



**Interreg**



UNIONE EUROPEA

**SICOMAR**  
**plus**

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

---

**SICOMAR**  
**plus**

Prodotto - *Livrable* T3.4.1:

Modelli di “rapid environmental assessment”/  
*Modèles de “rapid environmental assessment”*

Data prevista - Date prévue : 31/12/2021

Data di consegna - Date d'échéance : 31/12/2021

Versione - Version : V.1



<b>Informazioni generali sul documento / Informations générales sur le document</b>	
<b>Componente / Composante</b>	T.3
<b>Attività/Activité</b>	A3.4
<b>Prodotto/Livrabile</b>	T3.4.1
<b>Nome Documento / Nom Document</b>	“Prodotto T3.4.1: Modelli di “rapid environmental assessment”” “Livrabile T3.4.1 : Modèles de “rapid environmental assessment””
<b>ID File/ID Fichier</b>	SICOMAR PLUS_T3.4.1.pdf

<b>Processo di approvazione / Procédure d'approbation</b>				
	<b>Nome/Nom</b>	<b>Ente/Établissement</b>	<b>Data/Date</b>	<b>Visto/Vu</b>
<b>Coordinatore/ Coordinateur</b>	Gilda Ruberti	Regione Toscana		
<b>CP Leader/ CP Leader</b>	Gilda Ruberti	Regione Toscana		

<b>Processo di revisione / Procédure de révision</b>			
<b>Revisione/ Révision</b>	<b>Autore/Auteur</b>	<b>Data Rev./ Date</b>	<b>Modifiche/Modifications</b>



**Interreg**



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

---

		<i>Rév.</i>	
V1.0	CNR	31/12/2021	



## Introduzione

La “Rapid Environmental Assessment (REA)”, è una metodologia che consiste nel raccogliere informazioni, valutare e analizzare rapidamente il contesto ambientale di una particolare zona in un momento di crisi o di disastro ambientale in atto. La sua corretta applicazione permette una pianificazione strategica ed efficiente della risposta operativa per mitigare i principali rischi ambientali.

Stimare come le sostanze vengano trasportate dalle correnti marine può essere fondamentale per la realizzazione di REA in ambito marino. Basti pensare alle operazioni di ricerca e soccorso in mare, tecnicamente definite dall’acronimo inglese SAR (“Search and Rescue”), oppure alla gestione degli incidenti tra navi con i conseguenti sversamenti di idrocarburi. La valutazione di questo trasporto è importante anche per la dispersione di altri contaminanti chimici, ad esempio per i metalli pesanti e per altri inquinanti organici, ma anche per la gestione della costa e delle risorse ittiche quando si considera il trasporto dei sedimenti e delle larve degli organismi marini.

Le stime di questo trasporto sono comunque difficili da ottenere perché il movimento delle particelle in mare è tipicamente caotico e quindi dipendente dalle condizioni iniziali e dalle diverse velocità delle correnti, che sono altamente variabili sia nello spazio sia nel tempo (Griffa et al., 2004). Negli ultimi anni, alcune stime sono state ottenute utilizzando le misure provenienti da strumenti come i radar costieri HF e i drifter (Molcard et al., 2009). Questi due tipi di strumenti forniscono informazioni sulle correnti marine che sono diverse e per molti aspetti complementari. Grazie ai radar HF è possibile ottenere mappe delle velocità delle correnti marine superficiali in una zona costiera che può estendersi circa fino a 100 km dalla costa, con una risoluzione orizzontale dell'ordine di 1,5-3 km, e una risoluzione temporale di solito oraria. I drifter, invece, sono strumenti che vanno alla deriva venendo trasportati dalle correnti marine e forniscono informazioni dirette sul trasporto comunicando la loro posizione a intervalli dell'ordine di pochi minuti. Il loro movimento è influenzato dai dettagli delle correnti marine che hanno luogo su scale spaziali orizzontali compatibili con le loro dimensioni, quindi nell'ordine di pochi metri. Ai fini della “Rapid Environmental Assessment” rimane fondamentale considerare sia le scale spaziali maggiori campionate dai radar che quelle minori dei drifter perché entrambe influenzano la dispersione di sostanze in mare.

Radar e drifter vengono utilizzati per realizzare REA marini grazie a metodologie di fusione di diversi tipi di dati (“data fusion o data blending”) che, rispetto a sistemi complessi di previsione e assimilazione dati, hanno il vantaggio di poter essere applicate rapidamente. Nel progetto SICOMAR plus si è applicato il software LAVA (“LAGrangian Variational Analysis”) elaborato e sviluppato insieme dal CNR e dall’Università di Tolone, entrambi partner del progetto. Il software è distribuito gratuitamente e in modalità “open-source” su richiesta presso il seguente archivio digitale <https://bitbucket.org/ismar/lava/wiki/Home>.

LAVA corregge localmente il campo di velocità dei radar misurato su scale spaziali maggiori includendo le informazioni sulle scale spaziali minori provenienti dai drifter. L’approccio è variazionale (Taillandier et al., 2006), richiedendo la minimizzazione della distanza tra le posizioni osservate attraverso i drifter e quelle ottenute integrando numericamente le velocità dei radar (Berta et al., 2014). L’originalità di LAVA si basa su suo approccio strettamente lagrangiano, nel senso che utilizza direttamente l’informazione lagrangiana sulla



posizione piuttosto che la velocità pseudo-euleriana calcolata dalle traiettorie, e la sua correzione è specificamente mirata a ottimizzare il trasporto lagrangiano. In linea di principio, LAVA può essere utilizzato non solo per correggere i campi di velocità dai radar ma anche da qualsiasi altra fonte di dati, come per esempio dai modelli di circolazione costiera e dai dati satellitari (Berta et al., 2014; Berta et al., 2015). Quando altre informazioni non sono disponibili, la ricostruzione del campo di velocità può anche essere ottenuta con LAVA usando solo dati lagrangiani (Taillandier et al., 2006).

In questo prodotto vengono descritti i risultati dell'applicazione del software LAVA combinando, ai fini di REA, le velocità delle correnti marine misurate nella porzione trasfrontaliera tra la Corsica e la Toscana dai drifter e dai sistemi radar del progetto SICOMAR plus.



## Introduction

*L'évaluation environnementale rapide o "Rapid Environmental Assessment (REA)" est une méthodologie qui consiste à rassembler rapidement des informations, à évaluer et à analyser le contexte environnemental d'une zone particulière au moment d'une crise ou d'une catastrophe environnementale en cours. Son application correcte permet une planification stratégique et efficace de la réponse opérationnelle pour atténuer les risques environnementaux majeurs.*

*L'estimation de la manière dont les substances sont transportées par les courants marins peut s'avérer cruciale pour la REA dans l'environnement marin. Par exemple, les opérations de recherche et de sauvetage (SAR) en mer, ou la gestion des accidents entre navires et des marées noires qui en découlent. L'évaluation de ce transport est également importante pour la dispersion d'autres contaminants chimiques, par exemple les métaux lourds et autres polluants organiques, mais aussi pour la gestion des côtes et de la pêche lorsqu'on considère le transport des sédiments et des larves d'organismes marins.*

*Cependant, il est difficile d'obtenir des estimations de ce transport car le mouvement des particules dans la mer est généralement chaotique et dépend donc des conditions initiales et des différentes vitesses de courant, qui sont très variables dans l'espace et dans le temps (Griffa et al., 2004). Ces dernières années, certaines estimations ont été obtenues à partir de mesures effectuées par des instruments tels que les radars côtiers HF et les drifters (Molcard et al, 2009). Ces deux types d'instruments fournissent des informations sur les courants marins qui sont différentes et à bien des égards complémentaires. Avec les radars HF, il est possible d'obtenir des cartes des vitesses des courants marins de surface sur une zone côtière qui peut s'étendre jusqu'à environ 100 km de la côte, avec une résolution horizontale de l'ordre de 1,5-3 km, et une résolution temporelle qui est généralement horaire. Les drifters sont des instruments qui dérivent en étant transportés par les courants marins et fournissent des informations directes sur le transport en communiquant leur position à des intervalles de l'ordre de quelques minutes. Leur mouvement est influencé par les détails des courants marins qui se déroulent à des échelles spatiales horizontales compatibles avec leur taille, c'est-à-dire de l'ordre de quelques mètres. Aux fins de l'évaluation environnementale rapide, il reste essentiel de prendre en compte à la fois les grandes échelles spatiales*



*échantillonnées par les radars et les petites échelles spatiales des drifters, car les deux influencent la dispersion des substances dans la mer.*

*Les radars et les drifters sont utilisés pour produire des REA marins grâce à des méthodologies de fusion de différents types de données ("data fusion ou data blending") qui, par rapport aux systèmes complexes de prédiction et d'assimilation de données, ont l'avantage de pouvoir être appliquées rapidement. Dans le projet SICOMAR plus, le software LAVA ("Lagrangian Variational Analysis") a été appliqué, développé conjointement par le CNR et l'Université de Toulon, tous deux partenaires du projet. Le software est distribué gratuitement et en mode open-source sur demande au lien suivant <https://bitbucket.org/ismar/lava/wiki/Home>.*

*LAVA corrige localement le champ de vitesse radar mesuré sur de plus grandes échelles spatiales en incluant des informations sur de plus petites échelles spatiales provenant de dériveurs. L'approche est variationnelle (Taillandier et al., 2006), nécessitant la minimisation de la distance entre les positions observées par les drifters et celles obtenues par intégration numérique des vitesses radar (Berta et al., 2014). L'originalité de LAVA repose sur son approche strictement lagrangienne, dans le sens où il utilise directement l'information de position lagrangienne plutôt que la vitesse pseudo-eulérienne calculée à partir des trajectoires, et sa correction vise spécifiquement à optimiser le transport lagrangien. En principe, LAVA peut être utilisé non seulement pour corriger les champs de vitesse provenant du radar mais aussi de toute autre source de données, comme les modèles de circulation côtière et les données satellitaires (Berta et al., 2014 ; Berta et al., 2015). Lorsque d'autres informations ne sont pas disponibles, la reconstruction du champ de vitesse peut également être obtenue avec LAVA en utilisant uniquement les données lagrangiennes (Taillandier et al., 2006).*

*Dans ce livrable, nous décrivons les résultats de l'application du logiciel LAVA en combinant, à des fins de REA, les vitesses des courants marins mesurées dans la partie transfrontalière entre la Corse et la Toscane par les drifters et les systèmes radar du projet SICOMAR plus.*

## Materiali e Metodi

### I DATI DRIFTER

Un cluster di 20 drifter di tipo CARTHE è stato rilasciato dal CNR-ISMAR di Lerici nella zona di mare di fronte a Livorno nel mese di ottobre del 2020 (Figura 1) durante l'esperimento DDR20- "Drifter demonstration and Research 2020" eseguito in collaborazione con il CMRE-NATO e il Consorzio LaMMA, e finanziato anche dal progetto SICOMAR plus.

I drifter di tipo CARTHE sono drifter biodegradabili con un pescaggio di circa 60 cm dalla superficie marina (Novelli 2017, 2018, 2020). Durante l'esperimento DDR20, i drifter sono stati rilasciati su una griglia regolare quadrata con passo di circa 500 m e lunga circa 3 km, in una finestra temporale di circa 2 ore. Cinque drifter diretti subito a sud sono stati raccolti il 10 ottobre 2020 e rilasciati nuovamente lo stesso giorno, a circa 2,5 miglia marine a nord dell'area di rilascio iniziale. Altri tre drifter spiaggiati sono stati recuperati e rilasciati nuovamente l'11 novembre 2020 nella zona di mare aperto di fronte al Golfo di La Spezia.

L'intero dataset (Berta et al., 2021) contenente le traiettorie dei drifter fino al 23 gennaio 2021 in formato NetCDF con una frequenza nominale di trasmissione di 10 minuti è parte integrante di questo prodotto e



pubblicamente disponibile al sito <https://www.seanoe.org/data/00740/85161> . Il dataset è composto da diversi file che contengono ciascuno una traiettoria per ogni drifter (ad esempio: 001.nc, 002.nc), mentre le traiettorie dei drifter che sono stati raccolti e rilasciati più volte sono suddivise in diversi file (ad esempio: 001\_a.nc, 001\_b.nc).

Per la specifica applicazione di questo prodotto sono state selezionate le 16 traiettorie del dataset DDR20 che coprono interamente il periodo di 6 giorni che va dall'11 al 17 ottobre 2020 (Figura 1). I dati originali sono stati inoltre sottocampionati calcolando le posizioni medie per ogni ora del periodo considerato.

Le traiettorie mostrano tre principali direzioni di movimento. Alcuni drifter si muovono verso nord-ovest arrivando a nord dell'Isola di Gorgona. Altri si muovono verso sud-ovest lambendo l'Isola d'Elba e finendo nel Canale di Corsica. I drifter rimanenti seguono ricircolazioni e vortici di diverse dimensioni e permangono nell'area tra l'Isola d'Elba e la Capraia.

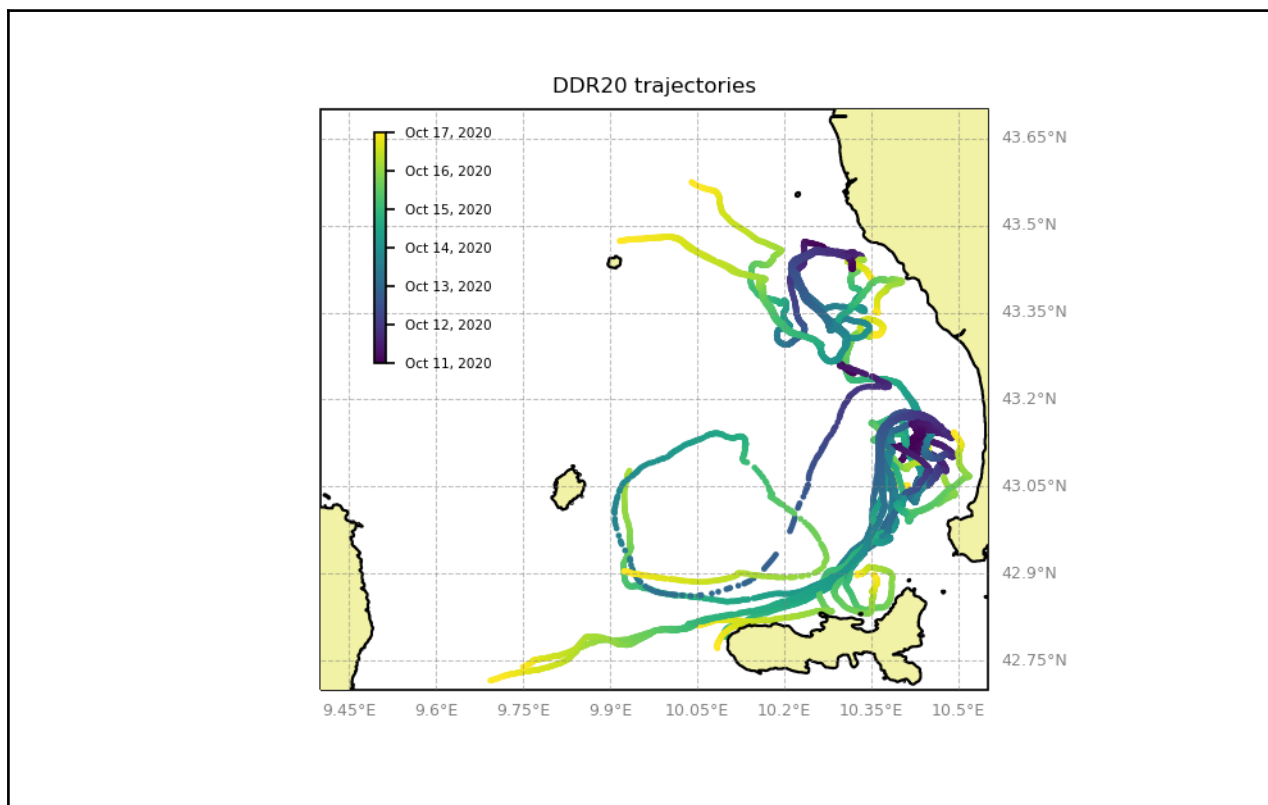


Fig.1: Traiettorie dei drifter DDR20 utilizzate in questo prodotto. I colori denotano il tempo trascorso dal giorno 11 ottobre 2020 / *Trajectoires des drifters DDR20 utilisés dans ce livrable. Les couleurs indiquent le temps écoulé depuis le 11 octobre 2020*

## I DATI RADAR

I dati radar utilizzati in questo prodotto derivano da tre sistemi di antenne di tipo CODAR attualmente di proprietà del Consorzio LaMMA. I tre sistemi fanno parte della rete di radar costieri transfrontaliera del



progetto SICOMAR plus. Il primo sistema è stato installato dalla Regione Toscana, in collaborazione con il Consorzio LaMMA e l'Istituto Vallauri, nell'aprile del 2015 presso l'Accademia Navale di Livorno. Il secondo sistema è stato installato sempre dalla Regione Toscana, in collaborazione con il Consorzio LaMMA, nell'aprile del 2015 presso la Marina di San Vincenzo. Il terzo sistema è stato installato dal Consorzio LaMMA, in collaborazione con il CNR-ISMAR di Lerici, nel settembre del 2018 presso l'Isola del Tino, di fronte al Golfo di La Spezia, presso un'area messa a disposizione dalla Marina Militare Italiana.

I tre sistemi radar operano ad una frequenza di 13,5 MHz e ampiezza di banda di 100 kHz. La risoluzione radiale è di circa 1,5 km, quella angolare di 5° e la potenza in trasmissione è di circa 40 W. In condizioni ottimali ciascun radar può raggiungere una copertura di circa 80-100 km dalla costa. Le velocità radiali dei 3 sistemi vengono combinate per fornire informazioni vettoriali sulle correnti marine (intensità e direzione) in ogni punto di una griglia regolare con risoluzione nominale di circa 3 km. L'intero dataset contenente i dati radar orari è parte integrante di questo prodotto e pubblicamente disponibile sul catalogo THREDDS al sito [http://150.145.136.27:8080/thredds/HF\\_RADAR/LAMMA/Totals/Aggregated/LAMMA\\_totals\\_version22\\_aggr\\_catalog.html](http://150.145.136.27:8080/thredds/HF_RADAR/LAMMA/Totals/Aggregated/LAMMA_totals_version22_aggr_catalog.html).

Per la specifica applicazione di questo prodotto sono stati selezionati i dati orari radar che coprono lo stesso periodo dei drifter, cioè i 6 giorni dall'11 al 17 ottobre 2020. Per ridurre gli errori e aumentare la copertura temporale, i dati radar originali sono stati interpolati prima nel tempo in ogni punto della griglia utilizzando una persistenza massima di 6 ore e calcolati solo per i punti in cui i valori del Geometric Dilution Of Precision (GDOP) sono inferiori a 2,5. Questa soglia, dal punto di vista geometrico, corrisponde a un angolo tra i dati radiali provenienti dai diversi sistemi compreso tra 30° e 150° (Berta et al., 2014). Per riempire eventuali lacune nella dimensione spaziale i dati sono infine stati interpolati orizzontalmente utilizzando i valori delle celle limitrofe come fatto in passato in altre zone (Enrile et al., 2018; Enrile et al., 2019). La Figura 2 mostra un esempio delle velocità medie ottenute alla fine delle operazioni di processamento dati descritte.

## IL SOFTWARE LAVA

LAVA è un metodo variazionale sviluppato da Taillandier et al. (2006) e applicato in una serie di casi sia per l'assimilazione completa che per il data blending di dati drifter. Il concetto di base di LAVA è che i dati lagrangiani sono utilizzati per correggere un campo di velocità euleriano, usato come "first guess", minimizzando la distanza tra le posizioni osservate e le posizioni delle traiettorie numeriche ottenute integrando il campo euleriano. La correzione lungo le traiettorie viene applicata utilizzando un'equazione di diffusione con scala spaziale  $R$  che si assume essere dell'ordine del tipico raggio di Rossby nell'area. La scala spaziale  $R$  è ovviamente maggiore del passo di griglia su cui è implementato il campo euleriano.

Per la specifica applicazione di questo prodotto si è scelto  $R$  pari a 7 km e si sono utilizzati 10 traiettorie drifter per la correzione delle velocità dei radar originali lasciandone altre 6 per il confronto indipendente dei risultati. Per la loro quantificazione, seguendo quanto fatto in Berta et al. (2014), si è definita la distanza relativa media  $D(t)$  in ogni istante tra le traiettorie osservate dei drifter di controllo, cioè non utilizzate in LAVA, e quelle numeriche ottenute integrando il campo di velocità prima e dopo l'applicazione del software. Se la media sui drifter di controllo viene indicata con  $\langle \rangle_d$ , con  $(x,y)$  sono indicate le coordinate delle posizioni dei drifter e con  $i$  e  $n$  rispettivamente le traiettorie osservate e numeriche, la distanza relativa media è definita come:



$$D(t) = \left( \sqrt{(x_o - x_n)^2 + (y_o - y_n)^2} \right)_d$$

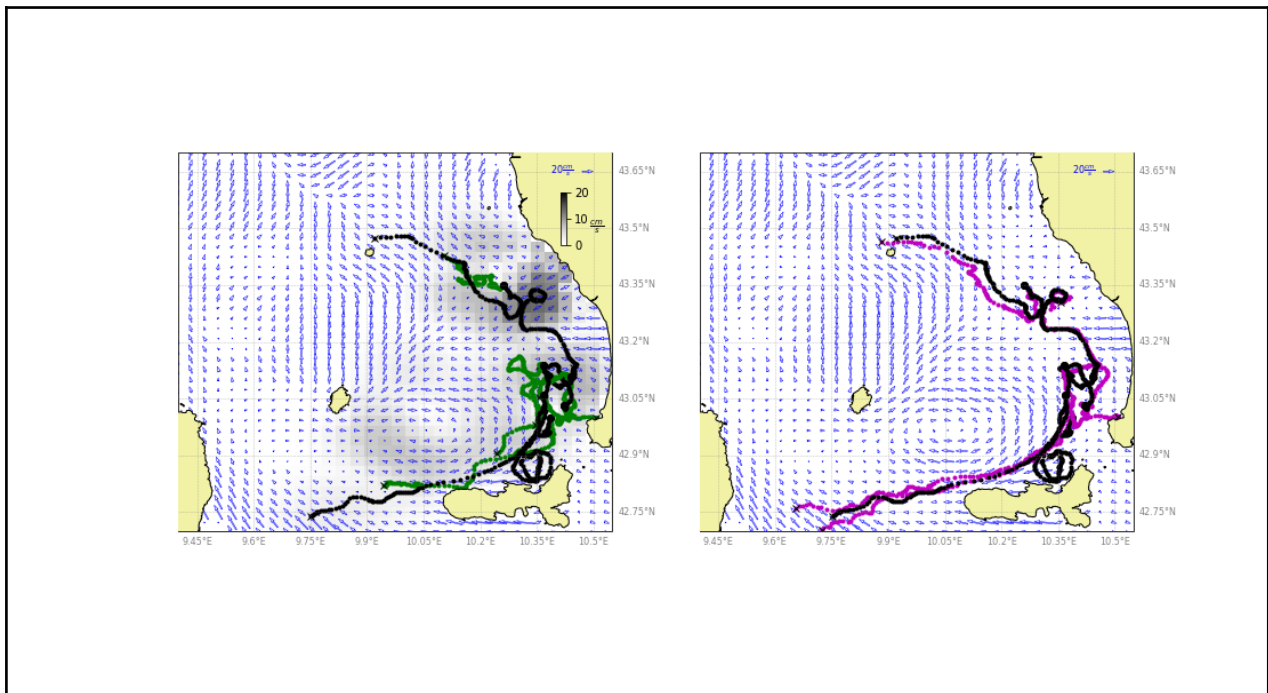


Fig.2: Confronto tra le traiettorie nel periodo 13-17 ottobre 2020 osservate dei drifter di controllo (in nero) e quelle sintetiche e calcolate integrando: a) le velocità originali dei radar (in verde a sinistra) e b) quelle corrette da LAVA (in fucsia a destra). Ogni punto corrisponde a una posizione oraria. Le frecce blu denotano le velocità corrispondenti mediate nel periodo considerato. La scala di grigi a destra evidenzia in che zone è avvenuta la correzione / *Comparaison des trajectoires dans la période 13-17 octobre 2020 observées à partir des drifters de contrôle (en noir) et des trajectoires synthétiques calculées en intégrant: a) les vitesses radar originales (en vert à gauche) et b) celles corrigées par LAVA (en fuchsia à droite). Chaque point correspond à une position horaire. Les flèches bleues indiquent les vitesses correspondantes, moyennées sur la période considérée. L'échelle de gris à droite montre dans quelles zones la correction a eu lieu.*

Considerando la caoticità e variabilità dei campi di velocità, la predicibilità lagrangiana di solito non supera il periodo temporale di una giornata e la stessa finestra temporale è inoltre rilevante ai fini di REA e per le applicazioni operative pratiche. Seguendo quanto fatto in Berta et al. (2014), le traiettorie osservate e numeriche sono quindi suddivise in segmenti di 24 ore e ogni segmento è trattato come una diversa traiettoria nel calcolo delle statistiche. In pratica, le traiettorie numeriche partono dalle posizioni iniziali osservate ogni 24 ore per i drifter di controllo e sono ottenute integrando le velocità euleriane nel tempo



con il pacchetto software SOLVE\_IVP di Scientific Python e utilizzando uno schema esplicito Runge Kutta di ordine 4,5 (Dormand e Prince, 1980). Per consistenza la media sui drifter di controllo  $\langle \rangle_d$  viene calcolata sul periodo corrispondente di 24 ore.

Se con  $(X_o, Y_o)$  sono indicate le coordinate delle posizioni iniziali osservate dei drifter di controllo, per ogni istante, la distanza  $D$  viene confrontata con  $D_o$ , cioè con quella che viene tecnicamente chiamata la dispersione assoluta media delle osservazioni, definita come:

$$D_o(t) = \left( \sqrt{(x_o - X_o)^2 + (y_o - Y_o)^2} \right)_d .$$

$D_o$  fornisce una misura della distanza media coperta dai drifter ad ogni istante e viene comunemente anche indicata come l'errore di persistenza, cioè l'errore che corrisponde a una conoscenza preliminare nulla, assumendo che i drifter non si muovano dalle loro condizioni iniziali (Ullman et al., 2006). In pratica, ogni valore di  $D$  inferiore a  $D_o$  rappresenta un miglioramento rispetto a una conoscenza a priori pari a zero. Per consistenza anche la media sui drifter di controllo  $\langle \rangle_d$  in  $D_o$  viene calcolata sul periodo corrispondente di 24 ore.



## Matériel et méthodes

### LES DONNÉES DES DRIFTERS

*Une série de 20 drifters de type CARTHE a été lâchée par le CNR-ISMAR de Lerici dans la zone maritime devant Livourne en octobre 2020 (Figure 1) pendant l'expérience DDR20- "Drifter demonstration and Research 2020" réalisée en collaboration avec le CMRE-NATO et le Consortium LaMMA, et également financée par le projet SICOMAR plus.*

*Les drifters de type CARTHE sont des bouées biodégradables dont le tirant d'eau est d'environ 60 cm par rapport à la surface de la mer (Novelli 2017, 2018, 2020). Au cours de l'expérience DDR20, les drifters ont été lâchés sur une grille carrée régulière avec un pas d'environ 500 m et une longueur d'environ 3 km, dans une fenêtre temporelle d'environ 2 heures. Cinq drifters se dirigeant immédiatement vers le sud ont été collectés le 10 octobre 2020 et relâchés à nouveau le même jour, à environ 2,5 miles nautiques au nord de la zone de relâchement initiale. Trois autres bouées échouées ont été récupérées et remises à l'eau le 11 novembre 2020 dans la zone de haute mer située devant le golfe de La Spezia.*

*L'ensemble des données (Berta et al., 2021) contenant les trajectoires des drifters jusqu'au 23 janvier 2021 au format NetCDF avec une fréquence de transmission nominale de 10 minutes fait partie intégrante de ce livrable et est disponible publiquement à l'adresse <https://www.seanoe.org/data/00740/85161>. L'ensemble des données est constitué de plusieurs fichiers contenant chacun une trajectoire pour chaque bouée (par exemple : 001.nc, 002.nc), tandis que les trajectoires des bouées qui ont été collectées et relâchées plusieurs fois sont divisées en plusieurs fichiers (par exemple : 001\_a.nc, 001\_b.nc).*



Pour l'application spécifique de ce livrable, les 16 trajectoires de l'ensemble de données DDR20 ont été sélectionnées, couvrant toute la période de 6 jours du 11 au 17 octobre 2020 (Figure 1). Les données originales ont également été sous-échantillonnées en calculant les positions moyennes pour chaque heure de la période considérée.

Les trajectoires montrent trois directions principales de mouvement. Certains drifters se déplacent vers le nord-ouest, arrivant au nord de l'île de Gorgona. D'autres se déplacent vers le sud-ouest, contournant l'île d'Elbe et aboutissant dans le canal de Corse. Les autres drifters suivent des recirculations et des tourbillons de différentes tailles et restent dans la zone entre l'île d'Elbe et Capraia.

### **LES DONNÉES DES RADARS**

Les données radar utilisées dans ce livrable sont dérivées de trois systèmes d'antennes de type CODAR appartenant actuellement au Consortium LaMMA. Les trois systèmes font partie du réseau transfrontalier de radars côtiers du projet SICOMAR plus. Le premier système a été installé par la Région Toscane, en collaboration avec le Consortium LaMMA et l'Institut Vallauri, en avril 2015 à l'Académie Navale de Livourne. Le deuxième système a été installé par la Région de Toscane, en collaboration avec le Consortium LaMMA, en avril 2015 à la Marina de San Vincenzo. Le troisième système a été installé par le Consortium LaMMA, en collaboration avec le CNR-ISMAR de Lerici, en septembre 2018 sur l'île de Tino, en face du golfe de La Spezia, sur une zone mise à disposition par la Marine Italienne.

Les trois systèmes radar fonctionnent à une fréquence de 13,5 MHz et une largeur de bande de 100 kHz. La résolution radiale est d'environ 1,5 km, la résolution angulaire est de 5° et la puissance d'émission est d'environ 40 W. Dans des conditions optimales, chaque radar peut atteindre une couverture d'environ 80-100 km de la côte. Les vitesses radiales des 3 systèmes sont combinées pour fournir des informations vectorielles sur les courants marins (intensité et direction) en chaque point d'une grille régulière avec une résolution nominale d'environ 3 km. L'ensemble de données contenant les données radar horaires fait partie intégrante de ce livrable et est disponible publiquement sur le catalogue THREDDS à l'adresse [http://150.145.136.27:8080/thredds/HF\\_RADAR/LAMMA/Totals/Aggregated/LAMMA\\_totals\\_version22\\_aggr\\_catalog.html](http://150.145.136.27:8080/thredds/HF_RADAR/LAMMA/Totals/Aggregated/LAMMA_totals_version22_aggr_catalog.html).

Pour l'application spécifique de ce livrable, des données radar horaires couvrant la même période que les dérives ont été sélectionnées, soit les 6 jours du 11 au 17 octobre 2020. Pour réduire les erreurs et augmenter la couverture temporelle, les données radar originales ont été interpolées plus tôt dans le temps à chaque point de grille en utilisant une persistance maximale de 6 heures et calculées uniquement pour les points où les valeurs de la dilution géométrique de précision (GDOP) sont inférieures à 2,5. Ce seuil, d'un point de vue géométrique, correspond à un angle entre les données radiales des différents systèmes compris entre 30° et 150° (Berta et al., 2014). Pour combler les éventuels trous dans la dimension spatiale, les données ont finalement été interpolées horizontalement en utilisant les valeurs des cellules voisines, comme cela a été fait par le passé dans d'autres régions (Enrile et al., 2018 ; Enrile et al., 2019). La figure 2 montre un exemple des vitesses moyennes obtenues à la fin des opérations de traitement des données décrites.

### **LE SOFTWARE LAVA**



LAVA est une méthode variationnelle développée par Taillandier et al. (2006) et appliquée dans un certain nombre de cas pour l'assimilation complète et le mélange de données des drifters. Le concept de base de LAVA est que les données lagrangiennes sont utilisées pour corriger un champ de vitesse eulérien, utilisé comme première estimation (first guess), en minimisant la distance entre les positions observées et les positions des trajectoires numériques obtenues en intégrant le champ eulérien. La correction le long des trajectoires est appliquée à l'aide d'une équation de diffusion dont l'échelle spatiale  $R$  est supposée être de l'ordre du rayon de Rossby typique de la région. L'échelle spatiale  $R$  est évidemment plus grande que le pas de grille sur lequel le champ eulérien est implanté.

Pour l'application spécifique de ce livrable,  $R$  a été choisi à 7 km et 10 trajectoires des drifters ont été utilisées pour corriger les vitesses des radars originaux, laissant 6 autres trajectoires pour une comparaison indépendante des résultats. Pour leur quantification, en suivant ce qui a été fait dans Berta et al. (2014), nous avons défini la distance relative moyenne  $D(t)$  à chaque instant entre les trajectoires observées des drifters de contrôle, c'est-à-dire non utilisés dans LAVA, et celles numériques obtenues en intégrant le champ de vitesse avant et après l'application du software. Si la moyenne sur les drifters de contrôle est désignée par  $\langle \rangle_d$ , avec  $(x,y)$  désignant les coordonnées des positions des dériveurs et avec les indices  $o$  et  $n$  désignant respectivement les trajectoires observées et numériques, la distance relative moyenne est définie comme suit :

$$D(t) = \left( \sqrt{(x_o - x_n)^2 + (y_o - y_n)^2} \right)_d .$$

Compte tenu de la nature chaotique et de la variabilité des champs de vitesse, la prévisibilité lagrangienne ne dépasse généralement pas la période d'un jour et la même fenêtre temporelle est également pertinente pour la REA et les applications opérationnelles pratiques. En suivant ce qui a été fait dans Berta et al. (2014), les trajectoires observées et numériques sont ensuite divisées en segments de 24 heures et chaque segment est traité comme une trajectoire différente dans le calcul des statistiques. En pratique, les trajectoires numériques partent des positions initiales observées toutes les 24 h pour les drifters de contrôle et sont obtenues en intégrant les vitesses eulériennes dans le temps avec le software SOLVE\_IVP de Scientific Python et en utilisant un schéma de Runge Kutta explicite d'ordre 4,5 (Dormand et Prince, 1980). Pour des raisons de cohérence, la moyenne sur les dérives de contrôle  $\langle \rangle_d$  est calculée sur la période de 24 heures correspondante.

Si  $(X_o, Y_o)$  sont les coordonnées des positions initiales observées des drifters de contrôle, pour chaque instant, la distance  $D$  est comparée à  $D_o$ , c'est-à-dire à ce qui est techniquement appelé la dispersion absolue moyenne des observations, définie comme suit :

$$D_o(t) = \left( \sqrt{(x_o - X_o)^2 + (y_o - Y_o)^2} \right)_d .$$

$D_o$  fournit une mesure de la distance moyenne parcourue par les drifters à chaque instant et est aussi communément appelée l'erreur de persistance, c'est-à-dire l'erreur qui correspond à une connaissance préalable nulle, en supposant que les drifters ne se déplacent pas à partir de leurs conditions initiales



Interreg



UNIONE EUROPEA

SICOMAR  
plus

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

---

*(Ullman et al., 2006). En pratique, toute valeur de  $D$  inférieure à  $D_0$  représente une amélioration par rapport à une connaissance préalable nulle. Par souci de cohérence, la moyenne sur les dérives de contrôle  $\langle \cdot \rangle_d$  en  $D_0$  est également calculée sur la période de 24 heures correspondante.*



## Risultati

L'impatto del data blending viene qui descritto prima da un punto di vista qualitativo confrontando visivamente le differenze tra velocità originali e corrette e tra le traiettorie osservate e numeriche dei drifter di controllo. La Figura 2 mostra a sinistra la media delle velocità originariamente misurate dai radar nel periodo 13-17 ottobre 2020 e l'intensità delle correzioni dopo aver applicato LAVA (scala di grigi a sinistra, nuove velocità a destra). I radar sembrano generalmente sottostimare il vortice anticiclonico tra l'isola d'Elba e la Capraia e sovrastimare la componente delle velocità verso le coste toscane. L'effetto di questi errori è quello di non riuscire a delineare alcune delle principali direzioni di movimento dei drifter osservati. Ad esempio, nessuna delle traiettorie numeriche ottenuta integrando i dati radar originali (punti verdi a sinistra) si muove verso nord-ovest arrivando a nord dell'Isola di Gorgona mentre sopra l'Isola d'Elba le traiettorie numeriche sono più a est di quelle osservate. Le velocità anticicloniche più basse registrate tra l'Elba e la Capraia non permettono di raggiungere il Canale di Corsica nei tempi delineati dalle osservazioni.

L'effetto delle correzioni è evidente. Quando si integrano le velocità corrette da LAVA, le nuove traiettorie numeriche (punti fucsia a sinistra) sono più vicine a quelle osservate (punti neri) e le direzioni del trasporto osservate sia a nord-est verso la Gorgona che a sud-est verso il Canale di Corsica vengono ripristinate. Questo suggerisce che LAVA rappresenta un metodo efficace ai fini REA nella zona di cooperazione del Programma Interreg Italia-Francia Marittimo per migliorare le stime delle traiettorie. Il miglioramento non significa comunque perfezione: il trasporto verso il Canale di Corsica sembra essere leggermente sovrastimato dalle correzioni e il piccolo anticiclone a nord-est dell'Isola d'Elba non è presente neanche nelle nuove velocità.

Il miglioramento dovuto a LAVA sulle stime di trasporto è quantificabile paragonando le quantità statistiche  $D$  e  $D_0$  (Figura 3). La linea nera indica la dispersione assoluta dei drifter di controllo, considerata come il punto di riferimento in assenza di informazioni. I risultati mostrano che  $D_0$ , nella porzione trasfrontaliera tra la Corsica e la Toscana, cresce quasi linearmente e raggiunge circa i 9 km dopo 24 ore. La linea verde è per la dispersione media  $D$  quando si utilizzano i dati originali dei radar costieri. Anche in questo caso  $D$  cresce quasi linearmente nelle 24 ore rimanendo comunque a ogni tempo sotto i valori di  $D_0$  e riducendo quindi l'incertezza fino a raggiungere circa gli 8 km dopo 24 ore. Il miglioramento è notevole quando per  $D$  si usano le velocità corrette da LAVA (linea fucsia): l'incertezza diminuisce ed è circa la metà di quella dei dati radar originali, con un massimo di circa 4 km a 24 ore.

Questi risultati quantitativi mostrano il grande vantaggio di utilizzare LAVA per migliorare le stime di trasporto, e suggeriscono possibili conseguenze pratiche ai fini REA e per problemi operativi come per le operazioni di ricerca e soccorso o l'identificazione delle aree di dispersione degli inquinanti. Nei casi in cui nessuna informazione sia disponibile nella porzione trasfrontaliera tra la Corsica e la Toscana, ci si può aspettare che l'area di ricerca di persone, oggetti e/o eventuali inquinanti abbia un raggio dell'ordine dell'incertezza sulle posizioni delle particelle, stimabile dalla dispersione assoluta  $D_0$ , cioè dell'ordine di 9 km dopo 24 ore. Quando le informazioni radar sono disponibili, i risultati riportati in Figura 3 suggeriscono che l'incertezza associata alle traiettorie basate sul radar  $D$  è più bassa così che il raggio dell'area di ricerca possa essere ridotto a circa 8 km dopo 24 ore. La combinazione dei dati radar e drifter con LAVA permette però di ridurre a metà questa incertezza, con un raggio di ricerca finale pari a 4 km dopo 24 ore.

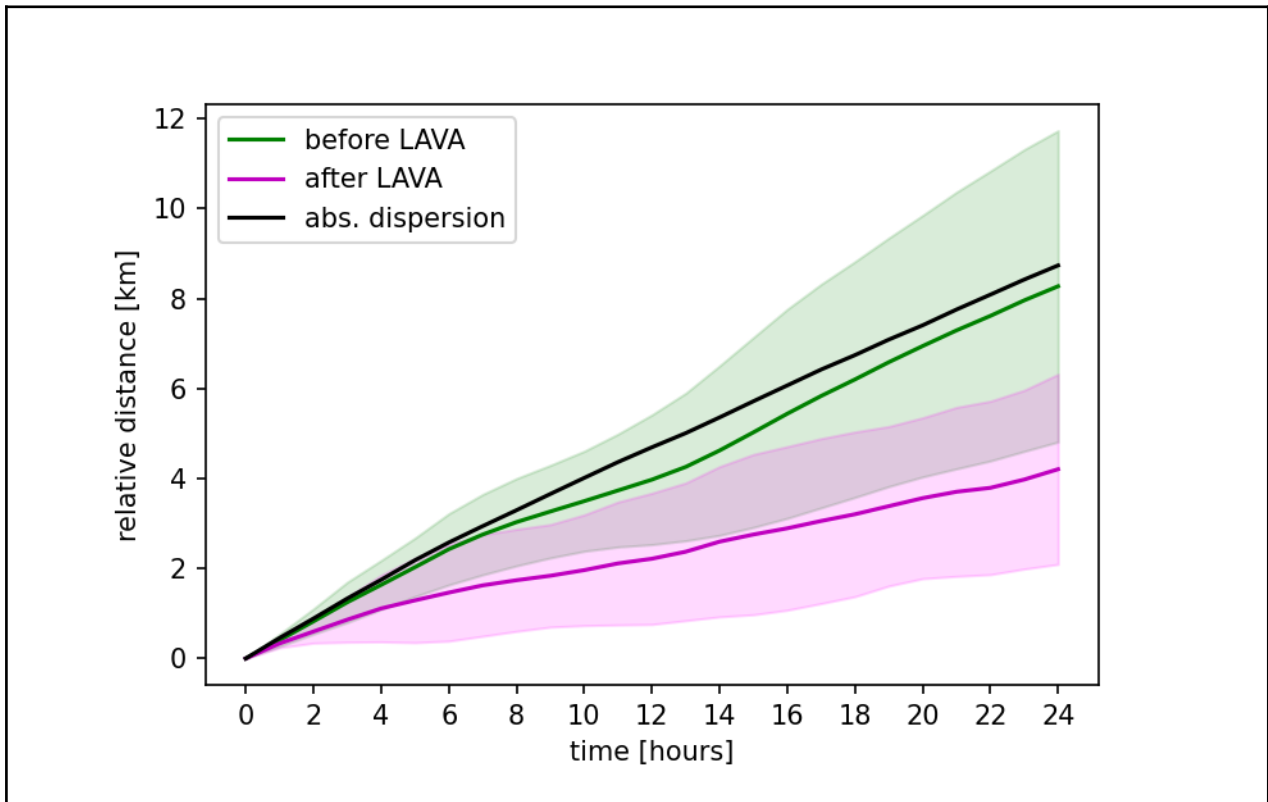


Fig.3: Evoluzione temporale nelle 24 ore della distanza relativa media  $D$  tra le traiettorie numeriche e quelle osservate per i drifter di controllo. La linea verde è calcolata utilizzando le velocità radar originali mentre quella fucsia quelle corrette da LAVA. Le relative aree ombreggiate indicano le deviazioni standard mentre la linea nera rappresenta la dispersione assoluta  $D_0$  / Evolution temporelle sur 24 heures de la distance relative moyenne  $D$  entre les trajectoires numériques et observées pour les drifters de contrôle. La ligne verte est calculée en utilisant les vitesses radar originales tandis que la ligne fuchsia est corrigée par LAVA. Les zones ombragées relatives indiquent les déviations standard tandis que la ligne noire représente la dispersion absolue  $D_0$ .



## Résultats

L'impact du data blending des données est d'abord décrit ici d'un point de vue qualitatif en comparant visuellement les différences entre les vitesses originales et corrigées et entre les trajectoires observées et



La cooperazione al cuore del Mediterraneo / La coopération au cœur de la Méditerranée



numériques des drifters de contrôle. La Figure 2 montre à gauche la moyenne des vitesses mesurées à l'origine par les radars dans la période 13-17 octobre 2020 et l'intensité des corrections après application de LAVA (échelle grise à gauche, nouvelles vitesses à droite). Les radars semblent généralement sous-estimer le tourbillon anticyclonique entre Elbe et Capraia et surestimer la composante de vitesse vers la côte toscane. L'effet de ces erreurs est de ne pas délimiter certaines des principales directions de mouvement des drifters observés. Par exemple, aucune des trajectoires numériques obtenues en intégrant les données radar originales (points verts à gauche) ne se déplace vers le nord-ouest en arrivant au nord de l'île de Gorgona, alors qu'au-dessus de l'île d'Elbe, les trajectoires numériques sont plus à l'est que celles observées. Les faibles vitesses anticycloniques enregistrées entre l'Elbe et Capraia ne lui permettent pas d'atteindre le canal de Corse dans les délais prévus par les observations.

L'effet des corrections est évident. En intégrant les vitesses corrigées par LAVA, les nouvelles trajectoires numériques (points fuchsia à gauche) sont plus proches des trajectoires observées (points noirs) et les directions de transport observées à la fois au nord-est vers Gorgona et au sud-est vers le canal de Corse sont restaurées. Ceci suggère que LAVA représente une méthode efficace pour les besoins de REA dans la zone de coopération du Programme Marittimo Interreg Italie-France pour améliorer les estimations de trajectoire. Cependant, l'amélioration ne signifie pas la perfection : le transport vers le canal de Corse semble être légèrement surestimé par les corrections et le petit anticyclone au nord-est de l'île d'Elbe n'est pas non plus présent dans les nouvelles vitesses.

L'amélioration due à LAVA sur les estimations de transport peut être quantifiée en comparant les quantités statistiques  $D$  et  $D_0$  (Figure 3). La ligne noire indique la dispersion absolue des dérives de contrôle, considérées comme le point de référence en l'absence d'information. Les résultats montrent que  $D_0$ , dans la partie transfrontalière entre la Corse et la Toscane, augmente presque linéairement et atteint environ 9 km après 24 heures. La ligne verte représente la dispersion moyenne  $D$  lors de l'utilisation des données originales du radar côtier. Là encore,  $D$  croît de façon presque linéaire au cours des 24 heures mais reste à tout moment inférieur aux valeurs de  $D_0$ , ce qui réduit l'incertitude jusqu'à ce qu'elle atteigne environ 8 km après 24 heures. L'amélioration est remarquable lorsque les vitesses corrigées par LAVA (ligne fuchsia) sont utilisées pour  $D$  : l'incertitude diminue et est environ la moitié de celle des données radar originales, avec un maximum d'environ 4 km à 24 heures.

Ces résultats quantitatifs montrent le grand avantage de l'utilisation de LAVA pour améliorer les estimations de transport, et suggèrent des conséquences pratiques possibles à des fins de REA et pour des problèmes opérationnels tels que les opérations de recherche et de sauvetage ou l'identification des zones de dispersion des polluants. Dans le cas où aucune information n'est disponible dans la partie transfrontalière entre la Corse et la Toscane, on peut s'attendre à ce que la zone de recherche de personnes, d'objets et/ou de polluants éventuels ait un rayon de l'ordre de l'incertitude sur les positions des particules, estimée à partir de la dispersion absolue  $D_0$ , soit de l'ordre de 9 km après 24 heures. Lorsque les informations radar sont disponibles, les résultats présentés à la Figure 3 suggèrent que l'incertitude associée aux trajectoires  $D$  basées sur le radar est plus faible, de sorte que le rayon de la zone de recherche peut être réduit à environ 8 km après 24 heures. Cependant, la combinaison des données radar et dérivantes avec LAVA permet de réduire cette incertitude de moitié, avec un rayon de recherche final de 4 km après 24 heures.





## Bibliografia / Bibliographie

- Berta M., Bellomo L., Magaldi M.G., Griffa A., Molcard A., Marmain J., Borghini M., Taillandier V. (2014). Estimating Lagrangian transport blending drifters with HF radar data and models: results from the TOSCA experiment in the Ligurian Current (North Western Mediterranean Sea). *Prog. Oceanogr.*, 128, 15–29, doi: 10.1016/j.pocean.2014.08.004.
- Berta M., Griffa A., Magaldi M.G., Özgökmen T.M., Poje A.C., Haza A.C., Olascoaga M.J. (2015). Improved surface velocity and trajectory estimates in the Gulf of Mexico from blended satellite altimetry and drifter data. *J. Atmos. Ocean Tech.*, 32, 1880–1901, doi: 10.1175/JTECH-D-14-00226.1.
- Berta M., Poulain P.-M., Sciascia R., Griffa A., Magaldi M.G. (2021). CARTHE drifters deployment within the DDR20 - "Drifter demonstration and Research 2020" experiment in the NW Mediterranean Sea [Data set]. *Seano*, doi: 10.17882/85161.
- Dormand J.R., Prince P.J. (1980). A family of embedded Runge-Kutta formulae. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 6(1), 19–26, doi: 10.1016/0771-050X(80)90013-3.
- Enrile F., Besio G., Stocchino A., Magaldi M.G., Mantovani C., Cosoli S., Gerin R., Poulain P.-M. (2018). Evaluation of surface Lagrangian transport barriers in the Gulf of Trieste. *Cont. Shelf Res.*, 167, 125–138, doi: 10.1016/j.csr.2018.04.016.
- Enrile F., Besio G., Stocchino A., Magaldi M.G. (2019). Influence of initial conditions on absolute and relative dispersion in semi-enclosed basins. *PLoS One*, 14 (7), e0217073, doi: 10.1371/journal.pone.0217073
- Griffa A., Piterberg L.I., Özgökmen T.M. (2004). Predictability of Lagrangian particle trajectories: effects of smoothing of the underlying Eulerian flow. *Journal of Marine Research* 62, 1–35, doi: 10.1357/00222400460744609.
- Molcard A., Poulain P.-M., Forget P., Griffa A., Barbin Y., Gaggelli J., Maistre J.D., Rixen M. (2009). Comparison between VHF radar observations and data from drifter clusters in the Gulf of La Spezia (Mediterranean Sea). *Journal of Marine Systems* 78, S79–S89, doi: 10.1016/j.jmarsys.2009.01.012.
- Novelli G., Guigand C.M., Cousin C., Ryan E., Laxague N., Dai H., Haus B., Özgökmen T.M. (2017). A biodegradable surface drifter for ocean sampling on a massive scale. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 34(11), 2509–2532, doi: 10.1175/JTECH-D-17-0055.1.
- Novelli G., Guigand C.M., Özgökmen T.M. (2018). Technological Advances in Drifters for Oil Transport Studies. *Marine Technology Society Journal*, 52(6), 53–61, doi: 10.4031/MTSJ.52.6.9.
- Novelli G., Guigand C.M., Boufadel M., Özgökmen T.M. (2020). On the transport and landfall of marine oil spills, laboratory and field observations. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110805, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110805.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

- 
- Taillandier V., Griffa A., Molcard A. (2006). A variational approach for the reconstruction of regional scale Eulerian velocity fields from Lagrangian data. *Ocean Modelling*, 13(1), 1–24, doi: 10.1016/j.ocemod.2005.09.002.
  - Ullman D.S., O'Donnell J., Kohut J., Fake T., Allen A. (2006). Trajectory prediction using HF radar surface currents: Monte Carlo simulations of prediction uncertainties. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111 (C12), C12005, doi: 10.1029/2006JC003715.