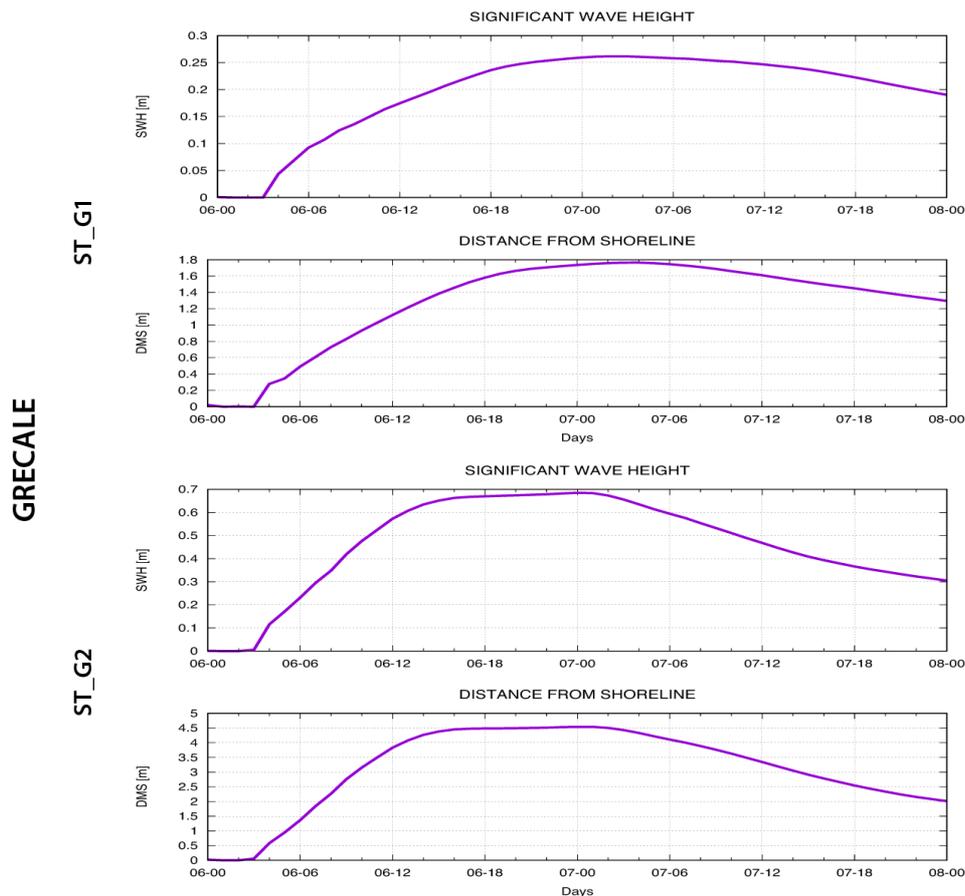


FIGURE 30: l'evoluzione temporale de la SWH pour un point situé devant Cala Brandinchi et la distance maximale atteinte par la vague sur le rivage pour les 2 scénarios stationnaires de la Grec.

Pour les scénarios du Sirocco, les tendances de la SWH et de la DMS au fil du temps sont présentées à la figure 31. Il est à noter que pour le scénario ST_S1, l'immersion, et donc l'activation du processus de transport, a lieu environ 10 heures après le début de l'événement. Dans le cas du scénario ST_S2, caractérisé par un mouvement de vague plus intense, le début de la simulation du transport des feuilles de PO a lieu seulement 5 heures après le début de l'expérience. Dans le premier cas, le rejet de particules dans la mer dure environ 14 heures jusqu'à ce que la hauteur maximale des vagues soit atteinte et que le mouvement des vagues soit réduit, tandis que dans ST_S2, le transport est simulé pendant environ 19 heures.

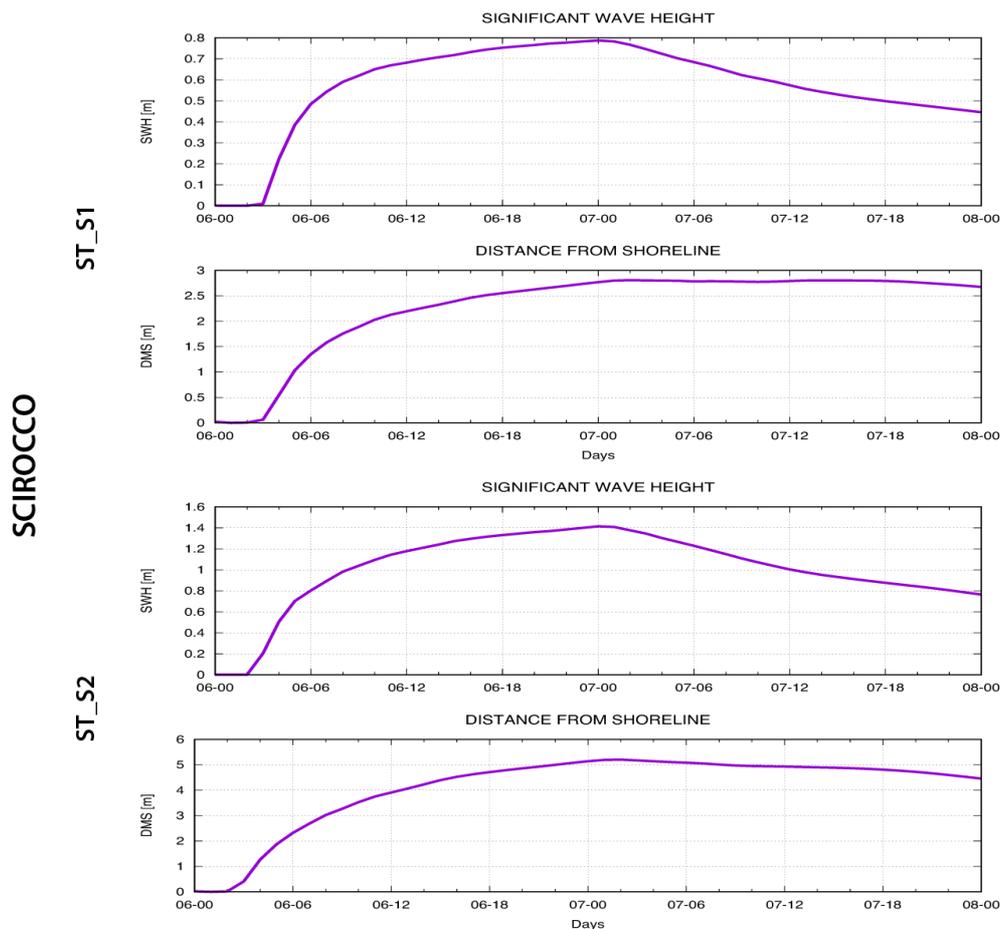


FIGURE 31: la tendenza temporale de la SWH per un point situé devant Cala Brandinchi et la distance maximale atteinte par la vague sur le rivage pour les 2 scénarios stationnaires du Sirocco.

La figure 32 montre, pour chaque scénario stationnaire, les distributions des distances moyennes du rivage atteintes par les particules une fois déposées au fond, DM. Pour les scénarios du Grec, en raison de l'absence de conditions d'immersion favorables dans le cas de ST_G1, seul le transport des particules a été simulé pour ST_G2 et la distribution des distances moyennes du littoral, DM, qui est caractérisée par des valeurs maximales à l'extrémité nord et des valeurs minimales à l'extrémité sud de la plage, a été cartographiée. En ce qui concerne les scénarios Sirocco, dans les deux cas, l'immersion des particules et le calcul des distances atteintes ont été effectués. La répartition, tant pour ST_S1 que ST_S2, est similaire à la précédente dans la partie nord, avec un maximum relatif dans

l'extrême nord-est, mais diffère pour la partie sud, caractérisée par une augmentation relative de la distance moyenne atteinte à l'extrême sud.

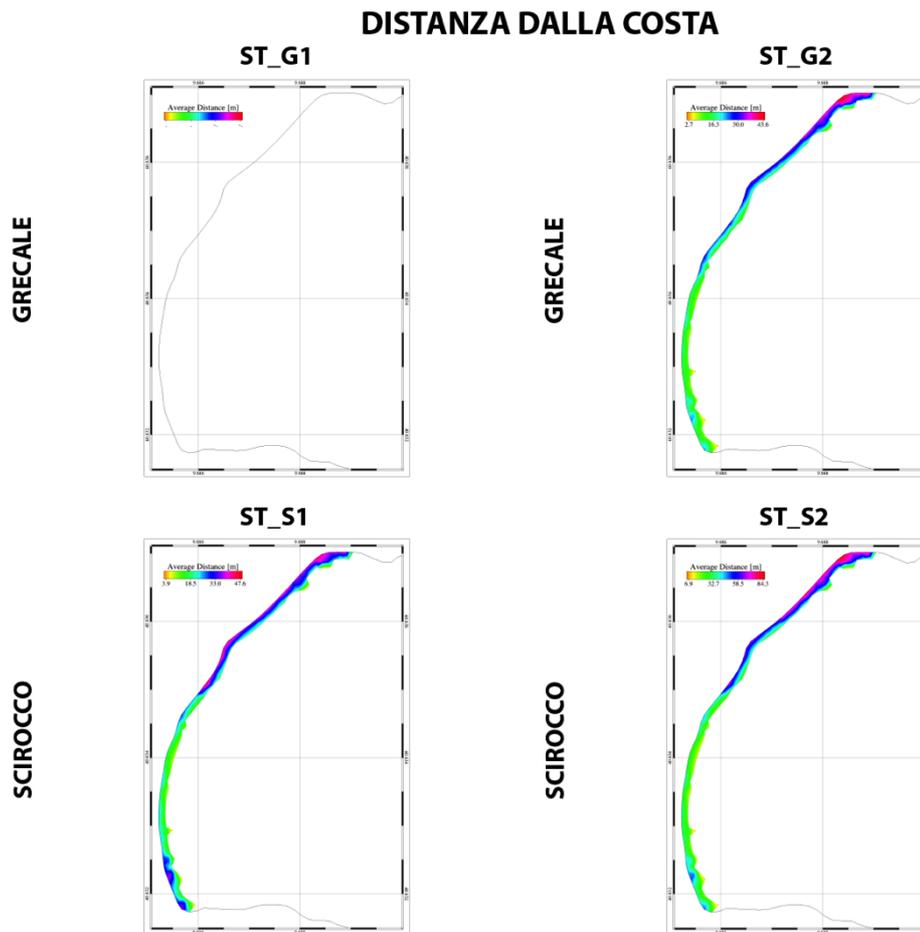


FIGURE 32: la distribution des distances moyennes parcourues par les particules rejetées le long du rivage jusqu'au moment de leur dépôt au fond pour l'étude de cas de Cala Brandinchi pour les 4 scénarios

La figure 33 montre, pour chaque scénario stationnaire, les distributions de la densité moyenne des particules déposées au fond pendant toute la simulation. Comme on peut le voir, pour le seul cas du Grec, pour lequel le calcul du transport de particules a été effectué, le dépôt s'est produit principalement à l'extrémité sud de la baie en correspondance de la convergence entre la cellule de circulation horaire et le littoral. Pour les scénarios Sirocco, dans le premier cas, ST_S1, 2 maxima relatifs sont évidents près du littoral et en correspondance aux fronts générés par les courants de retour. Dans le second cas, ST_S2, où la circulation est

plus intense, le dépôt s'est produit à une plus grande distance du rivage, toujours en correspondance des fronts générés par les courants de *rip*.

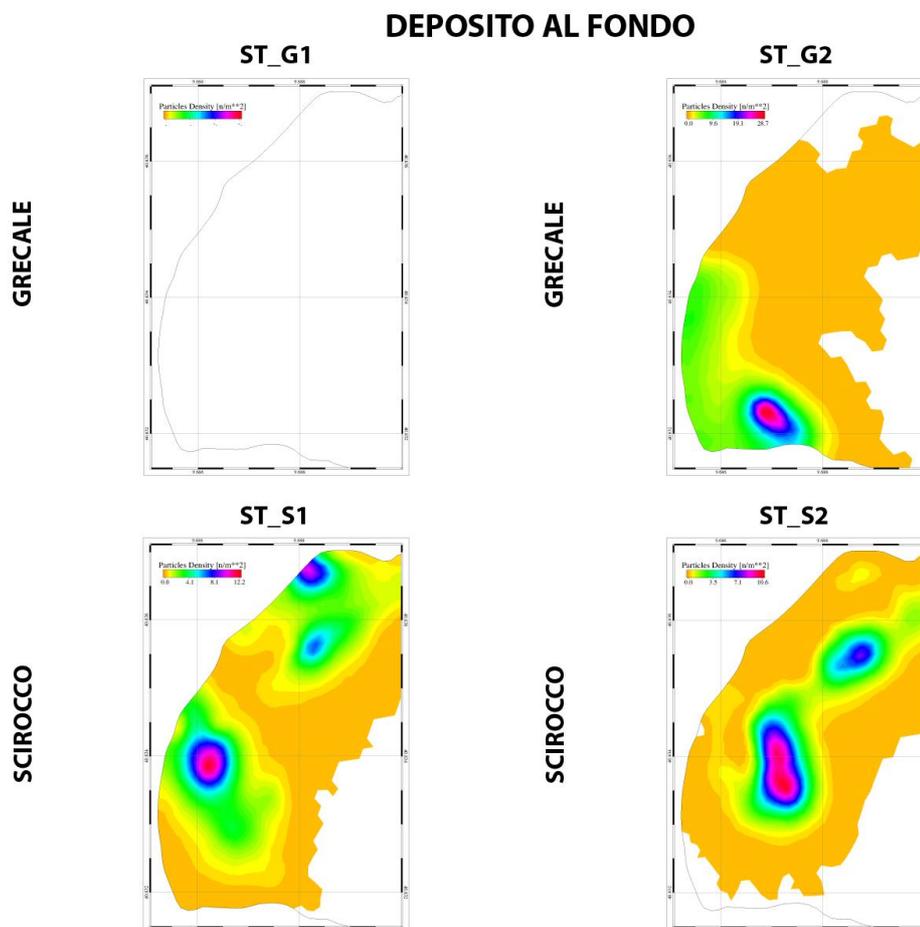


FIGURE 33: la distribution de la densité moyenne des particules déposées au fond pour l'étude de cas de Cala Brandinchi pour les 4 scénarios

Comme dans le cas précédent, afin de fournir une indication des zones à partir desquelles les feuilles de PO, une fois submergées, atteignent les plus grandes distances du rivage, les ensembles de données décrits par les panneaux de la figure 32 ont été normalisés et une moyenne pondérée a été faite en considérant tous les scénarios météo-marins étudiés. Dans ce cas également, les poids à associer à chaque distribution pour le calcul de la moyenne ont été obtenus en considérant les fréquences des événements réels correspondant, pour la direction et l'intensité, aux scénarios stationnaires simulés (voir tableaux 1 et 2).

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 34 et indiquent que, en moyenne, les feuilles de PO, une fois submergées, atteignent de plus grandes distances du

littoral si elles sont relâchées à la fois dans les zones centre-nord de la côte et à l'extrémité sud de la plage.

Dans ce cas également, tous les processus qui influencent la probabilité d'immersion des feuilles, tels que la variabilité spatiale de la pente du rivage et la conformation de la plage, la présence de bermes, ne sont pas pris en compte.

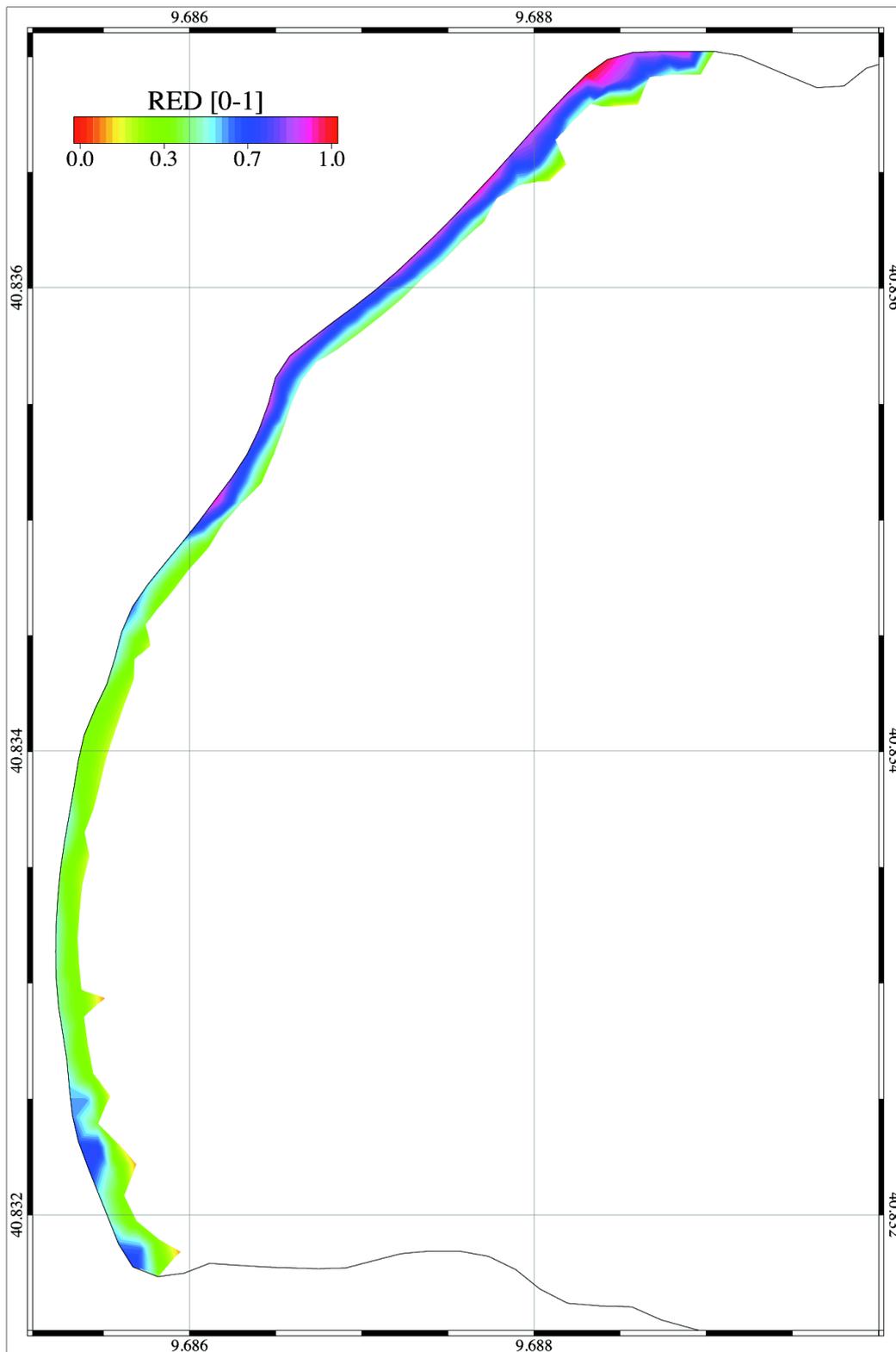


FIGURE 34: la distribuzione moyenne normalisée sur tous les scénarios envisagés des distances moyennes parcourues par les parcelles libérées le long du rivage jusqu'au moment de leur dépôt au fond pour l'étude de cas de Cala Brandinchi

5.2. DES SCÉNARIOS RÉALISTES

Compte tenu des résultats obtenus à partir des scénarios stationnaires et de l'impossibilité d'effectuer une analyse de modélisation pour tous les régimes et les gammes de vagues indiqués dans les tableaux 1 et 2, 6 scénarios ont été identifiés pour les 2 régimes Grec et Sirocco. Pour les 6 scénarios réalistes, les intervalles de temps correspondants dans la décennie 2007-2017 pendant lesquels des événements d'intensité similaire ont été enregistrés et les agents de forçage anémométriques correspondants ont été utilisés pour simuler les processus de génération et de propagation du mouvement des vagues, la circulation de l'eau et le transport et le dépôt de la PO pour les 2 zones d'intérêt. Voici les résultats du modèle hydrodynamique et ondamétrique et les résultats du modèle de transport de feuilles de PO obtenus pour les scénarios réalistes pour les deux plages.

5.2.1. PORTO TAVERNA

La figure 35, dans les panneaux de gauche, montre les tendances de la SWH et de la DIR obtenues à partir de simulations numériques pour un point situé en dehors de la zone côtière d'intérêt pour tous les scénarios réalistes considérés. En particulier, pour tous les scénarios, les événements de houle pour lesquels le processus de transport est simulé commencent dès le 7^{ème} jour de la simulation. On peut voir que, contrairement aux scénarios stationnaires, la tendance des SWH et des DMS est irrégulière et caractérisée par plusieurs pics d'intensité tels que générés par une force réaliste d'intensité et de direction variable dans le temps et l'espace. Pour chaque scénario, l'événement considéré pour la simulation de transport correspond au premier pic de SWH à partir de 00:00 heures le 7^{ème} jour de la simulation. A titre d'exemple, pour la GC2, le pic de l'événement considéré correspond au maximum de SWH simulé à 00:00 heures de l'8^{ème} jour de simulation. Dans la même figure 35, panneaux de droite, nous reportons la tendance spatiale de la SWH et de la DIR dans la zone étendue devant la plage de Porto Taverna au moment de l'intensité maximale du mouvement de la vague pour chaque scénario stationnaire considéré. Comme pour les cas stationnaires précédents, dans les cas du Grec (GC1, GC2 et GC3), l'action du vent favorise la

propagation des trains de vagues à l'intérieur de la baie de la plage de Porto Taverna, tandis que dans les cas du Sirocco (SC1, SC2 et SC3), la morphologie de la côte ne permet pas l'action directe du mouvement des vagues à l'intérieur de la baie.

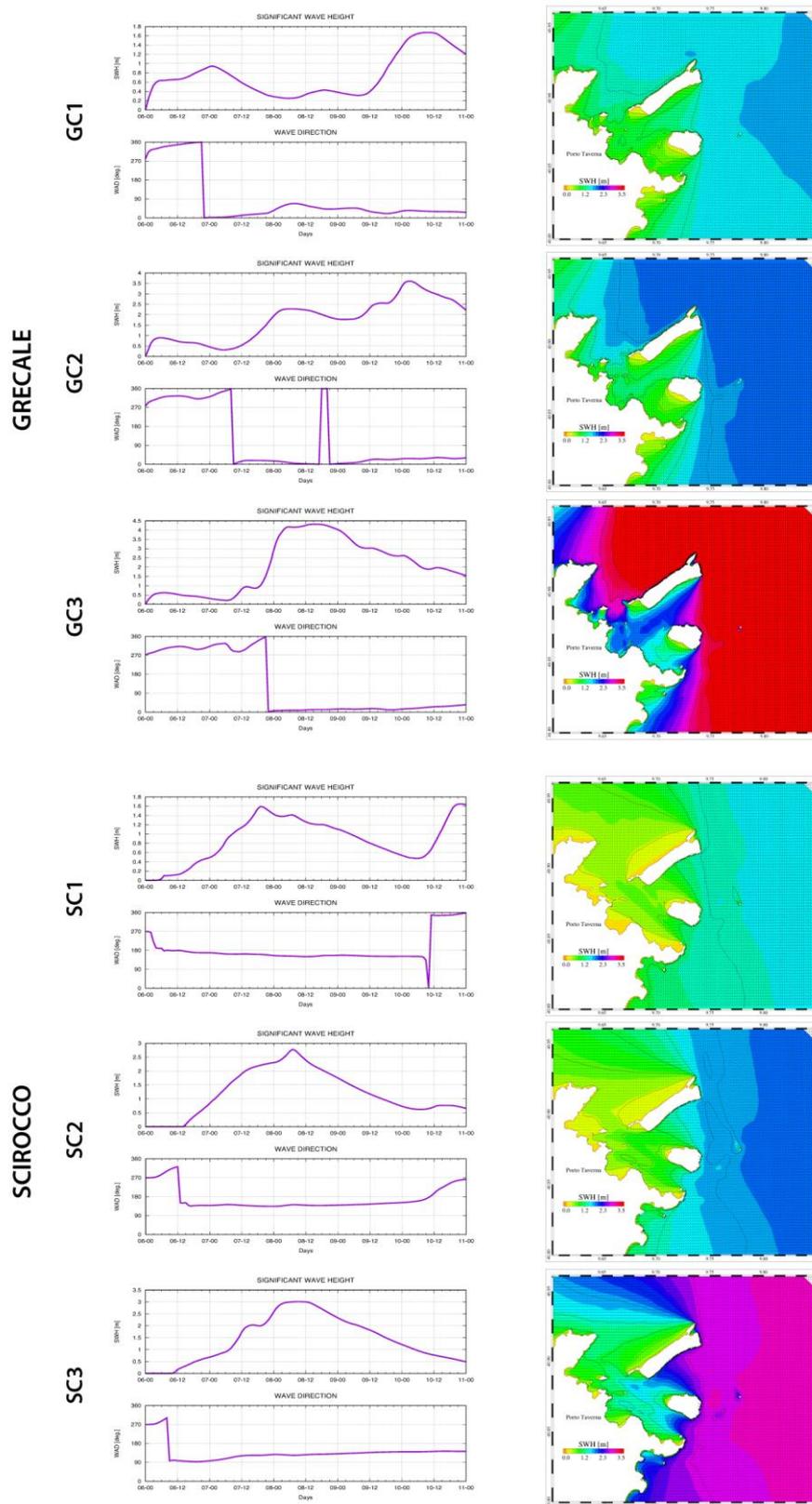
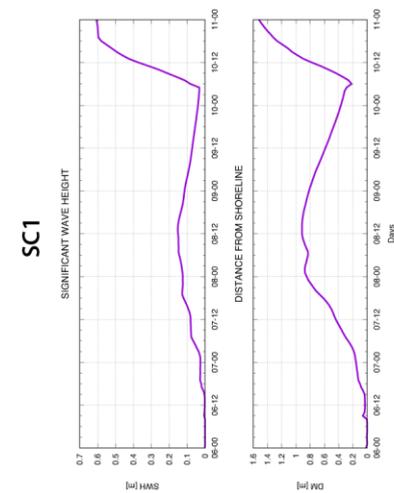
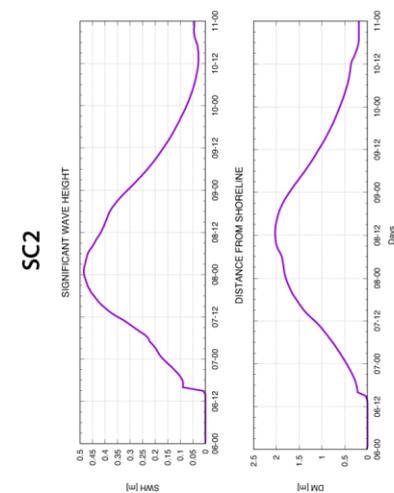
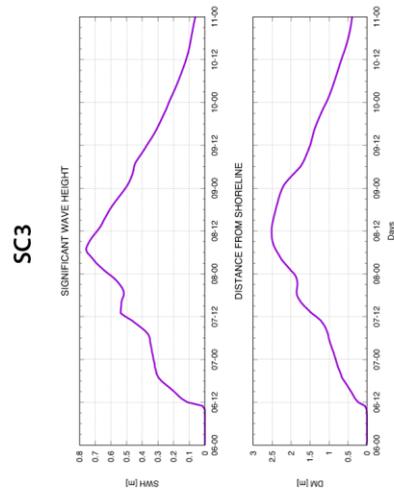
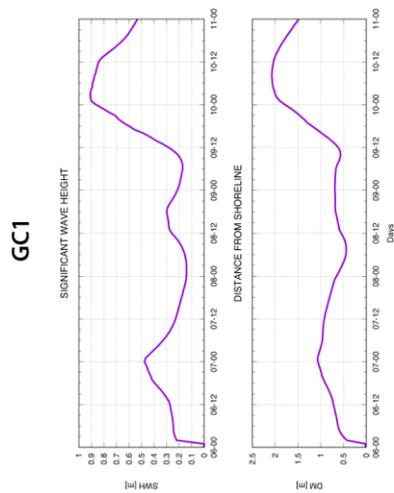
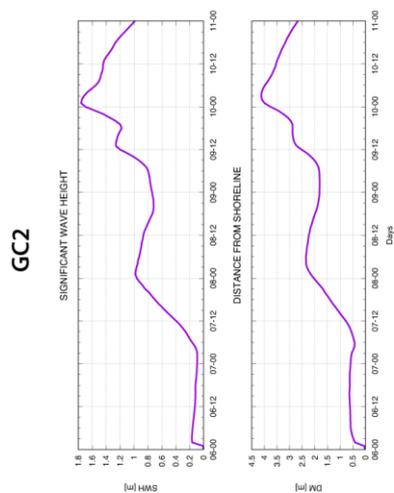
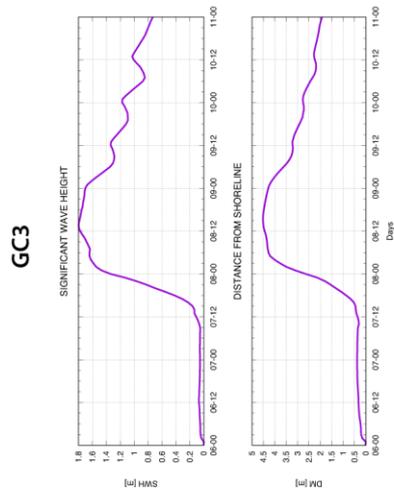


FIGURE 35: la tendenza temporale de la SWH e la direzione de l'origine du mouvement des vagues en haute mer (panneaux de gauche) et la distribution spatiale correspondante de la SWH dans la zone en dehors de Porto Taverna.

La figure 36 montre, pour tous les scénarios, les tendances temporelles de la SWH calculées en un point situé devant le littoral et les tendances correspondantes des distances DMS du littoral atteintes par les vagues à terre. Comme on peut le voir, pour le scénario GC1, la SWH atteinte près du littoral est d'intensité moyenne avec des valeurs inférieures à 1m. Pour les GC2 et GC3, les valeurs de la SWH sont respectivement de 1.6 m et 1.8 m. Pour les scénarios Sirocco, la SWH atteinte près de la côte est de faible intensité et toujours inférieure à 0,8 m. Ces élévations et périodes correspondent aux valeurs DM qui, dans le cas des scénarios GC1 et SC1, ne sont pas en mesure d'activer le processus de transport qui se produit pour les DMS supérieurs à 2. En revanche, pour les autres scénarios, GC2, GC3 et SC2, SC3, les valeurs DMS permettent l'immersion de la PO et donc la simulation des processus de transport. En particulier, les différentes tendances de la DM en fonction de la SWH pour les scénarios Sirocco indiquent un rôle décisif de la période de vague générée par le modèle dans la modulation du *run-up*. Au contraire, dans le cas de scénarios stationnaires, le forçage météorologique étant homogène et constant, une corrélation directe entre DMS et SWH est identifiée pour tous les cas considérés.



GRECALE

SCIROCCO

FIGURE 36: l'evoluzione temporale de la SWH pour un point situé devant Porto Taverna et la distance maximale atteinte par la vague sur la laisse.

La figure 37, panneaux de gauche et central, montre, pour chaque scénario réaliste du Grec (GC1, GC2 et GC3) et du Sirocco (SC1, SC2 et SC3), les tendances de la SWH et de la DIR et la tendance spatiale de la circulation verticale moyenne de l'eau dans la portion de mer faisant face à la plage de Porto Taverna au moment de l'événement d'intensité maximale considéré. Les panneaux de droite de la même figure montrent, pour les mêmes scénarios réalistes, les distributions des distances moyennes de DM, par rapport au rivage, atteintes par les particules une fois déposées au fond.

Pour les scénarios Grec, le mouvement des vagues à l'intérieur de la baie est dirigé perpendiculairement au littoral avec une SWH allant de valeurs inférieures à un mètre (GC1) à des valeurs supérieures à 2 mètres (GC3). Celles-ci correspondent à des champs de courant caractérisés, comme dans les cas stationnaires, par la présence d'un flux sud dans la partie nord et d'une cellule de circulation temporelle dans la partie sud du littoral. L'intensité et l'étendue de ces structures sont proportionnelles à l'intensité du mouvement de l'onde incidente. En ce qui concerne le DM, on y trouve également la répartition selon un gradient longitudinal avec des maximums au Nord et des minimums au Sud.

Pour les scénarios Sirocco, en raison des processus de réfraction, le mouvement de la vague se propage vers le rivage avec un angle aigu et des valeurs de SWH généralement inférieures à un mètre. Comme pour les cas stationnaires, la circulation de l'eau dans la baie est modulée par l'action directe du vent du Sirocco avec la formation d'une cellule dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Quant au DM, il y a, comme pour les cas stationnaires, une répartition homogène sur l'ensemble du littoral.

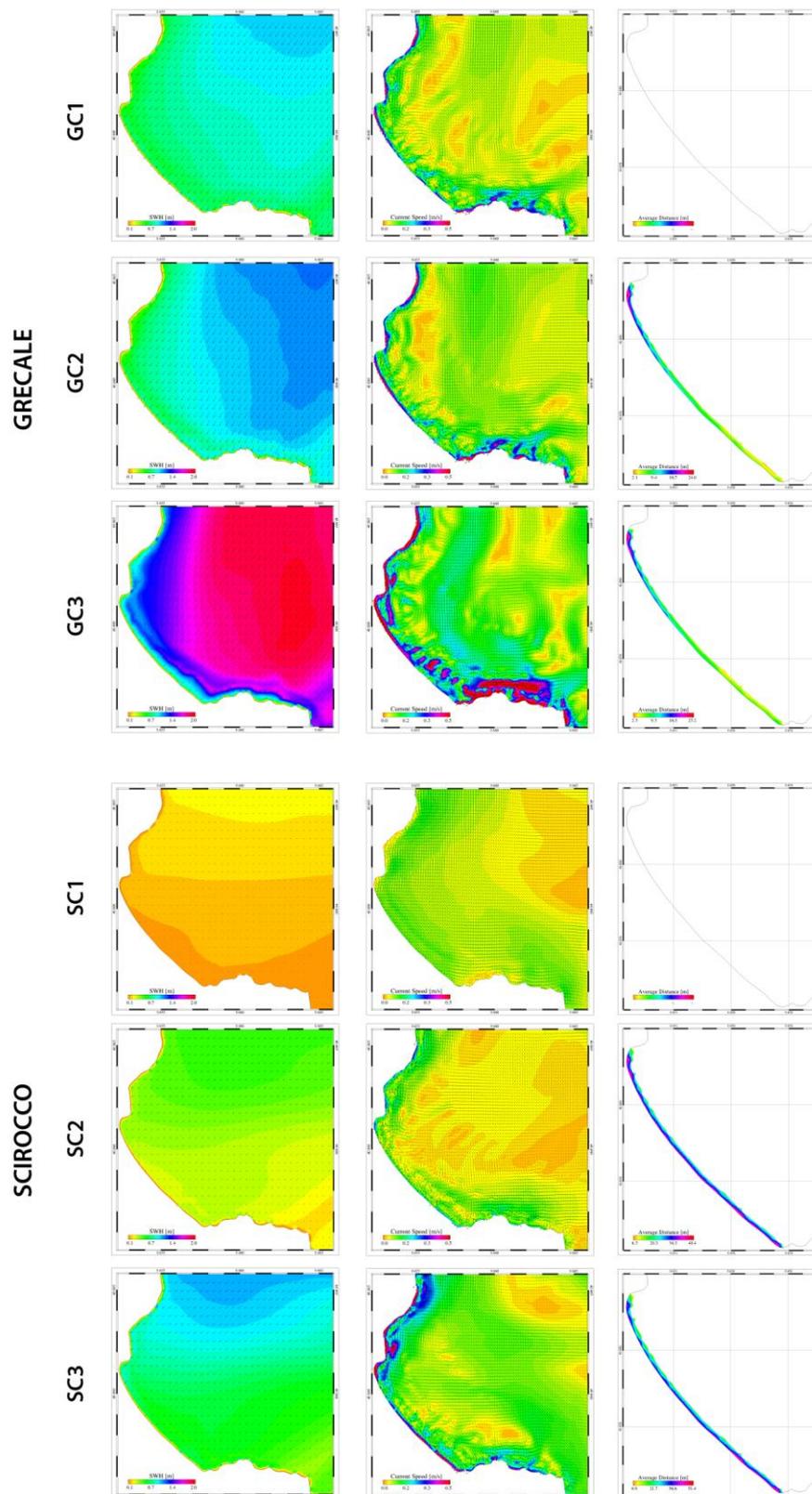


FIGURE 37 : la SWH (panneaux de gauche), la vitesse du courant (panneaux du centre) et la distribution des distances moyennes de DM parcourues par les particules (panneaux de droite) au moment du dépôt pour l'étude de cas de Porto Taverna

5.2.2. CALA BRANDINCHI

La figure 38, panneaux de gauche, montre les tendances de la SWH et de la DIR obtenues à partir de simulations numériques pour un point situé en dehors de la zone côtière d'intérêt pour tous les scénarios réalistes considérés.

Comme dans le cas précédent, et contrairement aux scénarios stationnaires, les tendances de la SWH et de la DM sont irrégulières et caractérisées par des pics d'intensité différents. Dans la même figure 35, panneaux de droite, la tendance spatiale de SWH et DIR dans la zone étendue devant la plage de Cala Brandinchi au moment de l'intensité maximale de chaque événement considéré est indiquée. Comme pour les cas stationnaires, dans le cas du Grec (GC1, GC2 et GC3), la morphologie de la côte ne permet pas l'action directe du mouvement des vagues à l'intérieur de la baie alors que, dans le cas du Sirocco (SC1, SC2 et SC3), l'action du vent favorise la propagation des trains de vagues à l'intérieur de la baie de la plage de Cala Brandinchi.

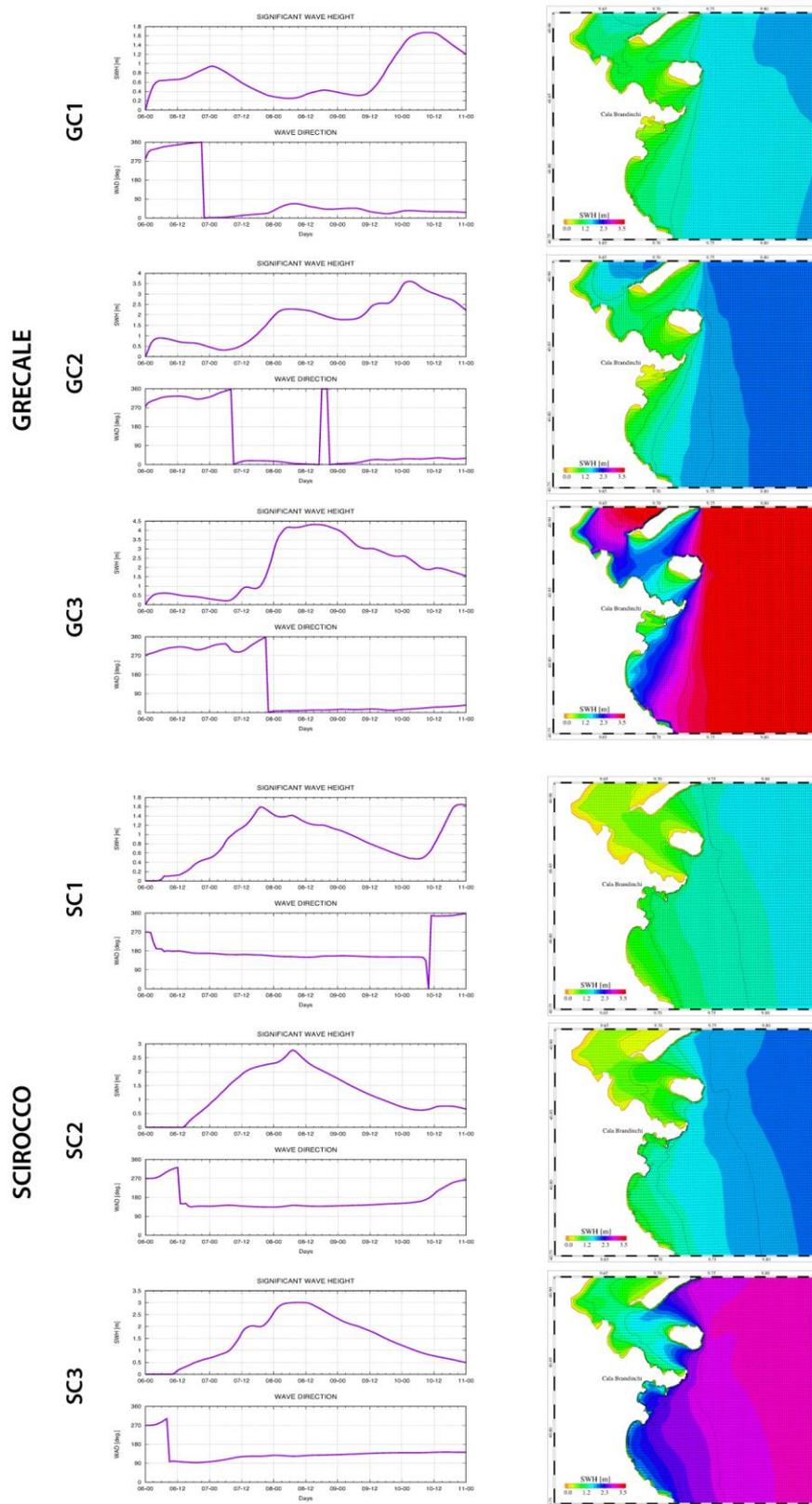
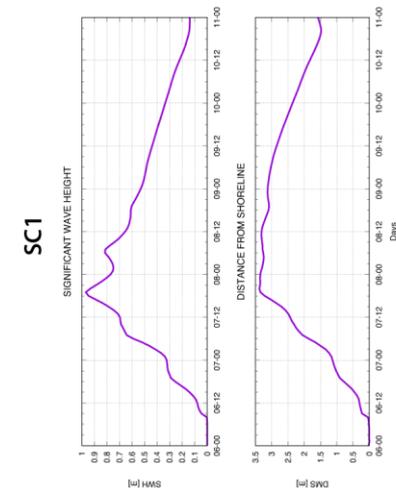
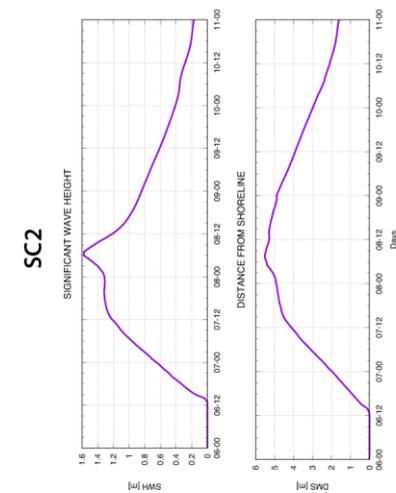
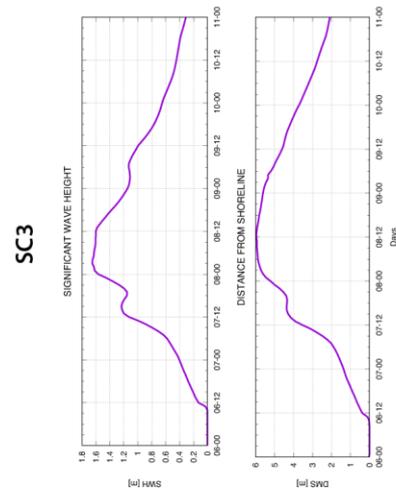
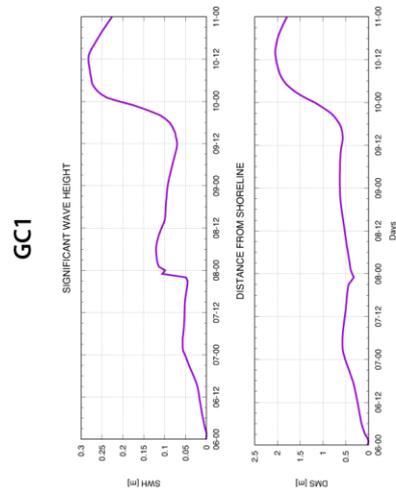
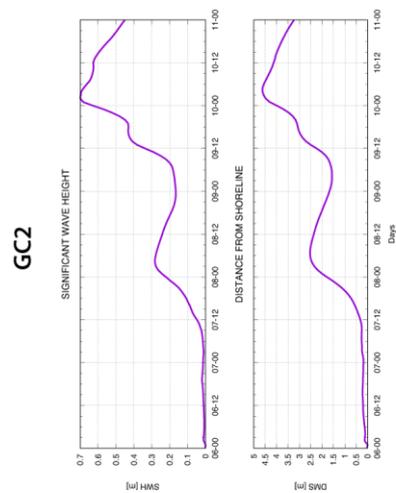
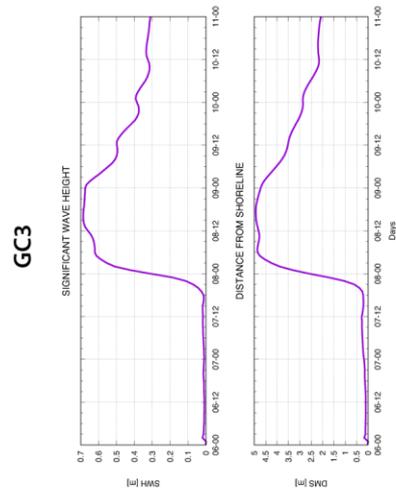


FIGURE 38 : la tendance temporelle de la SWH et la direction de l'origine du mouvement des vagues en haute mer (panneaux de gauche) et la distribution spatiale correspondante de la SWH dans la zone en dehors de Cala Brandinchi.

La figure 39 montre, pour tous les scénarios, les tendances temporelles de la SWH calculées en un point situé devant le rivage et les tendances correspondantes de la distance DM du rivage atteinte par les vagues au sol.

Pour les scénarios du Grec, la SWH atteinte près du littoral est de faible intensité avec des valeurs toujours inférieures à 1 m. Contrairement aux scénarios du Sirocco, la SWH atteinte près du littoral est de forte intensité et varie entre 1 m pour SC1 et environ 2 m pour SC2 et SC3. Ces élévations et ces périodes correspondent aux valeurs DM qui, pour tous les scénarios sauf SC1, permettent l'immersion de la PO.



GRECALE

SCIROCCO

FIGURE 39 : l'évolution temporelle de la SWH pour un point situé devant Cala Brandinchi et la distance maximale atteinte par la vague sur le rivage

La figure 40 montre, pour chaque scénario réaliste de Grec (GC1, GC2 et GC3) et de Sirocco (SC1, SC2 et SC3), les tendances de la SWH et de la DIR, la tendance spatiale des courants verticaux moyens et les distributions des distances moyennes de DM par rapport au rivage atteintes par les particules une fois déposées au fond.

Pour les scénarios Grec, le mouvement des vagues à l'intérieur de la baie est moyennement faible et, à l'exception du scénario GC3, ne peut pas induire de circulations côtières de forte intensité. Pour les GC1 et GC2, la circulation de l'eau dans la baie est modulée par l'action directe du vent du Sirocco avec la formation d'une cellule dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Dans le cas de la GC3, l'action directe du mouvement de la vague génère, comme dans le cas stationnaire, une macro-circulation externe et un courant côtier de moyenne-haute intensité caractérisé par 2 cellules de circulation convergeant au centre du littoral. En ce qui concerne le DM, il existe également dans ce cas une distribution le long d'un double gradient longitudinal avec des valeurs maximales au nord et au sud et des valeurs minimales au centre du littoral.

Pour les scénarios du Sirocco, le mouvement des vagues se propage à l'intérieur de la baie avec des valeurs de SWH encore plus élevées que 2 mètres (GC3). Ceux-ci correspondent à des champs de courant caractérisés, comme dans les cas stationnaires, par la présence de structures de circulation complexes et de forte intensité qui donnent lieu à des processus de transport de PO sur tout le périmètre du littoral. En ce qui concerne la DM, comme pour les cas stationnaires, on constate que l'efficacité du transport de PO est la plus élevée au Nord et diminue au Sud, avec, toutefois, une augmentation relativement localisée vers l'extrémité sud du littoral.

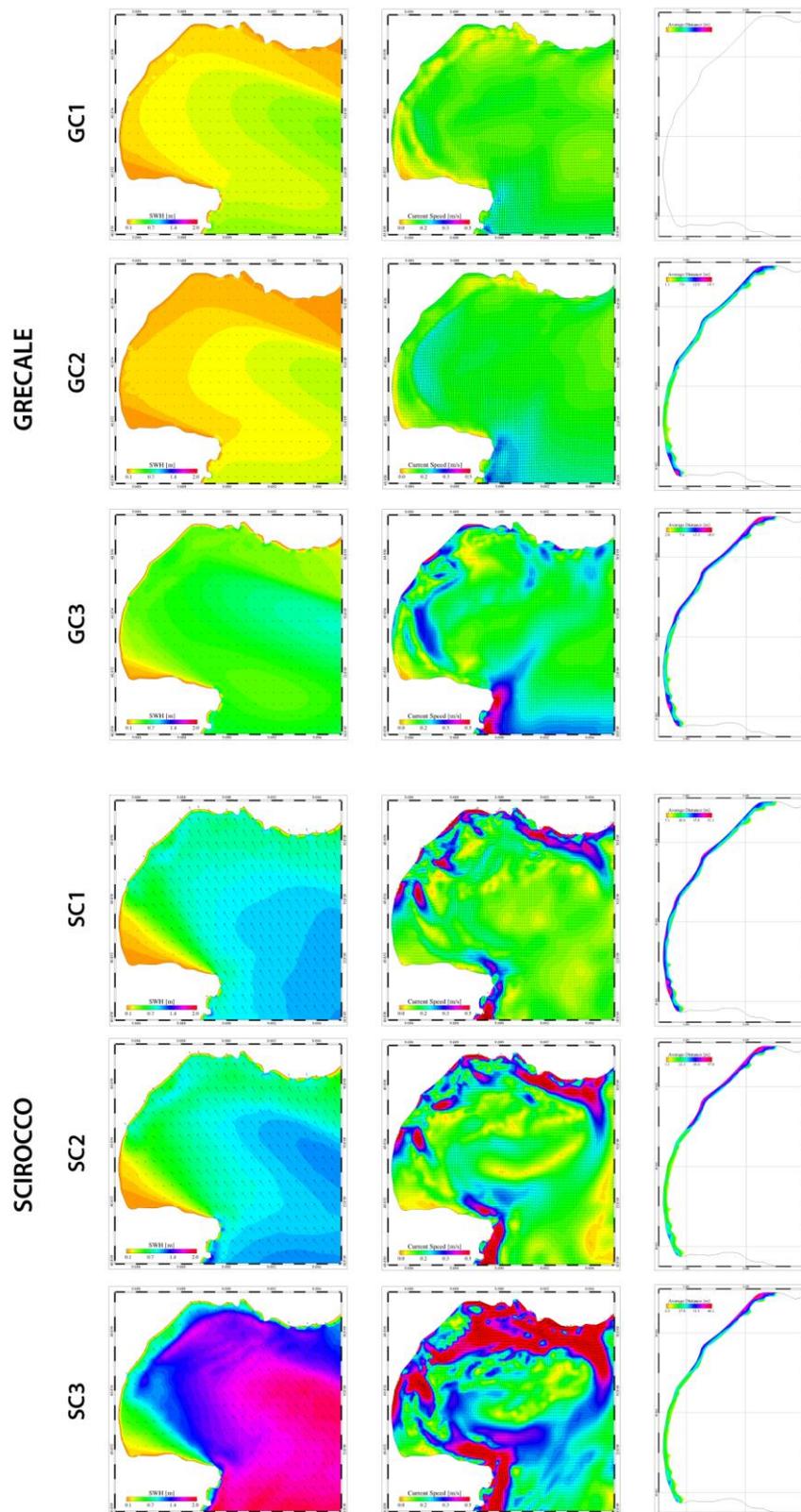


FIGURE 40 : la SWH (panneaux de gauche), la vitesse du courant (panneaux centraux) et la distribution des distances moyennes parcourues par les particules (panneaux de droite) au moment du dépôt pour l'étude de cas de Cala Brandinchi

En comparant les résultats obtenus à partir des scénarios réalistes avec ceux qu'on a obtenu à partir des scénarios stationnaires, il ressort que la description du mouvement des vagues, de la circulation de l'eau et du transport de la PO induits par les 2 principaux régimes de vagues et de vent du Grec et du Sirocco peut être représentée selon des schémas répétitifs. Par conséquent, l'utilisation de simulations stationnaires forcées par des vents synthétiques peut fournir des indications générales sur les zones les plus efficaces pour le transport de la PO de la plage, valables également pour des cas réalistes.

6. CONCLUSIONS

Dans cette étude, un aspect des procédures de gestion des feuilles de *P. oceanica* le long de certaines côtes de la région de Sardaigne a été abordé par le biais d'une approche de modélisation. Dans ce cas, l'objectif de l'étude était de rechercher, pour deux plages différentes situées dans la zone marine protégée de Tavolara Punta Coda Cavallo, Porto Taverna et Cala Brandinchi, quelles sont les étendues de côte les plus appropriées pour le transport *off-shore* par les vagues et les courants des feuilles de *P. oceanica* qui y sont relâchées. À cette fin, une approche numérique a été suivie, basée sur l'utilisation de modèles hydrodynamiques, ondamétriques et de transport pour simuler les processus physiques principaux qui contribuent à la dispersion des feuilles de *P. oceanica* une fois immergées près du littoral. L'étude a été réalisée en tenant compte des principaux scénarios météo-marins qui caractérisent le régime ondamétrique et courant-métrique des 2 sites d'intérêt. L'identification de ces scénarios météo-marins a été réalisée grâce à une analyse statistique des principaux événements de tempête survenus au cours de la décennie 2007-2017. Une campagne de mesures bathymétriques et une phase de traitement et d'analyse de celles-ci ont préparé la mise en place des modèles numériques, qui ont permis de développer des modèles numériques des fonds marins des zones côtières d'intérêt. Ces données ont été utilisées pour mettre en place les grilles de calcul des modèles numériques hydrodynamiques, ondamétriques et de transport.

Des simulations numériques ont été réalisées pour des scénarios utilisant des forces à la fois stationnaires et réalistes afin de reproduire la circulation de l'eau et la propagation des vagues lors d'événements de houle présélectionnés caractérisés par l'intensité et la direction de la propagation des vagues représentatives de la climatologie de la région. Les résultats obtenus ont été utilisés pour simuler les processus de transport et de dépôt des feuilles de *P. oceanica* libérées près du littoral. Pour chaque simulation, la distribution le long du littoral des distances moyennes atteintes par les particules numériques qui y sont rejetées a été identifiée. Par la suite, pour les deux plages, une procédure de normalisation des résultats sur une base statistique a été effectuée, permettant d'obtenir une échelle adimensionnelle de l'efficacité de la dispersion, appelée indice de dispersivité. Plus l'indice de dispersivité est élevé, plus la distance du rivage par rapport aux feuilles de *P. oceanica* qui y sont relâchées est efficace.

A la fin de l'étude réalisée, nous rapportons pour les 2 plages de Porto Taverna (Figure 41) et Cala Brandinchi (Figure 42) la distribution discrétisée sur des carrés de rayon égal à 25 m de l'indice de dispersivité normalisé sur une échelle comprise entre 0 et 1. Ces données sont obtenues par une procédure d'interpolation à une résolution de 25 mètres effectuée sur les résultats obtenus précédemment et affichés sur les images de la Figure 25 et de la Figure 33.

Selon les résultats obtenus, pour la plage de Porto Taverna, l'indice de dispersivité, et donc l'efficacité des feuilles de *P. oceanica* s'éloignant du rivage, est maximum dans la partie nord du domaine et minimum dans la partie sud. En ce qui concerne Cala Brandinchi, cela varie avec 2 maxima relatifs, un au Nord et un d'intensité mineure au Sud et un minimum absolu positionné dans la partie centre-sud.

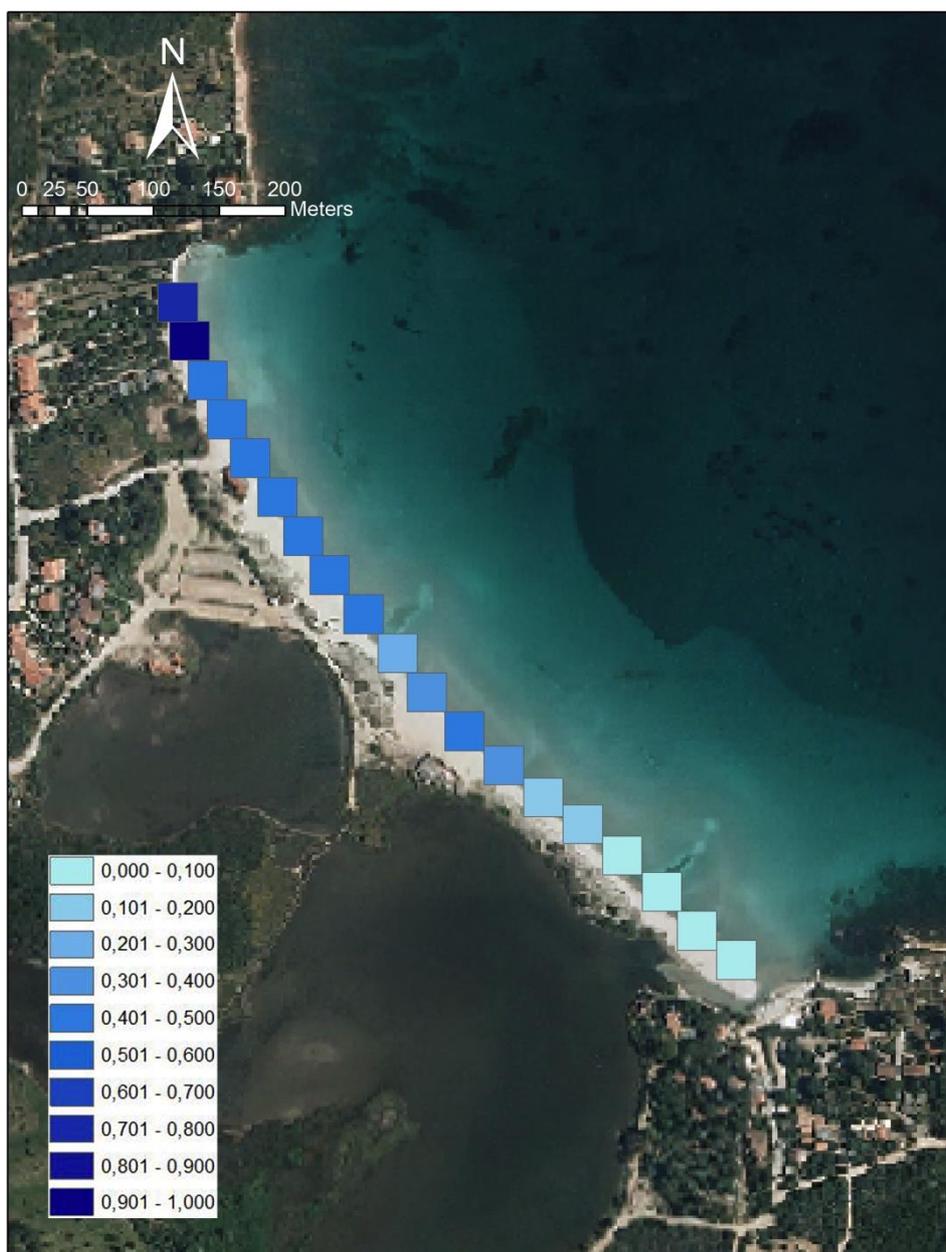


FIGURE 41 : la distribution de l'indice de dispersivité adimensionnelle pour l'étude de cas de Porto Taverna

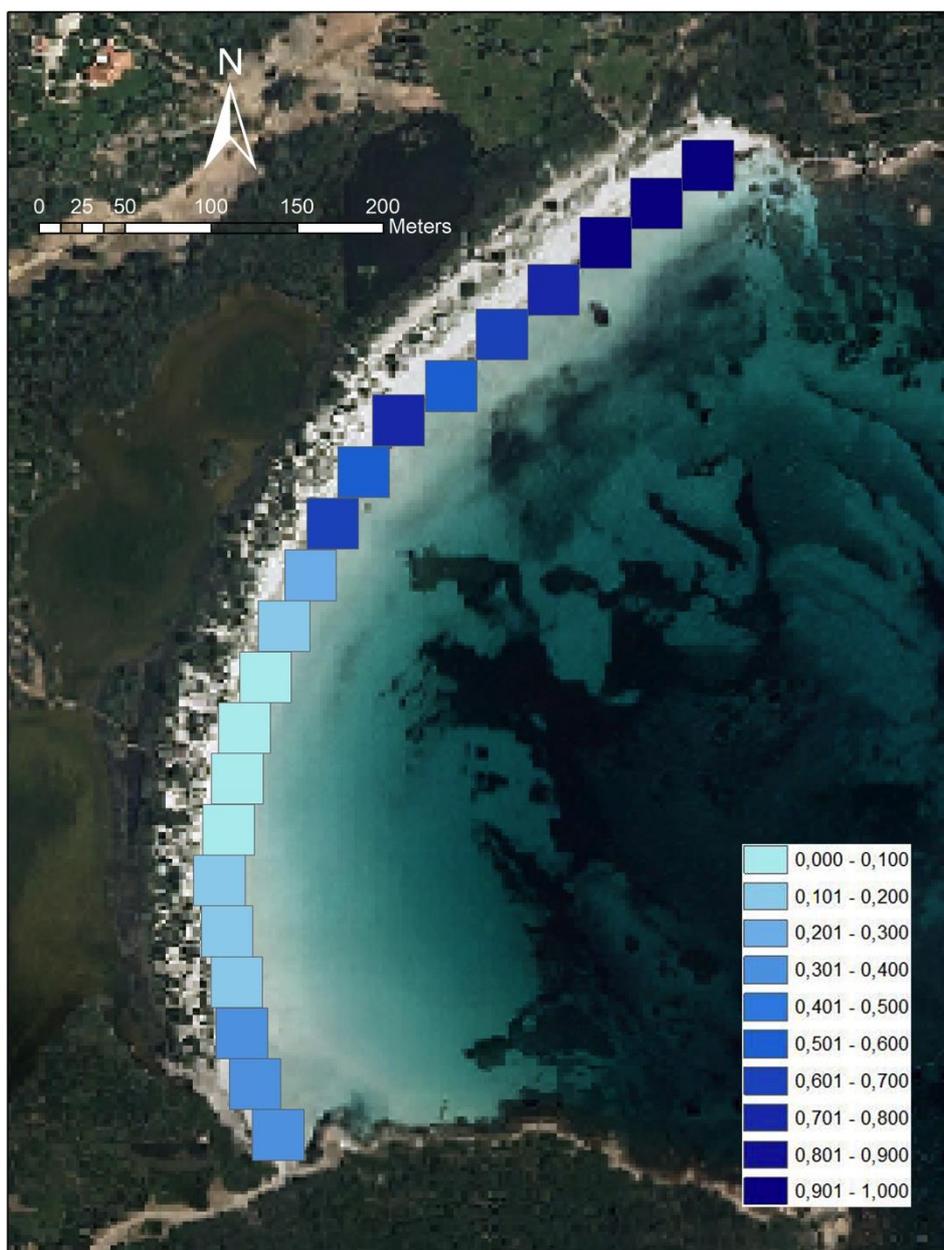


FIGURE 42 : la distribution de l'indice de dispersivité adimensionnelle pour l'étude de cas de Cala Brandinchi

Bibliographie

Burchard, H., & Petersen, O. (1999). Models of turbulence in the marine environment— A comparative study of two-equation turbulence models. *Journal of Marine Systems*, 21(1-4), 29-53.

Cucco, A., Quattrocchi, G., Olita, A., Fazioli, L., Ribotti, A., Sinerchia, M., ... & Sorgente, R. (2016). Hydrodynamic modelling of coastal seas: the role of tidal dynamics in the Messina Strait, Western Mediterranean Sea. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 16(7).

Cucco, A., Umgiesser, G., Ferrarin, C., Perilli, A., Canu, D. M., & Solidoro, C. (2009). Eulerian and lagrangian transport time scales of a tidal active coastal basin. *Ecological Modelling*, 220(7), 913-922.

Ferrarin, C., Roland, A., Bajo, M., Umgiesser, G., Cucco, A., Davolio, S., ... & Drofa, O. (2013). Tide-surge-wave modelling and forecasting in the Mediterranean Sea with focus on the Italian coast. *Ocean Modelling*, 61, 38-48.

Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1964, August). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. In *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* (Vol. 11, No. 4, pp. 529-562). Elsevier.

Oldham, CE., Lavery, PS., McMahon, K, Pattiaratchi, C and Chiffings, TW. 2010. Seagrass wrack dynamics in Geographe Bay, Western Australia. DPI 1062/07

Roland, A. (2008). Development of WWM II: Spectral wave modelling on unstructured meshes. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt.

Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., Hsu, T. W., Liau, J. M., Ou, S. H., ... & Zanke, U. (2009). On the development and verification of a 2-D coupled wave-current model on unstructured meshes. *Journal of Marine Systems*, 78, S244-S254.

Smagorinsky, J. (1993). Some historical remarks on the use of nonlinear viscosities. *Large eddy simulation of complex engineering and geophysical flows*, 1, 69-106.

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 53(7), 573-588.

Tolman, H. L. (1995). On the selection of propagation schemes for a spectral wind-wave model.

Umgiesser, G., Canu, D. M., Cucco, A., & Solidoro, C. (2004). A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *Journal of Marine Systems*, 51(1-4), 123-145.

Xia, H., Xia, Z., & Zhu, L. (2004). Vertical variation in radiation stress and wave-induced current. *Coastal engineering*, 51(4), 309-321.

GLOSSAIRE

- **Algorithme de similarité statistique** : analyse multivariée des données pour sélectionner et regrouper des éléments homogènes dans un ensemble de données
- **Approche Trial & Error**: méthode heuristique qui vise à trouver une solution à un problème en faisant une tentative
- **Backtesting**: résultat de validation
- **Berme**: marche de plage, section triangulaire placée au-dessus du brise-lames.

- **C.N.R:** Conseil National de la Recherche
- **Closed Boundary:** les bords fermés d'un domaine de calcul, où les conditions dynamiques ne sont pas prescrites.
- **Courants de rip:** flux d'eau intense causé par le mouvement des vagues de la mer, qui se forment devant la plage.
- **Depth-induced breaking:** il se produit à de faibles profondeurs lorsque la hauteur de la vague devient importante par rapport à sa longueur.
- **Direction moyenne de la vague** (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW, N) : la Direction d'origine de la vague (Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest, Ouest, Nord-Ouest, Nord).
- **Echosounder:** fishfinder, un échomètre à ultrasons utilisé pour mesurer la profondeur de la mer
- **Eddy viscosity:** Paramètre pour la définition du débit turbulent par rapport à un débit moyen
- **Fetch :** indique la surface de la mer ouverte sur laquelle le vent souffle avec une direction et une intensité constante et à l'intérieur de laquelle le mouvement des vagues est généré.
- **GPS Différentiel:** la combinaison de données observées simultanément par deux (ou plusieurs) récepteurs, utiles pour le positionnement et basées sur le Global Positioning System (GPS). Ils permettent d'obtenir une réduction significative des principales erreurs de positionnement GPS.
- **Graphique polaire :** représentation graphique des variables en coordonnées polaires.
- **Grec :** vent méditerranéen venant du nord-est.
- **Hauteur significative des vagues (SWH) ou (Hm0):** Hauteur moyenne de 1/3 des vagues les plus hautes.
- **Indice de dispersivité :** l' échelle de l'efficacité de la dispersion.
- **La pente moyenne de la plage :** la pente du profil de la plage calculée à partir du niveau de la berme jusqu'à une profondeur de 0.3 m
- **Mediterranean Waves Forecasting System:** Système de prévision de l'état des vagues pour la mer Méditerranée.

- **Méthode des éléments finis** : une technique numérique permettant de rechercher des solutions numériques approximatives à des problèmes
- **Modèle d'onde spectrale de troisième génération** : capable de décrire plus complètement la physique des ondes que ses prédécesseurs, ce qui leur a apporté des simplifications considérables.
- **Moyenne pondérée**: elle est calculée en additionnant les valeurs de l'analyse, chacune étant multipliée par un coefficient (appelé poids) qui définit son importance.
- **Off-shore** : au large, loin de la côte.
- **Paramètre de Coriolis** : paramètre décrivant l'effet de la rotation de la Terre en un point de la surface de la sphère terrestre.
- **Période de la vague de pointe** : période par rapport à la valeur maximale.
- **Période moyenne de la vague** : période relative à la valeur moyenne.
- **Posidonia Oceanica** : plante aquatique, endémique à la mer Méditerranée, les prairies de *Posidonia oceanica* représentent l'un des environnements les plus productifs de la mer.
- **Radiation Stress** : flux d'énergie cinétique généré par la présence d'ondes de gravité
- **Run-up**: l'extension maximale de la vague en amont sur la plage, par rapport au niveau moyen de la mer.
- **Scatter plot**: graphique de dispersion dans lequel deux variables d'un ensemble de données sont reportées sur un espace cartésien.
- **Scénarios réels**: dans ce rapport, nous indiquons les scénarios météorologiques dictés par les conditions météorologiques qui varient de manière réaliste dans le temps.
- **Scénarios stationnaires**: dans ce rapport, on indique les scénarios météorologiques dictés par des conditions météorologiques inchangées dans le temps.
- **Setup de la simulation numérique** : définition du domaine de mise en œuvre du modèle et de tous les paramétrages utilisés dans les équations.
- **Shear-stress**: Stress causé par l'écoulement d'un fluide le long d'une surface rigide.

- **Shoaling:** augmentation de la hauteur des vagues en concomitance avec l'arrivée dans les zones d'eau peu profonde.
- **Sirocco:** vent chaud méditerranéen du sud-est.
- **Stokes transport des ondes :** vitesse moyenne d'une particule dans un mouvement d'onde.
- **Stokes-drift de la courant:** vitesse moyenne d'une particule à l'intérieur d'un fluide turbulent en mouvement.
- **Système FIFO :** acronyme de First In First Out, permet à deux processus numériques de communiquer pendant leur cycle de calcul.
- **Technique random walk:** simulateur de valeurs aléatoires dans le cas où il est utilisé pour déterminer les caractéristiques d'un écoulement tubulaire à très petite échelle spatiale.
- **Tidal Load:** le potentiel gravitationnel généré par la présence des corps célestes.
- **Vitesse de sédimentation :** la vitesse de chute d'une particule
- **Whitecapping :** se produit à des profondeurs élevées lorsque la hauteur de la vague devient grande par rapport à la longueur.