



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Prodotto - Livrable T3.3.1:

Modelli di supporto alle emergenze

Data prevista - Date prévue : 31/01/21

Data di consegna - Date d'échéance : 31/01/21

Versione - Version : V3.0



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Informazioni generali sul documento / Informations générales sur le document	Il documento descrive gli strumenti di previsione operativa attualmente presenti nello spazio di cooperazione e alla base dei servizi operativi implementati / <i>Le document décrit les outils de prévision opérationnelle actuellement présents dans l'espace de coopération et qui sous-tendent les services opérationnels mis en œuvre</i>
Componente / Composante	T3 Sistemi integrati di previsione per la riduzione dei rischi legati alla navigazione / <i>Systèmes intégrés de prévision pour la réduction des risques liés à la navigation</i>
Attività/Activité	T3.3 - Implementazione di sistemi automatici per la ricerca, il soccorso e la sicurezza in mare / <i>Implémentation des systèmes automatiques pour la recherche, le secours et la sécurité en mer</i>
Prodotto/Livvable	T3.3.1
Nome Documento / Nom Document	"Prodotto T3.3.1 - Modelli di supporto alle emergenze" <i>"Livvable T3.3.1: Modèles de support aux urgences"</i>
ID File/ID Fichier	SICOMARPLUS_T3.3.1.pdf

Processo di approvazione / Procédure d'approbation				
	Nome/Nom	Ente/Établissement	Data/Date	Visto/Vu
Coordinatore/ Coordinateur		ARPAL	GG/MM/AA JJ/MM/AA	
CP Leader/ CP Leader			GG/MM/AA JJ/MM/AA	

Processo di revisione / Procédure de révision			
--	--	--	--



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Revisione/ Révision	Autore/Auteur	Data Rev./ Date Rév.	Modifiche/Modifications
V0.0	ARPAL		
V1.0	CNR-IAS		
V2.0	LaMMA		



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Introduzione/ Introduction

L'attività T3.3 ha previsto la realizzazione e il miglioramento di modelli di supporto alle emergenze, quali modelli di propagazione di eventuali sversamenti, integrati con i dati osservati, modelli per la ricerca e il soccorso, o il tracking di oggetti alla deriva in mare, utilizzando i nuovi dati previsionali di vento, correnti e moto ondoso messi a disposizione dalle precedenti attività.

Il prodotto T3.3.1 rappresenta il risultato di quanto è stato sviluppato nell'ambito dei servizi di supporto alle emergenze tramite modelli numerici. Nel seguito vengono descritti gli strumenti implementati dai partner coinvolti nell'attività.



[En Français]

Il modello di previsione di ARPAL

ARPAL dispone, dal settembre 2013, di una piattaforma modellistica dedicata all'ambiente marino. Il sistema è basato su un modello tridimensionale di circolazione dell'intero Mar Ligure, sviluppato da ARPAL e DHI, basato sul codice di calcolo MIKE 3. Il modello si configura come un downscaling del modello idrodinamico 3D alla scala del Mar Mediterraneo del servizio CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, marine.copernicus.eu), da cui riceve le condizioni al contorno in corrispondenza dei contorni aperti. Fornisce una previsione sulle 48 h delle principali forzanti fisiche e idrodinamiche: temperatura, salinità, intensità e direzione della corrente alle diverse profondità, livello del mare (comprensivo di storm surge e marea). Tale modello è stato oggetto, nel corso dell'attività T3.1, di un *upgrade* sia dal punto di vista della risoluzione spaziale, sia nella calibrazione di alcuni parametri, grazie ai dati di osservazioni marine esistenti (per dettagli circa il modello idrodinamico cfr. "SICOMARPLUS_T3.1.1"). Il campo di corrente previsto dal modello è consultabile tramite interfaccia web (cfr. "T4.1.2 Piattaforme webGIS INSPIRE-Compliant per la consultazione sinottica dei prodotti derivanti dal progetto").

Il modello idrodinamico costituisce la "base idrodinamica" sulla quale si innesta il modello di previsione del trasporto e dispersione di inquinanti in mare, quali quelli derivanti da incidenti durante la navigazione (i.e. oil spill), o di oggetti alla deriva.

Per la simulazione della dispersione di inquinante in mare, il sistema inizializza il modello MIKE 3 Oil Spill FM sulla base della previsione idrodinamica più recente disponibile. Il modello di Oil Spill è costituito da un modulo dispersivo di particelle lagrangiane (Particle Tracking) che forniscono le



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

informazioni sulle traiettorie e sulle velocità di spostamento generate dalla corrente e dal vento superficiale, e da un modulo relativo alle trasformazioni chimiche del prodotto organico sversato, in funzione delle variabili di stato.

Il Set up impostato per le simulazioni oil spill fissa il coefficiente di diffusione orizzontale a $5 \text{ m}^2/\text{s}$ e il coefficiente di *windage*, cioè lo spostamento di inquinante per effetto del vento, al 3%. Il time step di integrazione è orario.

Il modello Oil spill, fornisce un importante strumento di supporto alle emergenze nel caso di sversamento di idrocarburi in mare, ed è utilizzabile tramite interfaccia web (<http://modmare.arpal.liguria.it>).

Il portale web si suddivide in due macro sezioni, corrispondenti alle due funzionalità del portale: visualizzazione ed interrogazione delle mappe delle previsioni del modello idrodinamico (sezione *Marine Forecast*), e di realizzazione delle simulazioni speditive ad uso emergenziale di sversamenti in mare di idrocarburi e altri oggetti galleggianti (*Oil e Floating forecast*). La funzionalità *Marine Forecast* risulta aperta e interrogabile dal pubblico, mentre la funzionalità operativa di simulazioni online è riservata al personale Arpal autorizzato.

L'accesso alla *Oil and Floating Forecast* consente di inserire in tempo reale segnalazioni di inquinamenti (oil spill) o oggetti alla deriva (floating) al fine di supportare le autorità competenti nella gestione dell'emergenza (contenimento dell'inquinamento o attività di search and rescue). Le sorgenti possono essere puntuali, areali o da sorgente in movimento.

L'interfaccia permette di inserire le informazioni necessarie alla simulazione: quantità e tipologia di prodotto, coordinate, data e ora dell'incidente o dell'avvistamento (Fig. 1).

Di seguito si riporta come tale strumento ed in generale il modello Oil spill è stato utilizzato per il supporto all'emergenza conseguente la collisione avvenuta il 7.10.2018 tra il traghetto Ulysse e la portacontainer Virginia a nord di Capo Corso.



Interreg



SICOMAR plus

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Fig. 1 : Interfaccia per l'inserimento dell'avvistamento/ Interface pour entrer l'observation

Attività di supporto alle emergenze a seguito della collisione del 7.10.2018

Il servizio svolto da ARPAL, a supporto delle autorità competenti, in caso di emergenza in mare, consiste nella produzione di un bollettino giornaliero di previsione sulle 48 h che include: la previsione delle condizioni meteomarine (vento, onda e corrente) e la previsione delle traiettorie delle chiazze di idrocarburi sulla superficie del mare.

A seguito dello sversamento di carburante causato dalla collisione avvenuta il 7.10.2018 tra il traghetto Ulysse e la portacontainer Virginia a nord della Corsica, ARPAL ha contribuito alla gestione dell'emergenza tramite bollettini contenenti le mappe di previsione della traiettoria degli sversamenti, aggiornati sulla base delle previsioni delle correnti superficiali e del vento, e degli avvistamenti disponibili.

Le previsioni sono state aggiornate sulla base delle osservazioni disponibili, sia da avvistamenti aerei della Guardia Costiera, sia delle immagini satellitari dell'ESA. Tali osservazioni hanno permesso di migliorare le previsioni con la re-inizializzazione della posizione della chiazza.

Si riporta di seguito alcuni esempi del bollettino fornito alla Capitaneria di Porto.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



BOLLETTINO del 7/10/2018



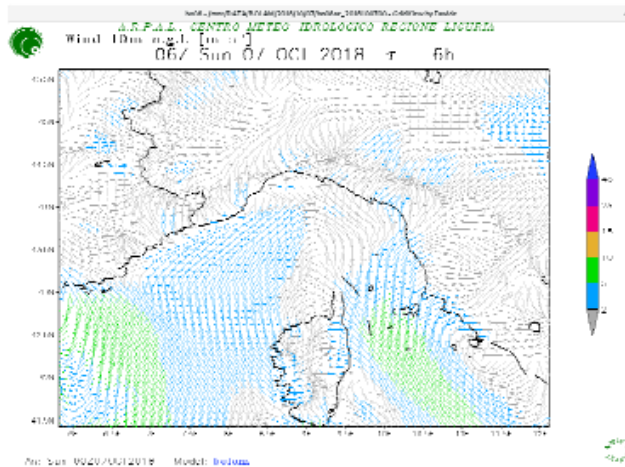
Oggetto	Rapporto simulazione sversamento idrocarburi conseguente alla collisione tra il traghetto Ulysse e la portacontainer Virginia
Data rapporto	07/10/2018

Data sversamento	07/10/2018	Ora	7:30 ora locale
Coordinate iniziali sversamento	Lat 43.249000° Lon 9.474500°		
Quantità	~ 600 metri cubi		
Tipologia	Carburante		

Scenario idrodinamico	run del modello MIKE 21 HD di 48 h a partire dal 7.10.2018 ore 00:00 UTC fino al 9.10.2018 00:00 UTC
Scenario oil spill	inizio dello sversamento alle ore 5 UTC in corrispondenza del punto di collisione di heavy fuel con rilascio in continuo di 5 ore

Condizioni meteorologiche al momento dell'incidente	Mare	Vento
	Quasi calmo	<2 m/s Dir NW

Le condizioni meteorologiche nell'area di collisione al momento dell'incidente sono di mare calmo e vento debole (<2 m/s), come mostrato nella Figura 1





Di seguito vengono riportati i risultati della simulazione.

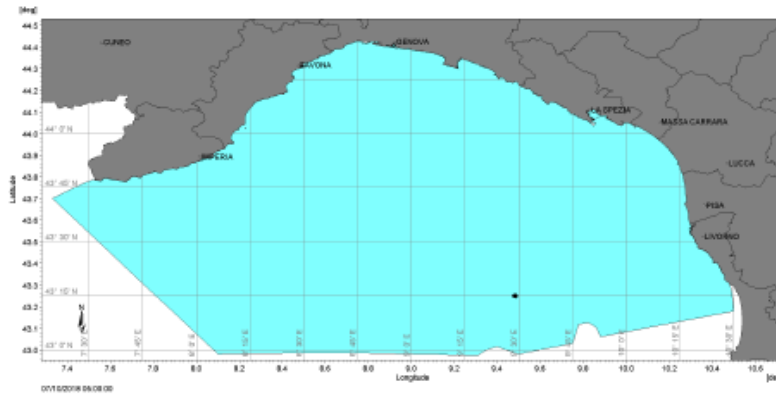


Figura 2. Inizio dello sversamento alle ore 5 UTC

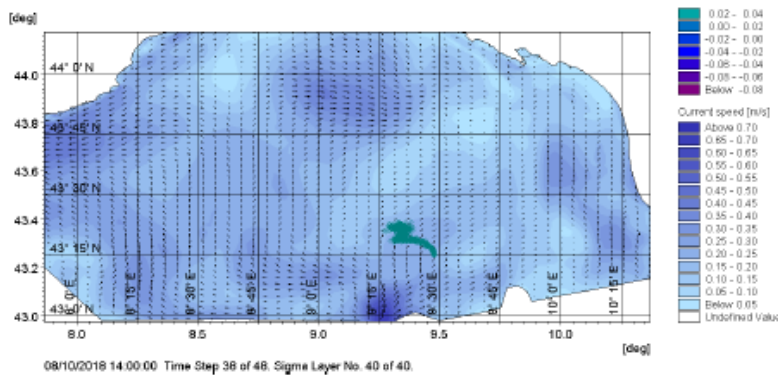


Figura 3. Scenario di previsione per le ore 14 UTC del 8/10/18

La prima simulazione, condotta il 7/10/18, mostra che la macchia rimarrebbe confinata al largo della Corsica nelle prime 38 ore della simulazione (Figura 3).

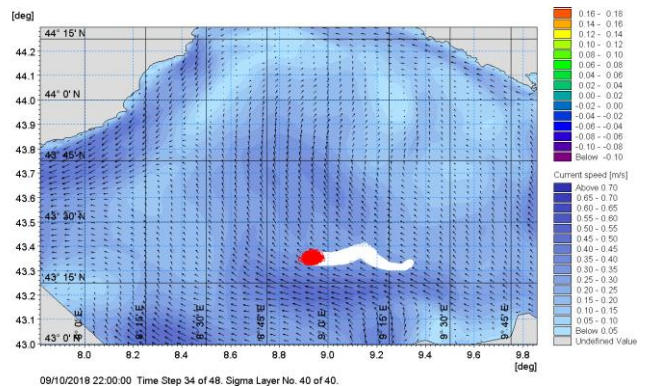
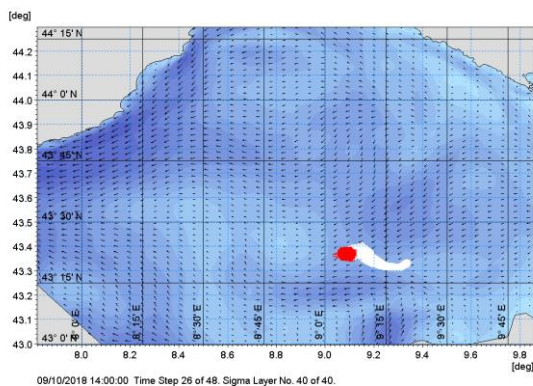
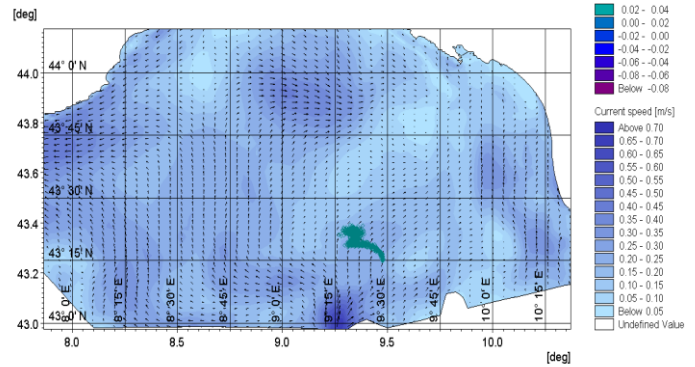
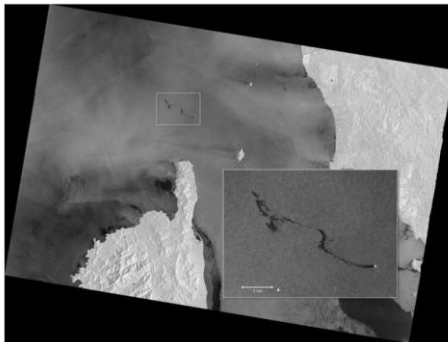


BOLLETTINO del 9/10/2018

Sulla base dell'immagine satellitare della missione Sentinel-1 dell'ESA, catturata alle 16.36, ora locale, del 08/10 (http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2018/10/Mediterranean_slick) e riportata nella figura in alto a sinistra, sono stati effettuati due aggiornamenti delle simulazioni del tracking della macchia:

- 1) È stato ipotizzato che la perdita di carburante sia stata continua dal momento dell'incidente fino all'istante dello scatto. I risultati della simulazione, in ottimo accordo con le osservazioni, si possono osservare nella figura in alto a destra;
- 2) È stata inserita la posizione approssimativa della macchia alle ore 16 locali nella previsione idrodinamica del 08/10. Le previsioni hanno evidenziato uno spostamento in direzione ovest compreso tra 20 e 25 NM dal luogo dell'incidente.

MEDITERRANEAN SLICK





Non è stato possibile prevedere lo spiaggiamento dell'inquinante avvenuto lungo le coste del Golfo di Saint Tropez il 16 ottobre, poiché al di fuori del dominio del modello, la cui ultima previsione e relativo bollettino sono stati forniti il 12 ottobre, e prevedevano l'allontanamento dell'inquinante verso la Francia.

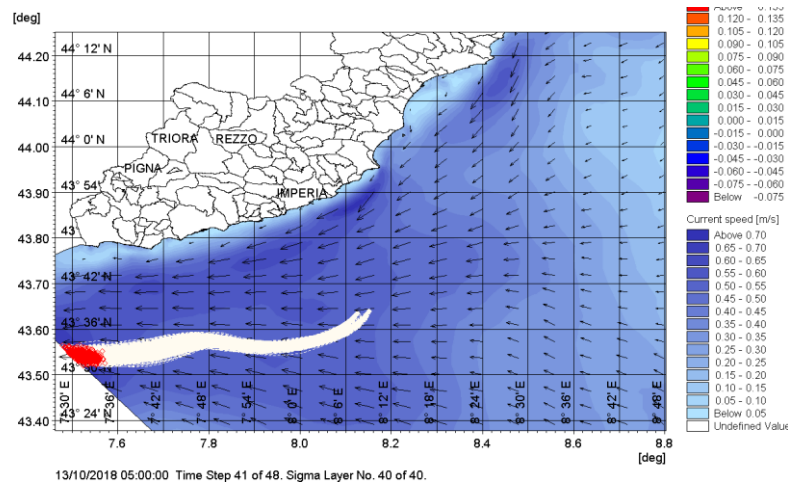


Fig. 2 Previsione dell'ultimo bollettino emesso da ARPAL con allontanamento dell'inquinante verso la Francia.



[En Français]

Bibliografia/ Bibliographie

DHI, 2019. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module – Scientific documentation. Release 2019.

Magri S., Quagliati M., Di Gaetano P., Vairo T., Fabiano B. (2019), Fuel Spill After Ships Collision: Accident Scenario Modelling for Emergency Response, Chemical Engineering Transactions, 74, 1363-1368



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Il modello di previsione del Consorzio LaMMA

Per il supporto alle emergenze in presenza di sversamenti di idrocarburi in mare, il LAMMA utilizza una configurazione di vari modelli in cascata, e in particolare:

- il modello di circolazione ROMS (Shchepetkin and McWilliams 2005), implementato sia per il Mar Tirreno alla risoluzione orizzontale di $1/48^\circ$ ($\sim 2.3\text{km}$) e 30 livelli verticali, sia in una versione più recente con risoluzione orizzontale di $1/72^\circ$ ($\sim 1.2\text{km}$);
- il modello atmosferico WRF-ARW ECMWF (Skamarock et al., 2008) a risoluzione di 3km per le prime 48 ore di simulazione e di 12km per le successive, entrambi trionari a 60 layer verticali fino a 100hPa. Questo modello è anche utilizzato come forzante del modello idrodinamico.
- il modello NOAA GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) per la previsione di evoluzione degli oil slick, che utilizza le correnti fornite dagli output del modello idrodinamico e di quello meteorologico;

I modelli di previsione meteorologica e idrodinamica si trovano descritti più in dettaglio in altri deliverable di progetto (cfr. "SICOMARPLUS_T3.1.1").

Per quanto riguarda il modello GNOME, questo è stato sviluppato dal dipartimento ERD (Emergency Response Division) del National Oceanic and Atmospheric Administration Office of Response and Restoration (NOAA OR&R) allo scopo di fornire una previsione delle traiettorie degli inquinanti sversati in mare ed è pubblicamente distribuito per il libero utilizzo (<https://response.restoration.noaa.gov>) da parte di un'ampia comunità scientifica.

È un modello di tipo Euleriano/Lagrangiano in grado di simulare la dinamica degli inquinanti in mare per gli effetti combinati delle correnti, del vento, della dispersione e dell'evaporazione (Beegle-Krause, 2001; Zelenke et al., 2012). Lo spostamento dell'inquinante per effetto del vento, definito dal parametro 'windage', è espresso in percentuale, con valori tipicamente compresi fra 1-4%. Altri parametri legati agli effetti d'onda (Stokes drift, over-washing, surface drift e circolazione di Langmuir) non sono direttamente considerati anche se possono essere in parte modellati attraverso l'inserimento di ulteriori forzanti additive all'interno del modello.

La dinamica spaziale dello sversamento è modellata come un insieme di masse puntiformi chiamate LE (Elementi Lagrangiani) che si muovono secondo un'equazione di avvezione-diffusione orizzontale 2D, ciascuna descritta da una serie di parametri tra cui: posizione, tempo di rilascio, età, tipo di inquinamento (es. Benzina, cherosene, ecc.) e lo stato (galleggiante, spiaggiato, evaporato). Un LE può raggiungere la costa e rimanervi (effetto di 'beaching') o restare in acqua, in base alle condizioni meteorologiche in atto ed alla tipologia di costa con cui interagisce. L'olio, inoltre, può evaporare a seconda della sua natura e dei suoi costituenti (Boehm et al., 1982). Altri meccanismi di degradazione non



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

sono presi in considerazione.

Al fine di tenere conto dell'incertezza intrinseca dei modelli di vento e di corrente, il modello può fornire due soluzioni per lo stesso scenario: una traiettoria di "migliore stima" (best estimate track) ed una di maggiore incertezza (minimum regret solution). La prima presume che i dati forzanti di input siano corretti, la seconda include variazioni casuali di vento e correnti, consentendo al modello di prevedere anche traiettorie meno probabili, ma potenzialmente possibili.

Attività di supporto all'emergenza a seguito della collisione del 7.10.2018

Nel corso dell'emergenza del 7.10.2018, in cui a seguito della collisione del traghetto Ulysse con la nave portacointer Virginia si è verificato un importante sversamento di idrocarburi in mare a nord della Corsica, il Consorzio LaMMA ha prodotto per le autorità preposte, in particolare per la Capitaneria di Porto, un bollettino giornaliero. All'interno di tale bollettino sono state fornite sia le previsioni a 48h del moto ondoso sia quelle delle correnti, nonché della possibile traiettoria dello sversamento.

La RUN del modello GNOME viene inizializzata il 7 ottobre 2018 alle 5:30 ed ha un'evoluzione fino al 17 ottobre alle 00:00; il tasso di fuoriuscita è continuo di 110 LE/ora dall'inizio della simulazione fino all'11 ottobre alle 00:00, con un rilascio totale di 104 LE (corrispondente al numero massimo consentito dal modello). La scelta di concludere il rilascio dell'olio l'11 ottobre alle 00:00 è stata dovuta alle indicazioni fornite dalla Guardia Costiera.

Il coefficiente di diffusione di turbolenza orizzontale è stato fissato a $1 \cdot 10^5$ m²/s ed il coefficiente di windage è compreso nell'intervallo 1-3%. I coefficienti di incertezza legati alle forzanti di corrente per le componenti trasversali e longitudinali sono rispettivamente del 30% e 10%, con un errore di 0.4 radianti sulla direzione del vento. Il time step di integrazione del modello è orario.

Durante la prima settimana dal giorno dell'incidente, al fine di fornire il bollettino aggiornato alle Istituzioni, il modello è stato inizializzato una volta al giorno, utilizzando i dati idrodinamici aggiornati e, quando disponibili, le informazioni sulla forma e la posizione delle macchie di petrolio ottenute dalle immagini satellitari Sentinel-1A dell'8 ottobre alle 07:28, alle 19:21 e il 9 ottobre alle 19:14. Il contorno della macchia d'olio, impiegato per generare la distribuzione iniziale dei LE per ogni inizializzazione del modello, è stato ricavato da immagini satellitari disegnandolo manualmente sulla mappa tramite GIS. La tipologia di olio, scelta tra quelle disponibili in GNOME e secondo alcune indicazioni fornite dalla Capitaneria di Porto, è il "Fuel oil #4" (per maggiori dettagli sul costituente fare riferimento alla documentazione tecnica Zelenke et al., 2012).

Di seguito qualche schermata relativa al bollettino emesso nel corso dell'emergenza.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Bollettino di previsione
10/10/2018

**SIMULAZIONE DELLO
SVERSAMENTO
CAUSATO DALLA
COLLISIONE
ULYSSE/CSL VIRGINIA**

OGGETTO

Il presente bollettino viene redatto in seguito ad una richiesta della Capitaneria di Porto di Livorno (in data 08/10/2018), nell'ambito delle attività di collaborazione istituzionale, per supportare le attività aventi in oggetto la previsione della possibile evoluzione dello sversamento di olio carburante causato dalla collisione Ulysse/Csl Virginia, avvenuta alle 05:30 UTC circa del giorno 07/10/2018.

Il punto della collisione era: lat. 43° 15.0' N – lon. 009° 28.5' E.

Nell'analisi successiva come sversamento di partenza si considera quello osservato dal satellite SENTINEL-1 alle ore 17:14 UTC del 09/10/2018.

La metodologia seguita per la ricostruzione della traiettoria più probabile dello sversamento si basa su calcolo probabilistico basato su modelli previsionali di vento e correnti marine.

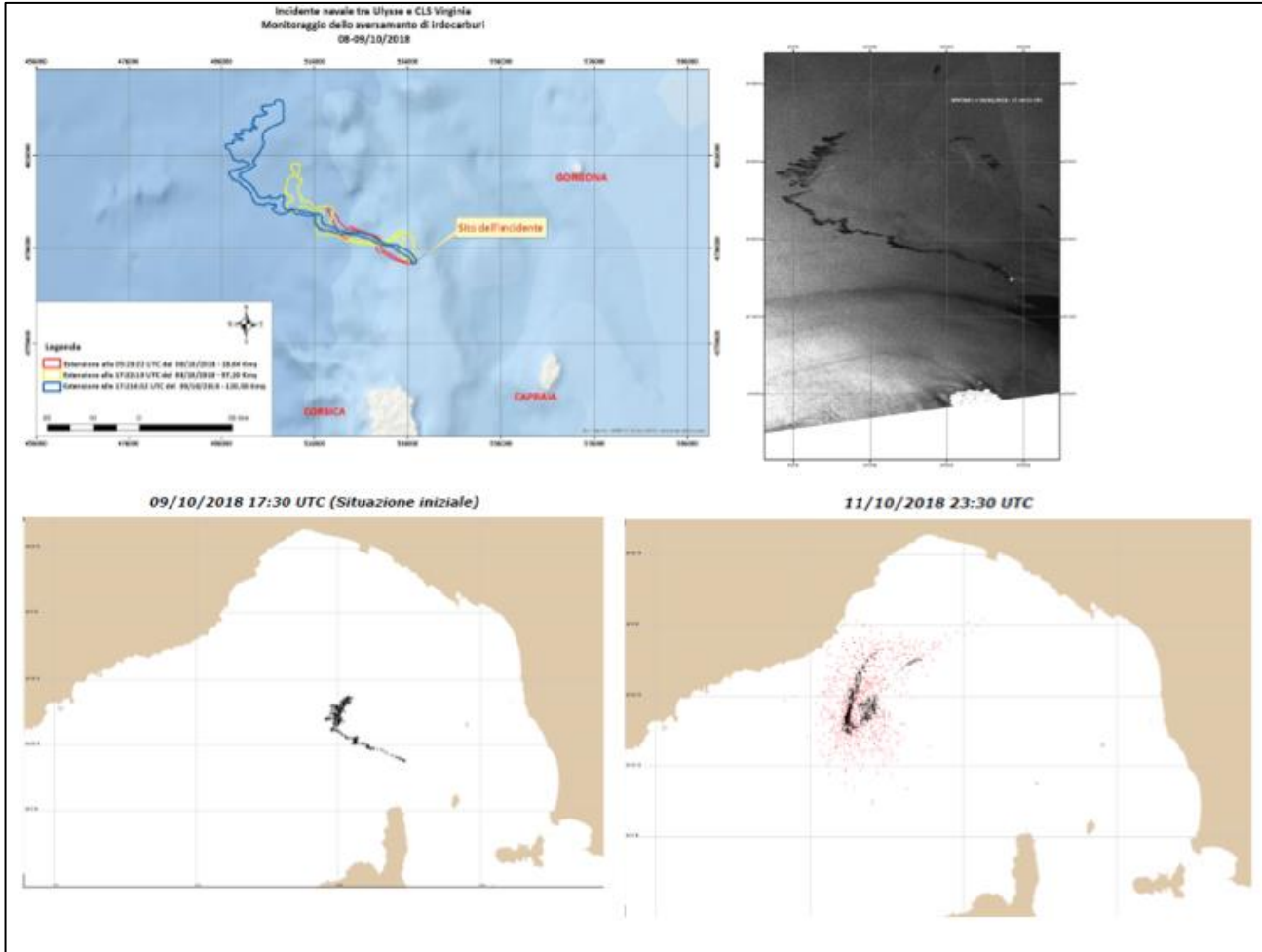


Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



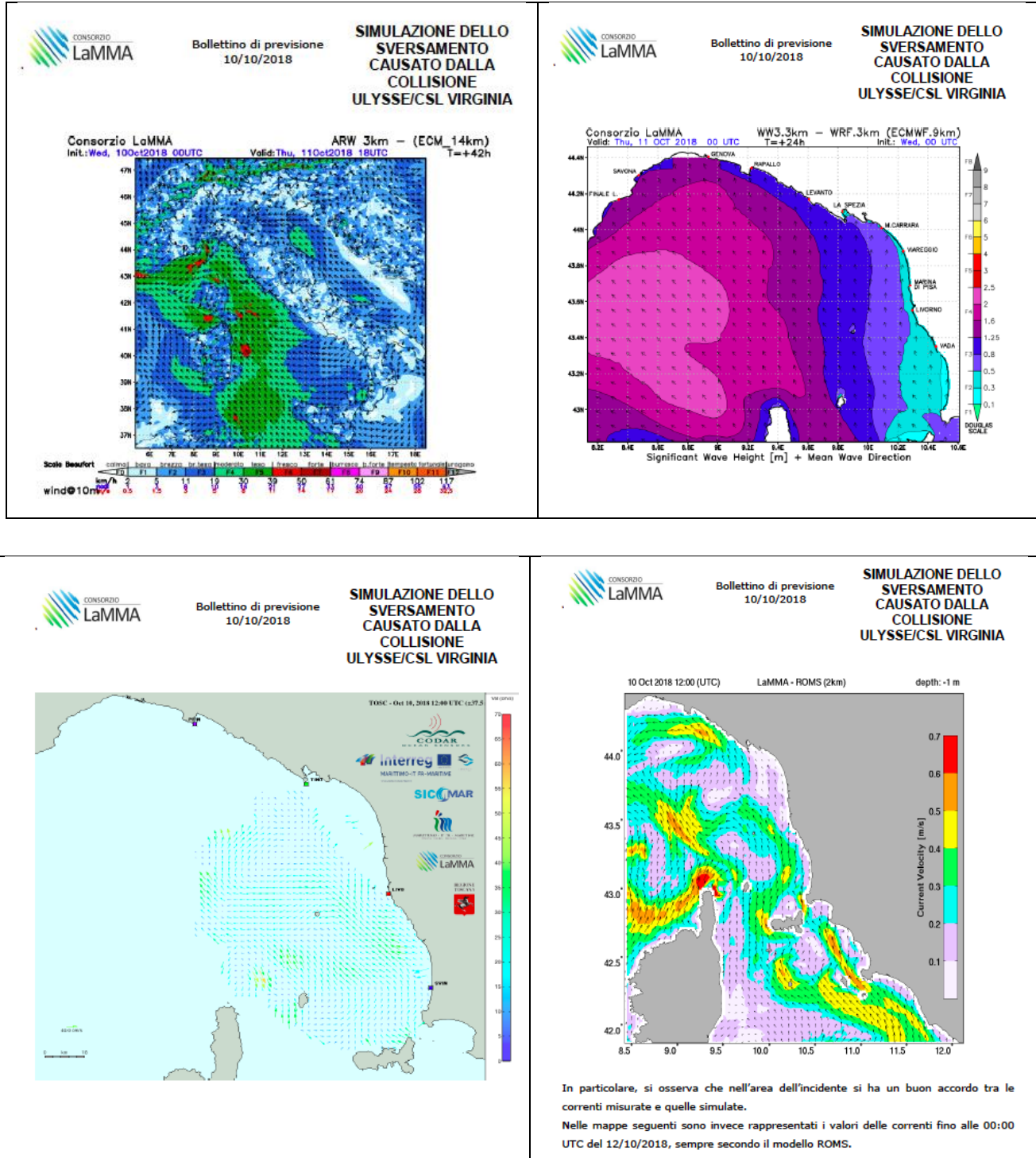


Fig. 3 Alcune schermate estratte dal bollettino emesso dal Consorzio LaMMA per la Capitaneria di Porto il 10/10/2018



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Di seguito in Fig. 4 viene, invece, mostrato l'output del modello in una simulazione più estesa eseguita pochi giorni dopo l'incidente:

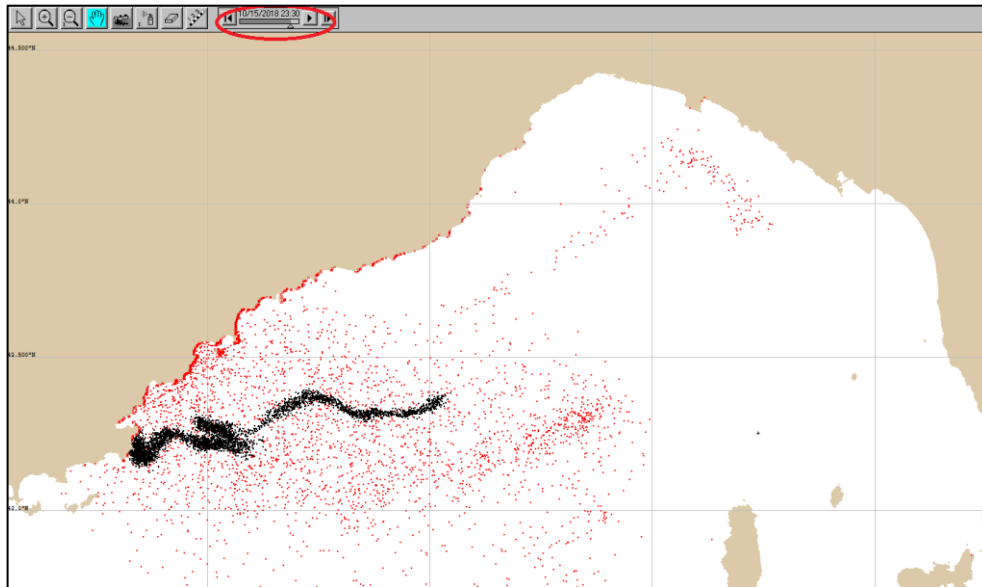


Fig. 4 Previsione dello spiaggiamento nei pressi di St. Tropez in data 16/10/2018 00:00 in una simulazione estesa

Quello che sorprende in questa figura è la capacità del modello di ottenere il momento e il luogo dello spiaggiamento con ragionevole precisione. Le osservazioni, infatti, consentono di ipotizzare il verificarsi di un primo spiaggiamento in prossimità del Golfo di Saint Tropez il 15 ottobre alle ore 23:30 UTC. In questo caso il modello sottostimerà leggermente l'orario di arrivo (documentato nelle prime ore del giorno 16 ottobre) mentre la zona di spiaggiamento è stimata correttamente.

[En Français] 

Utilizzo delle osservazioni per il miglioramento delle previsioni - intercomparazione e definizione di una metrica condivisa

I servizi di monitoraggio e previsione finalizzati a limitare il potenziale impatto degli eventi di inquinamento in mare, come i grandi incidenti di inquinamento da petrolio, traggono grande beneficio dalla disponibilità di osservazioni e prodotti numerici a scala regionale, come i radar HF, le osservazioni satellitari ad alta risoluzione e i modelli di downscaling a scala di bacino. Le attività di previsione della dispersione di idrocarburi durante l'episodio di sversamento di petrolio avvenuto nell'ottobre 2018 nel



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Mar Ligure, a nord di Capo Corso e dell'isola di Capraia, hanno potuto beneficiare della disponibilità di dati.

In quest'area sono infatti presenti i radar HF della rete dedicata al monitoraggio della zona costiera del Mediterraneo nord-occidentale, che hanno fornito informazioni nell'area prossima al punto dell'incidente. La disponibilità delle osservazioni satellitari, ed in particolare dei dati Sentinel-1, ha permesso di mappare l'area interessata dalla successiva propagazione della chiazza di idrocarburi, e quindi non solo di valutare l'affidabilità delle previsioni fornite alle autorità, ma anche la reinizializzazione della posizione della chiazza durante le fasi di risposta all'emergenza.

Inoltre, queste informazioni sono state utilizzate per validare i modelli di oil spill, e ottimizzare la calibrazione di alcuni parametri, al fine di poter fornire previsioni sempre più affidabili e per migliorare le prestazioni dei modelli computazionali in uso, in termini di: risoluzione, forzanti meteorologiche e parametrizzazione dei processi fisici.

In questo contesto è anche estremamente utile confrontare i risultati delle simulazioni effettuate da diverse istituzioni, attraverso l'intercomparazione incrociata dei risultati dei modelli, al fine di affinare le capacità di risposta delle varie istituzioni, e per meglio identificare le fonti di incertezza di questo tipo di simulazioni, e sviluppare procedure comuni e condivise per la gestione delle emergenze. I partner ARPAL e LAMMA hanno collaborato a tal fine per valutare e quantificare le prestazioni dei rispettivi modelli di dispersione dell'inquinante.

Per stimare lo scostamento delle simulazioni con le osservazioni da satellite è stato introdotto uno 'Skill Score', definito da Liu e Weisberg (2011) e studiato per misurare la distanza tra le traiettorie percorse dai drifter. Tale Skill Score, di seguito denominato più sinteticamente 'ss', è definito come:

$$ss = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$$

dove N è il numero di time step dall'inizio della simulazione per tutto l'intervallo di osservazione, L_i è la lunghezza della traiettoria osservata al i -esimo time step, d_i è la distanza ad ogni time step fra la posizione del drifter osservato e quella simulata (Fig. 5).

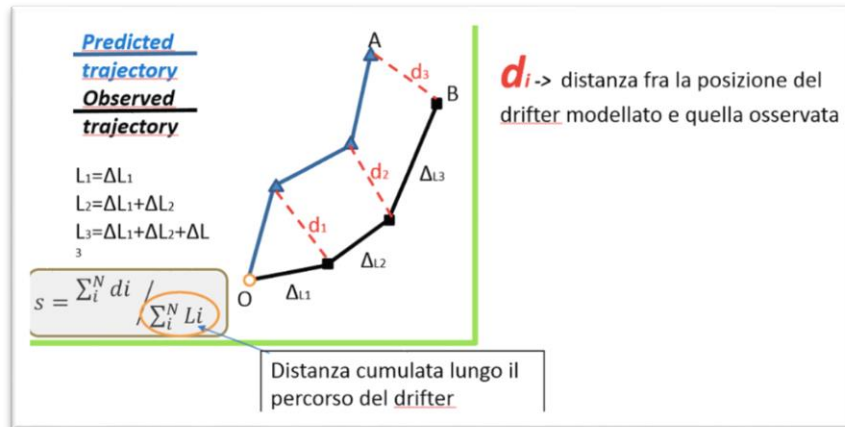


Fig. 5 Skill Score (s) proposto da Liu e Wisberg

Nel caso in esame, trattandosi di una macchia e non di singoli punti, come nel caso dei drifter, per determinare i vari d_i è stata anche introdotta la nozione di distanza introdotta da Besse et al. (2016), relativa a due oggetti di forma irregolare. Considerando, infatti, due oggetti V_1 e V_2 rispettivamente costituiti da un cluster di punti $v^1_i, i = 1, \dots, N_1$ and $v^2_j, j = 1, \dots, N_2$, è possibile esprimere questa distanza $d_i(V_1, V_2)$ come:

$$d_i(V_1, V_2) = \frac{d_{SPD}(V_1, V_2) + d_{SPD}(V_2, V_1)}{2}$$

con

$$d_{SPD}(V_1, V_2) = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \min_{v_j^2} [d(v_i^1, v_j^2)] \text{ and } d_{SPD}(V_2, V_1) = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \min_{v_i^1} [d(v_i^1, v_j^2)].$$

Tali oggetti V_i , opportunamente discretizzati, potrebbero rappresentare, nel caso in esame, le chiazze di petrolio. Con questa metodologia è possibile effettuare non solo un confronto dell'evoluzione delle traiettorie con le osservazioni satellitari, ma anche un'intercomparazione fra il modello adottato dal LaMMA e quello implementato da ARPAL (vedi Fig. 7 e Fig.6).

Il confronto tra l'evoluzione dell'oil slick modellata dal LaMMA con le osservazioni fornite dal satellite Sentinel-1A per tre diversi istanti di tempo è mostrato in Fig. 6. In figura sono evidenziati i contorni dello spot di petrolio modellato (tratteggio più scuro) e quello osservato (tratteggio chiaro). È possibile osservare un sostanziale accordo tra il modello e le osservazioni, fatta eccezione per la parte Nord-Ovest della macchia nera del 9 ottobre 2018 alle ore 19:00, per la quale il modello non è in grado di simulare una flessione a nord-est della macchia petrolifera. Ciò può essere dovuto ad una distorsione esercitata dal vento nell'intervallo compreso tra le 16:00 e le 19:00 del 9 ottobre 2018, non



correttamente prevista dal modello atmosferico o da una deriva legata al moto ondoso, che spinge l'estremità verso Ovest, mentre il flusso di corrente, nello stesso intervallo di tempo piega leggermente verso Nord.

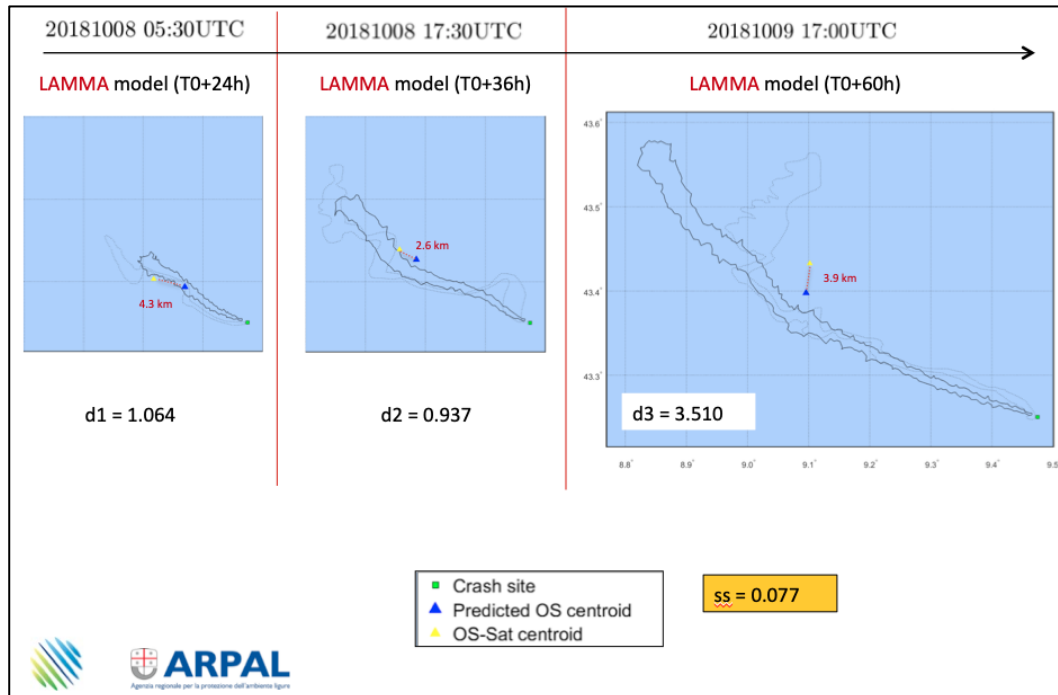


Fig. 6 Skill Score (s) calcolato per la traiettoria LaMMA

La Fig. 7 mostra invece il confronto tra l'evoluzione dell'oil slick modellata da ARPAL (tratteggio più scuro) con le osservazioni Sentinel-1 (tratteggio chiaro).

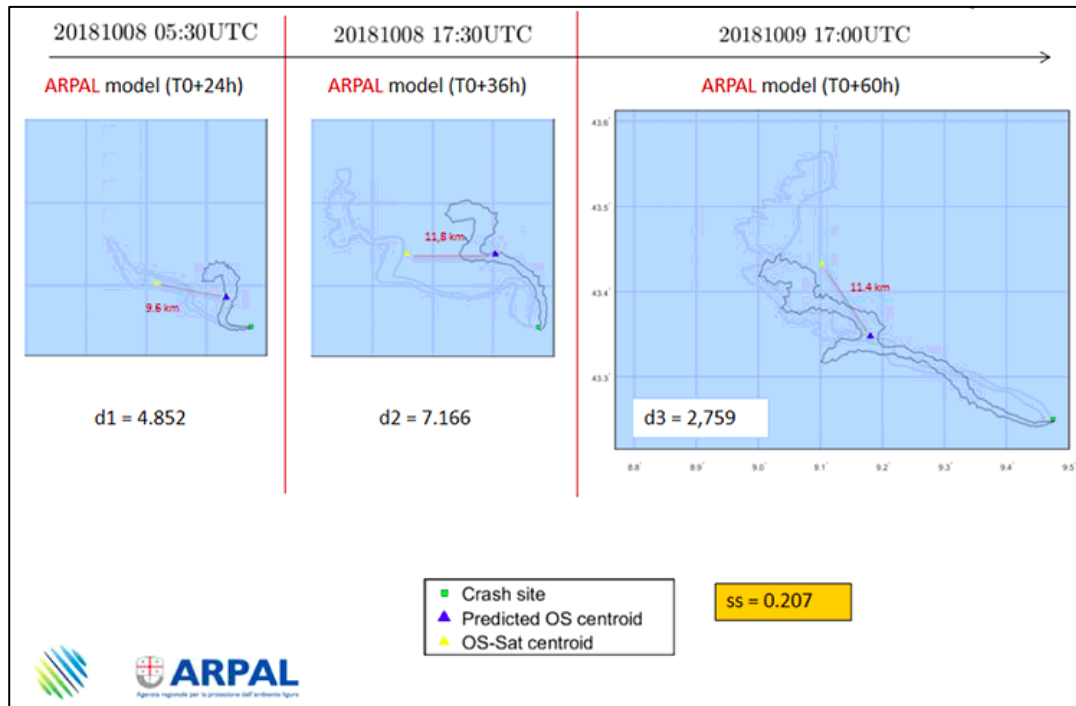


Fig. 7 Skill Score (s) calcolato per la traiettoria di ARPAL

È possibile osservare un sostanziale accordo tra il modello e le osservazioni anche se, comparato con il risultato del modello LAMMA, la distanza tra la macchia modellata e osservata appare inizialmente maggiore per poi sovrapporsi molto meglio alla realtà, al momento della terza osservazione satellitare (T+60h). Ciò può essere dovuto ad una serie di fattori che richiedono approfondimenti. Le condizioni meteo e idrodinamiche delle prime 24 ore dall'incidente potrebbero non essere ricostruite dal modello in maniera ottimale, determinando il "ritardo" della macchia simulata al primo passaggio del satellite. L'estrema sensibilità delle traiettorie alla componente del vento rende difficile discriminare se le discrepanze rilevate siano da attribuire maggiormente alla parametrizzazione piuttosto che all'input stesso del modello meteo (anche perché le osservazioni sull'intensità del vento sono mancanti).

Reinizializzando il modello GNOME due volte con informazioni aggiornate sulla forma della macchia d'olio, precisamente l'8 ottobre alle 19:21 e il 9 ottobre alle 12:15, non sono state rilevate differenze sostanziali e lo Skill resta quasi invariato. Ciò presumibilmente è dovuto sia alla prossimità temporale delle reinizializzazioni sia allo stadio iniziale dell'evoluzione della marea nera. Per questi motivi nelle simulazioni del LaMMA, sono stati mostrati e discussi solo i risultati della corsa di riferimento (inizializzazione T₀).



Nella Tabella 01 vengono confrontati i diversi valori assunti dallo Skill Score sia per le run di ARPAL che del LaMMA. In Tab.02, invece, il confronto tra le distanze e i relativi Skill Score viene eseguito per il solo modello ARPAL per le due distinte inizializzazioni. I valori dello Skill Score sono calcolati assumendo due differenti formulazioni per la distanza: la distanza tra i centroidi e l'SSPD.

Metric	d [km] 08/10/18 – 07:30		d [km] 08/10/18 – 19:30		d [km] 09/10/18 – 19:00		s [-] 09/10/18 – 19:00	
	ARPAL	LaMMA	ARPAL	LaMMA	ARPAL	LaMMA	ARPAL	LaMMA
Centroid	9.600	4.365	11.878	2.635	11.407	3.921	0.462	0.153
SSPD	4.852	1.064	7.166	0.937	2.759	3.510	0.207	0.077

Tab. 01 Confronto tra le distanze e i relativi Skill Score per il modello ARPAL e LaMMA.

Metric	d [km] 08/10/18 – 19:30		d [km] 09/10/18 – 19:00		s [-] 09/10/18 – 19:00	
	ARPAL init.1	ARPAL init.2	ARPAL init.1	ARPAL init.2	ARPAL init.1	ARPAL init.2
Centroid	4.430	-	9.286	15.000	0.241	0.412
SSPD	2.662	-	3.576	2.784	0.110	0.076

Tab. 02 Confronto tra le distanze e i relativi Skill Score per il modello ARPAL con due inizializzazioni.

Un primo confronto mostra che il valore 'ss' calcolato con il modello LaMMA è inferiore a quello di ARPAL per ciascuno dei time step di osservazione nel caso di singola run inizializzata all'istante di riferimento T0, mentre tale valore viene raggiunto nelle run di ARPAL soltanto dopo la seconda inizializzazione per l'istante finale. Il punteggio del modello ARPAL beneficia maggiormente della reinizializzazione proprio per il ritardo accumulato al tempo t0+24. La differente performance dei due modelli è probabilmente legata ai parametri di calibrazione utilizzati, ma anche e principalmente va ascritta ai differenti modelli impiegati sull'area in esame. Tali differenze necessitano maggiori approfondimenti e valutazioni successive da condurre possibilmente su un set più esteso di dati.

Bibliografia/ Bibliographie

- Beegle-Krause, J. (2001). General NOAA oil modeling environment (GNOME): a new spill trajectory model. In International Oil Spill Conference (Vol. 2001, No. 2, pp. 865-871). American Petroleum Institute.
- Liu, Y., & Weisberg, R. H. (2011). Evaluation of trajectory modeling in different dynamic regions using normalized cumulative Lagrangian separation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C9).
- Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, 227(7), 3465-3485.
- Shchepetkin A. F., McWilliams J. C., (2005). The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, *Ocean Modelling* vol. 9, pp. 347-404.
- Zelenke, B., C. O'Connor, C. Barker, C.J. Beegle-Krause, and L. Eclipse (Eds.), (2012). General NOAA



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation. U.S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 40. Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA. 105 pp. http://response.restoration.noaa.gov/gnome_manual.

Besse et al. Review Perspective for Distance Based Clustering of Vehicle Trajectories. IEEE Transactions on Intelligent. Transportation Systems, IEEE, 2016, 17 (11), pp.3306-3317.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

La suite di modelli del CNR-IAS

Nell'ambito del Progetto SICOMARplus il CNR-IAS ha sviluppato una suite di modelli numerici oceanografici e interfacce grafiche per la gestione dei sistemi operativi di previsione applicate nell'area di studio comprendente le Bocche di Bonifacio, il Golfo dell'Asinara e il Golfo di Olbia Tavolara. È stato implementato un sistema operativo in grado di effettuare, *on demand*, simulazioni di previsione delle traiettorie seguite da potenziali sversamenti di idrocarburi nell'area di interesse. Tale sistema si basa sull'utilizzo di un modello idrodinamico e d'onda basato sul metodo degli elementi finiti implementato all'interno di una catena operativa in grado di gestire in maniera automatizzata dati atmosferici e oceanografici di grande scala necessari ad effettuare, quotidianamente, previsioni meteo-marine a 3 giorni. Tale sistema operativo fornisce i dati di correnti superficiali e di moto ondoso ad un modello per la simulazione del trasporto e avvezione in un sistema di riferimento lagrangiano. Tale tool, in maniera operativa, mediante un'interfaccia grafica, è in grado di fornire ad un utente non esperto il *path* seguito da potenziali sversamenti di idrocarburi nonché le aree di impatto a costa degli stessi. Di seguito si riporta una descrizione dei *tool* numerici utilizzati, del sistema di funzionamento del modello operativo di trasporto e dell'interfaccia grafica sviluppata.

1. MODELLO NUMERICO

Al fine di riprodurre la dinamica di circolazione, propagazione del moto ondoso e trasporto superficiale, è stato utilizzato un approccio di modellistica numerica. In particolare, sono stati utilizzati un modello idrodinamico tridimensionale (SHYFEM, Umgiesser et al., 2004) basato sul metodo degli elementi finiti, accoppiato ad un modello spettrale d'onda (WWM, Roland et al, 2009) e ad un modello per la simulazione del trasporto e avvezione superficiale (Cucco et al., 2016). Tale strumento è stato applicato al fine di riprodurre i campi di altezza e direzione del moto ondoso, i campi tridimensionali di correnti indotte dai venti e dal moto ondoso e i processi di trasporto di potenziali sversamenti di idrocarburi a costa. Di seguito si riporta una breve descrizione del modello idrodinamico SHYFEM, del modello spettrale d'onda WWM e del modello di trasporto. SHYFEM (Shallow Water Hydrodynamic Finite Element Model) è una suite di modelli numerici costituiti da un modello idrodinamico open-source sviluppato dai ricercatori del CNR, a cui sono accoppiati diversi moduli numerici in grado di affrontare svariate tematiche ambientali. Date le sue caratteristiche, tale strumento è utilizzato dalla comunità scientifica internazionale specificatamente per riprodurre la circolazione delle acque e la propagazione del moto ondoso in ambienti costieri quali lagune, estuari e aree portuali. Il modello idrodinamico risolve il sistema di equazioni *Shallow-Water* nelle 3 dimensioni con approssimazione di *Boussinesq* in



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

orizzontale e approssimazione idrostatica in verticale nella loro formulazione con i livelli d'acqua e i trasporti (Umgiesser et al., 2004; <https://github.com/SHYFEM-model/shyfem>). Il modello è in grado di riprodurre il campo di moto indotto dai gradienti barotropico, baroclino e della pressione atmosferica, dagli attriti all'interfaccia aria-mare ed all'interfaccia mare-topografia del fondo, dall'avvezione non lineare dai processi turbolenti lungo la verticale e dall'azione del moto ondoso. Il modello utilizza il metodo degli elementi finiti per l'integrazione spaziale e un metodo semi-implicito per l'integrazione temporale del sistema di equazioni considerato. WWM è un modello spettrale d'onda di terza generazione che utilizza il metodo degli elementi finiti per la risoluzione delle *Wave Action Equation* (WAE). Il modello d'onda è accoppiato al modello idrodinamico mediante sistema FIFO, che permette lo scambio bidirezionale d'informazione a prefissati passi temporali tra 2 processi. Entrambi i modelli utilizzano la stessa griglia di calcolo agli elementi finiti e, a predefiniti passi di integrazione, il modello idrodinamico fornisce i campi di velocità, e le profondità di ogni elemento di calcolo tenendo in considerazione le variazioni dovute ai livelli superficiali. Tali informazioni sono utilizzati dal modello d'onda per calcolare i processi di rifrazione dovuti alla corrente e i processi di *shoaling*. Una volta ricevuti i dati relativi a corrente e profondità dal modello idrodinamico, il modello d'onda calcola i termini di *radiation stress* che sono poi utilizzati dal modello idrodinamico per il calcolo delle correnti indotte dal moto ondoso.

Il sistema è inoltre accoppiato con un modello per la simulazione dei processi di trasporto e dispersione di sostanze disperse in acqua, con comportamento attivo o passivo. Tale modello si basa su un approccio lagrangiano alla soluzione dell'equazione di avvezione-diffusione e permette la simulazione dei processi di trasporto di potenziali sversamenti di idrocarburi sversati in mare.

1.1. SETUP MODELLO NUMERICO

Il modello SHYFEM utilizza il metodo agli elementi finiti per l'integrazione spaziale delle equazioni del moto. Tale metodo prevede una discretizzazione del dominio d'indagine mediante l'utilizzo di griglie di calcolo non strutturate e costituite da elementi triangolari di forma e dimensione variabile. Tale metodo permette la riproduzione di geometrie complesse come quelle che caratterizzano gli ambiti costieri. Per l'area d'interesse che comprende le Bocche di Bonifacio, il Golfo di Asinara e il Golfo di Olbia, è stata implementata una griglia di calcolo basata su elementi triangolari di forma e dimensioni variabili con una risoluzione spaziale compresa tra i 50 m, per le aree prossime alla costa e i 5 km per le aree più esterne. Tale risoluzione permette una descrizione dettagliata della geometria e morfologia delle aree costiere in esame. Il dominio di calcolo si estende comprendendo parte del Mar Tirreno centrale e parte del Mar di Sardegna.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Lungo i bordi a 2 domini comprendono l'intero bacino Tirrenico e la maggior parte del Canale di Sicilia, con una risoluzione maggiore lungo i corridoi che caratterizzano i principali regimi ventosi in grado di generare moto ondoso lungo la costa orientale della Sardegna ovvero il Grecale da NE e lo Scirocco da SE. Una tale estensione è motivata dalla scelta di utilizzare dati di vento realistici come forzanti del modello numerico al fine di riprodurre la generazione e la propagazione del moto ondoso senza la necessità di imporre condizioni al contorno, infatti, nei 2 casi, l'intero dominio di calcolo è caratterizzato da una condizione di *Closed Boundary*. In figura X, si riportano le immagini a diversi livelli di ingrandimento della griglia di calcolo utilizzata con le caratteristiche batimetriche ottenute dall'interpolazione di dati cartografici, GEBCO e *multibeam*. Come si nota, l'aumento di risoluzione spaziale è in corrispondenza delle aree costiere in particolare modo in prossimità dell'arcipelago delle tre aree protette presenti nel dominio di indagine ovvero AMP dell'Asinara, AMP di Tavolara e Parco internazionale delle Bocche di Bonifacio. A tale incremento della densità degli elementi corrisponde un aumento dell'accuratezza del calcolo numerico.

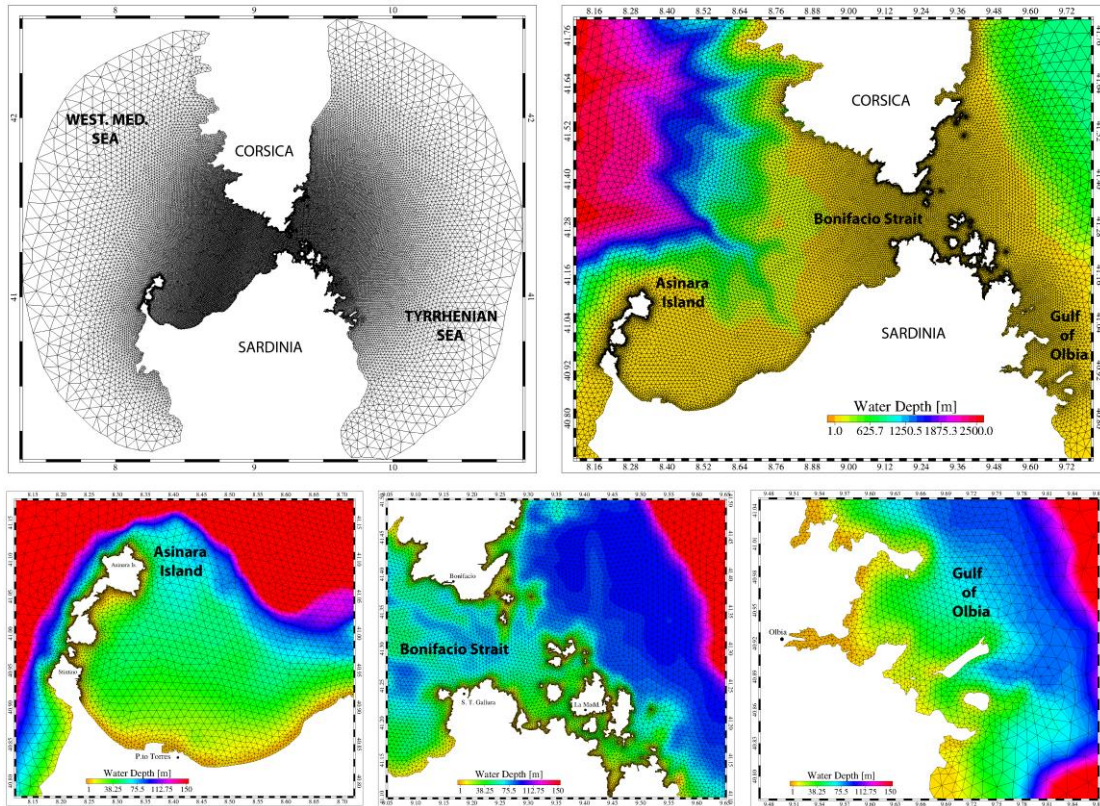


Fig. 8: *mesh* agli elementi finiti e batimetria per dominio di indagine. I pannelli rappresentano l'intera griglia di calcolo e le aree di particolare interesse tra cui il Golfo dell'Asinara, le Bocche di Bonifacio e il Golfo di Olbia.

Per quanto riguarda la direzione verticale, il modello prevede l'utilizzo di una discretizzazione a z-levels costituita da 15 livelli con passo variabile da 0.5 m a 500 metri.

Lungo i bordi aperti corrispondenti ai limiti Est e Ovest della mesh di calcolo, il modello, nella versione operativa, è forzato con le serie temporali di livello, Temperatura e Salinità previsti quotidianamente dal sistema COPERNICUS (<https://marine.copernicus.eu/>). Per quanto riguarda le forzanti atmosferiche, il vento, le variazioni di pressione atmosferica e i flussi di calore sono forniti dal sistema ECMWF (*European Centre for the Medium-Range Weather Forecasts*). Il modello nella versione operativa utilizza un sistema di assimilazione dei campi di TS ottenuti dal sistema COPERNICUS in modalità *nudging*. Sono inoltre considerate le variazioni di livello ai bordi aperti generate dalla marea astronomica e fornite da modello mareale globale OTIS-OSU (<https://www.tpxo.net/otis>). Il modello nella sua versione operativa è stato validato mediante confronto con i dati sperimentali di velocità superficiali ottenuti da correntometri lagrangiani (drifters) rilasciati nell'area di indagine nell'ambito del progetto



SICOMARplus (WP 2.3). Si rimanda a Quattrocchi et al., (2021) per una descrizione accurata del sistema operativo, dei prodotti di previsione e dei risultati del processo di validazione.

2. SISTEMA OPERATIVO

In Fig. 9 è riportato lo schema logico dei processi interessati al funzionamento del sistema operativo di previsione oceanografica e di previsione dell’impatto di sversamenti in mare.

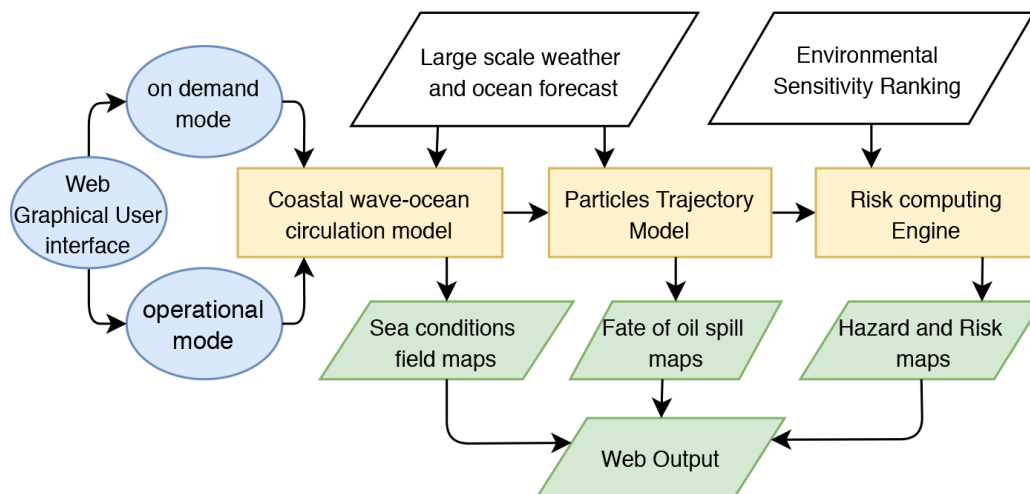


Fig. 9: schema di funzionamento del sistema operativo di previsione correnti moto ondoso e trasporto superficiale per le Bocche di Bonifacio, Golfo di Asinara e di Olbia.

Come si nota dalla Fig. 9, il funzionamento del sistema si basa su una fase operativa che prevede il rilascio automatico di prodotti di previsione oceanografica consultabili presso <http://www.seaforecast.cnr.it/sicomarplus/index.php/en/forecasts/> e una fase *on demand* per l’avvio di simulazioni di previsione di trasporto di idrocarburi, il cui accesso è vincolato ad un controllo utente. In Fig. 10 si riportano alcuni esempi di prodotti operativi rilasciati quotidianamente su base quadri-diurna che includono l’altezza e la direzione del moto ondoso, la intensità e direzione della corrente, la temperatura superficiale e lo *stranding time*. Quest’ultima variabile indica su una scala colorimetrica la pericolosità dei tratti di mare in funzione del tempo necessario al raggiungimento della costa da parte di uno sversamento di idrocarburi ivi rilasciato. In rosso sono quindi indicate le aree con un tempo di spiaggiamento inferiore alle 6 ore, mentre in blu quelle con tempi superiori alle 48 ore.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

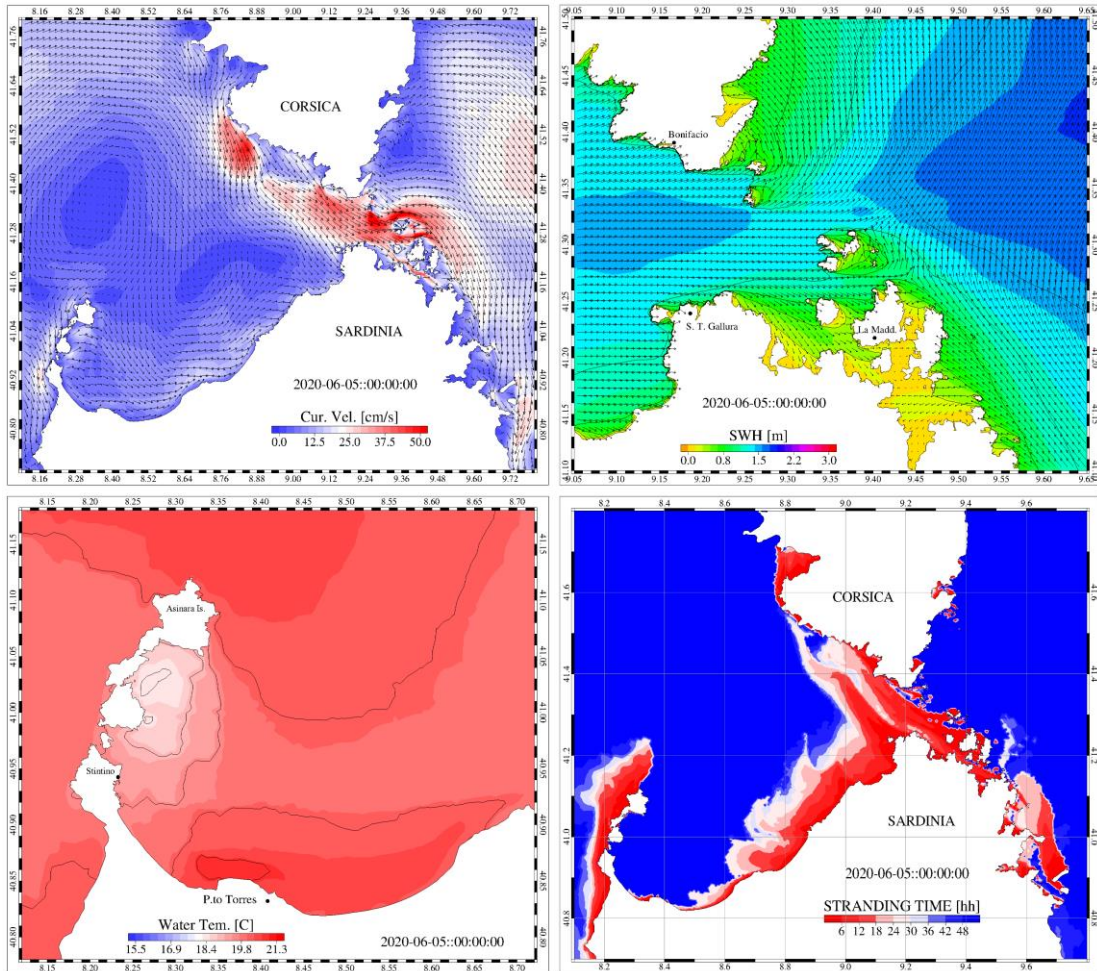


Fig. 10: prodotti di previsione oceanografica rilasciati dal sistema operativo sviluppato in SICOMARplus

Per quanto riguarda la fase on demand del sistema operativo, la struttura di funzionamento descritta in Fig. 9 prevede una prima fase di trasferimento e pre-processamento dei dati di Input del modello lagrangiano costituiti dai campi di correnti superficiali, altezza e direzione d'onda e velocità e direzione del vento. Successivamente si procede alla quantificazione delle condizioni iniziali dello sversamento alla simulazione del trasporto in superficie e dell'eventuale spiaggiamento nell'intervallo di tempo massimo di 3 giorni ed infine al calcolo del rischio di impatto ottenuto da una procedura di *post-processing* dei dati lagrangiani.

L'interazione con questo sistema avviene tramite un'interfaccia grafica basata su WEBGIS il cui accesso è vincolato ad un rilascio di password (<http://www.seaforecast.cnr.it/sicomarplus/wp-login.php>). In particolare, una volta definita la posizione, l'estensione e il momento del rilascio della massa inquinante



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

le cui caratteristiche di galleggiabilità dovranno essere per semplicità assimilabili ad un idrocarburo (figura H, pannello up), il sistema, in maniera automatizzata, calcola il percorso seguito dalle particelle numeriche utilizzate come *proxy* dell'agente inquinante. I dati prodotti dalla simulazione sono salvati su disco e classificati in modo da costituire un database di scenari. I risultati prodotti sono quindi processati in formato grafico (*png*) e in forma di mappe statiche relative alla posizione oraria della macchia durante il periodo simulato con incluse informazioni relative alla traiettoria media seguita dallo sversamento e all'eventuale presenza di particelle spiaggiate evidenziate in verde (Fig. 11, pannello *middle*). Infine mediante un apposito *post-processing* dei dati lagrangiani e, mediante l'utilizzo d'informazioni relative alla vulnerabilità delle aree costiere (Quattrocchi et al., 2021) sono calcolati e plottati gli indici di rischio di impatto di idrocarburi a costa (figura H, pannello down). È inoltre possibile visualizzare in modalità animata l'evoluzione della macchia nel tempo e nello spazio mediante la generazione di gif animati.



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

SICOMAR plus

HOME IL PROGETTO SVERSAMENTO PETROLIO PREVISIONI

Sversamento petrolio

Delimitare l'area dello sversamento inserendo almeno tre marker nella mappa sottostante

Map Satellite Sicomar Plus

Google

Dati sversamento

Data (r) 2021-04-20

Ora (r) 12:30

Quantità m3 (r) 1

Tempo obbligatorio

Ricalcola

SICOMAR plus

HOME IL PROGETTO SVERSAMENTO PETROLIO PREVISIONI

Output

30 / 30

2021-04-22 22:30:00

Net Secure - seaforecast Levy 8

Fig. 11: GUI per la gestione del sistema operativo per la simulazione del percorso seguito da potenziali sversamenti di idrocarburi in mare. Pannello *up*, WEBGIS per la gestione dell'inizializzazione della



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

macchia, pannello *middle*, risultati ottenuti relativi allo spostamento e modifica caratteristiche della macchia, pannello *down*, calcolo del fattore di rischio di impatto a costa.

Bibliografia/ Bibliographie

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).

Quattrocchi G, Simeone S, Pes A, Sorgente R, Ribotti A and Cucco A (2021) An Operational Numerical System for Oil Stranding Risk Assessment in a High-Density Vessel Traffic Area. *Front. Mar. Sci.* 8:585396. doi: 10.3389/fmars.2021.585396

Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., Hsu, T. W., Liao, 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.

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.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Prodotto - Livrable T3.3.1:

Modèles de soutien aux situations d'urgence

Data prevista - Date prévue : 31/01/21

Data di consegna - Date d'échéance : 31/01/21

Versione - Version : V3.0 



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Informazioni generali sul documento / Informations générales sur le document	Il documento descrive gli strumenti di previsione operativa attualmente presenti nello spazio di cooperazione e alla base dei servizi operativi implementati / <i>Le document décrit les outils de prévision opérationnelle actuellement présents dans l'espace de coopération et qui sous-tendent les services opérationnels mis en œuvre</i>
Componente / Composante	T3 Sistemi integrati di previsione per la riduzione dei rischi legati alla navigazione / <i>Systèmes intégrés de prévision pour la réduction des risques liés à la navigation</i>
Attività/Activité	T3.3 - Implementazione di sistemi automatici per la ricerca, il soccorso e la sicurezza in mare / <i>Implémentation des systèmes automatiques pour la recherche, le secours et la sécurité en mer</i>
Prodotto/Livrabile	T3.3.1
Nome Documento / Nom Document	“Prodotto T3.3.1 - Modelli di supporto alle emergenze” <i>“Livrabile T3.3.1: Modèles de support aux urgences”</i>
ID File/ID Fichier	SICOMARPLUS_T3.3.1.pdf

Processo di approvazione / Procédure d'approbation				
	Nome/Nom	Ente/Établissement	Data/Date	Visto/Vu
Coordinatore/ Coordinateur		ARPAL	GG/MM/AA JJ/MM/AA	
CP Leader/ CP Leader			GG/MM/AA JJ/MM/AA	

Processo di revisione / Procédure de révision			
--	--	--	--



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Revisione/ Révision	Autore/Auteur	Data Rev./ Date Rév.	Modifiche/Modifications
V0.0	ARPAL		
V1.0	CNR-IAS		
V2.0	LaMMA		



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Introduzione/ Introduction

L'attività T3.3 a prévu la réalisation et l'amélioration des modèles de soutien aux situations d'urgence, comme des de propagation des déversements, intégrées aux données observées, aux modèles de recherche et de sauvetage, ou au suivi d'objets à la dérive en mer, en utilisant les nouvelles données de prévision du vent, des courants et du mouvement des vagues mises à disposition par les activités précédentes.

Le produit T3.3.1 représente le résultat de ce qu'on a développé dans le domaine des services de support aux urgences à travers des modèles numériques. Dans la partie suivante on décrit les instruments mis en œuvre par les partenaires appartenant à l'activité.



[En Français]

Le modèle de prévision de ARPAL

ARPAL possède, depuis septembre 2013, une plateforme de modélisation dédiée au milieu marin. Le système est basé sur un modèle de circulation tridimensionnel de la mer Ligure, développé par ARPAL et DHI, et basé sur le code de calcul MIKE 3. Le modèle est configuré comme une downscaling du modèle hydrodynamique 3D à l'échelle de la mer Méditerranée du service CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, marine.copernicus.eu). Il fournit une prévision sur 48h des principaux forçages physiques et hydrodynamiques : la température, la salinité, l'intensité et la direction du courant à différentes profondeurs, le niveau de la mer. Ce modèle a fait l'objet, lors de l'activité T3.1, d'une mise à jour tant au niveau de la résolution spatiale que de la calibration de certains paramètres, grâce aux données d'observations marines existantes (pour avoir plus de détails sur le modèle hydrodynamique voir "SICOMARPLUS_T3.1.1"). Le domaine actuel prévu par le modèle est consultable via l'interface web (voir « T4.1.2 Plateformes webGIS INSPIRE-Compliant pour la consultation synoptique des produits issus du projet »).

Le modèle hydrodynamique constitue la "base hydrodynamique" sur laquelle se forme le modèle de prévision du transport des polluants dans la mer.

En ce qui concerne la simulation de la dispersion du polluant dans la mer, le système initialise le modèle MIKE 3 Oil Spill FM sur la base des prévisions hydrodynamiques les plus récentes disponibles. Le modèle Oil Spill est constitué d'un module dispersif de particules lagrangiennes (Particle Tracking) qui fournit les informations concernant les trajectoires et les vitesses de déplacement générées par le courant et



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT F R-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

le vent, et par un module lié aux transformations chimiques du produit organique déversé, en fonction des variables d'état.

Le Set up set pour les simulations de oil spill fixe le coefficient de diffusion horizontale à 5 m²/s et le coefficient de *windage*, c'est-à-dire le déplacement du polluant causé par le vent, à 3%.

Le modèle Oil spill est un instrument de support important dans les cas d'urgence comme dans le déversement d'hydrocarbures dans la mer et il peut être utilisé à travers d'une interface web (<http://modmare.arpal.liguria.it>).

Le site est divisé en deux macro-sections, correspondantes aux deux fonctions du site: la visualisation et l'interrogation des mappes des prévisions du modèle hydrodynamique (section *Marine Forecast*), et de la réalisation de simulations dans les cas des déversements dans la mer d'hydrocarbures et d'autres objets flottants (*Oil e Floating forecast*). La fonction *Marine Forecast* est ouverte au public, au contraire la fonction des simulations en ligne est réservée aux personnel Arpal habilité.

L'accès à l'*Oil and Floating Forecast* permet d'insérer en temps réel les signalements de polluantes (oil spill) ou d'objets à la dérive (floating) avec le but de supporter les autorités compétentes dans la gestion de l'urgence. Les sources peuvent être ponctuels, surfaciques ou des sources en mouvement.

L'interface permet d'insérer les informations nécessaires pour la simulation: la quantité et la typologie du produit, les coordonnées, la date et l'heure de l'accident ou de l'observation (Fig. 1).

Ici on souligne comme cet instrument et en général le modèle Oil spill a été utilisé pour le support dans les cas d'urgence après la collision qui a eu lieu le 7.10.2018 entre le ferry Ulysse e le conteneur Virginia dans le nord de Cap Corse.



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Fig. 1 : Interfaccia per l'inserimento dell'avvistamento/ Interface pour entrer l'observation

Activité de soutien aux émergences après la collision du 7.10.2018

L'activité de l'ARPAL, à l'appui des autorités compétentes, en cas d'urgence en mer, consiste dans la production d'un bulletin de prévision journalier sur 48 heures qui comprend : la prévision des conditions maritimes et météorologiques (vent, vague et courant) et la prévision des trajectoires des nappes d'hydrocarbures sur la surface de la mer.

Après le déversement du carburant provoqué par la collision du 7.10.2018 entre le ferry Ulysse et le conteneur Virginia au nord de la Corse, l'ARPAL a contribué à la gestion de l'urgence à travers des bulletins et des cartes prévisionnelles de la trajectoire du déversement, mises à jour en fonction de la surface et du vent, et des observations disponibles.

Les prévisions ont été mises à jour sur la base des observations disponibles, soit par les observations aériennes des garde-côtes, soit par des images satellitaires de l'ESA. Ces observations ont permis d'améliorer les prédictions en réinitialisant la position de la nappe.

Voici quelques exemples de bulletin fournis à la Capitainerie du Port.



BULLETIN DU 7/10/2018



Oggetto	Rapporto simulazione sversamento idrocarburi conseguente alla collisione tra il traghetto Ulysse e la portacontainer Virginia
Data rapporto	07/10/2018

Data sversamento	07/10/2018	Ora	7:30 ora locale
Coordinate iniziali sversamento	Lat 43.249000° Lon 9.474500°		
Quantità	~ 600 metri cubi		
Tipologia	Carburante		

Scenario idrodinamico	run del modello MIKE 21 HD di 48 h a partire dal 7.10.2018 ore 00:00 UTC fino al 9.10.2018 00:00 UTC		
Scenario oil spill	inizio dello sversamento alle ore 5 UTC in corrispondenza del punto di collisione di heavy fuel con rilascio in continuo di 5 ore		

Condizioni meteomarine al momento dell'incidente	Mare	Vento
	Quasi calmo	<2 m/s Dir NW

Le condizioni meteomarine nell'area di collisione al momento dell'incidente sono di mare calmo e vento debole (<2 m/s), come mostrato nella Figura 1

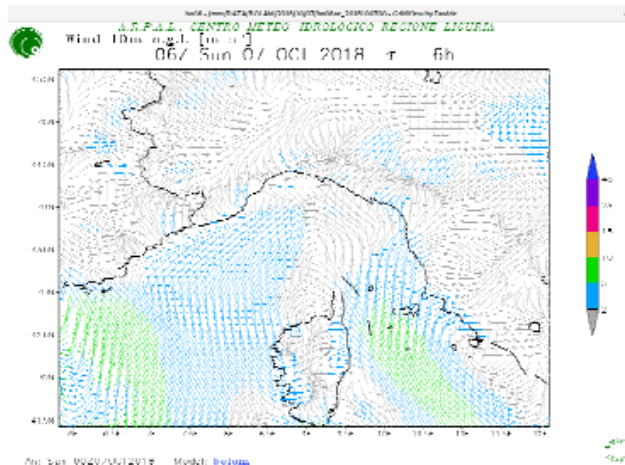


Figura 1. Previsione dell'intensità (m/s) e direzione del vento a 10 m



Di seguito vengono riportati i risultati della simulazione.

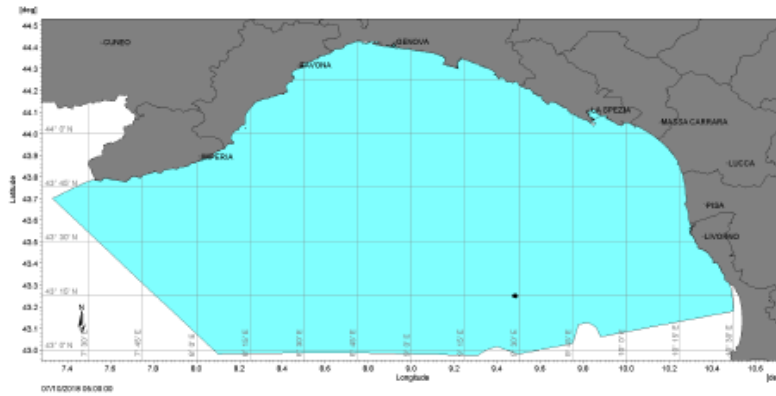


Figura 2. Inizio dello sversamento alle ore 5 UTC

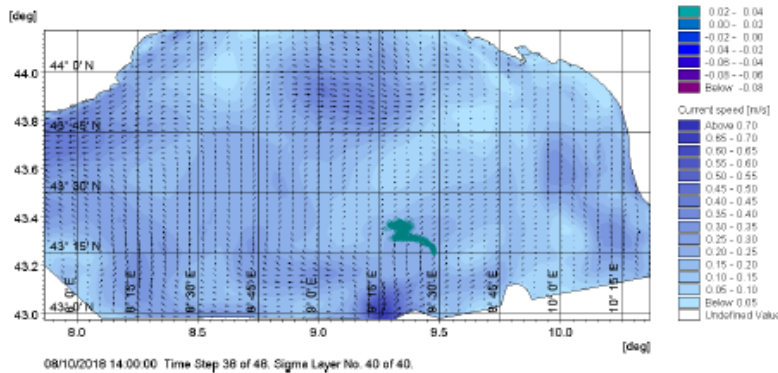


Figura 3. Scenario di previsione per le ore 14 UTC del 8/10/18

La prima simulazione, condotta il 7/10/18, mostra che la macchia rimarrebbe confinata al largo della Corsica nelle prime 38 ore della simulazione (Figura 3).

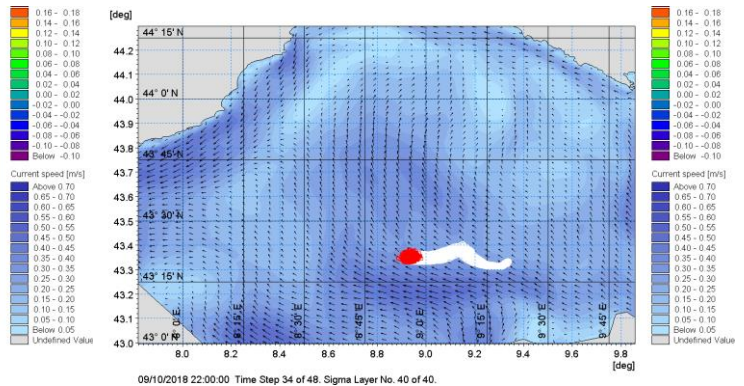
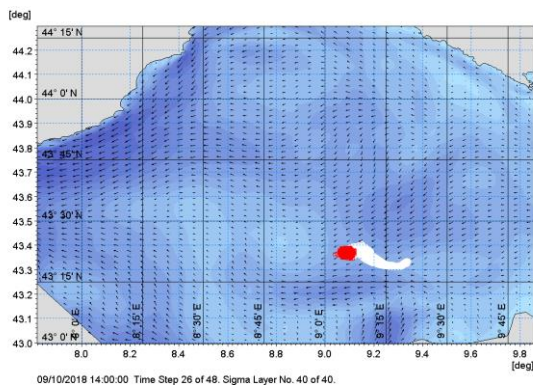
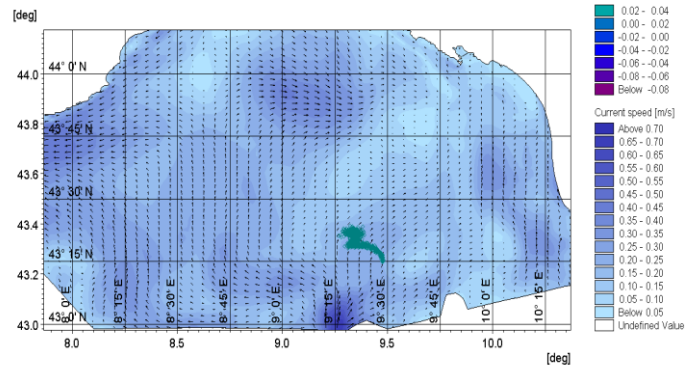
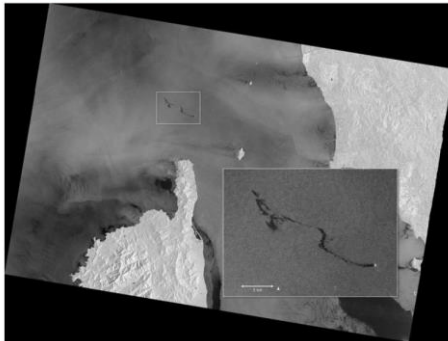


BULLETIN DU 9/10/2018

Sur la base de l'image satellitaire de la mission Sentinel-1 de l'ESA, prise à 16.25 du 8/10 (http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2018/10/Mediterranean_slick) et montré dans la figure en haut à gauche, on a effectué deux mises à jour des simulations du tracking de la nappe :

- 1) On a supposé que la fuite de carburant ait continué depuis le moment de l'accident jusqu'au moment de la prise de vue. Les résultats de la simulation sont visibles sur la figure en haut à droite ;
- 2) On a inséré la localisation approximative de la nappe à 16 heures locales dans la prévision hydrodynamique du 08/10. Les prévisions ont montré un décalage vers l'ouest entre 20 et 25 NM du lieu de l'écrasement.

MEDITERRANEAN SLICK





Il n'a pas été possible de prévoir l'échouage du polluant qui a eu lieu le long des côtes du golfe de Saint Tropez le 16 octobre, car hors du domaine du modèle, dont la dernière prévision et le bulletin relatif ont été fournis le 12 octobre, et ils prévoyaient l'éloignement du polluant vers la France.

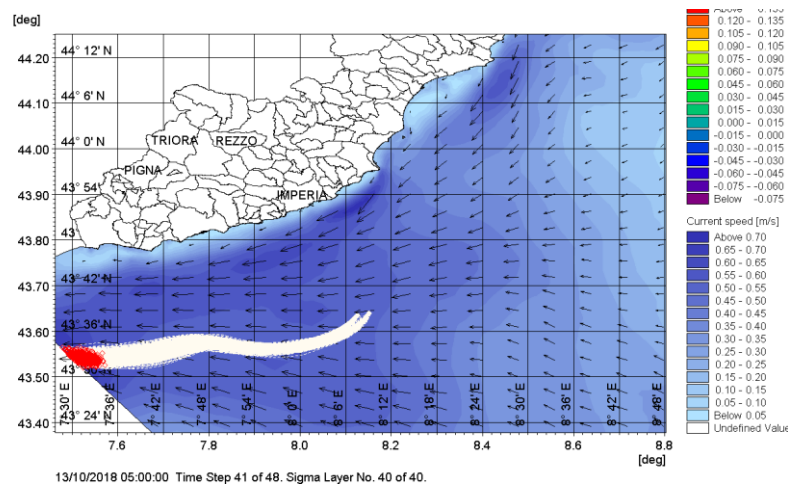


Fig. 2 Prévision du dernier bulletin émis par ARPAL avec l'éloignement du polluant vers la France.

Bibliografia/ Bibliographie

DHI, 2019. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module – Scientific documentation. Release 2019.

Magri S., Quagliati M., Di Gaetano P., Vairo T., Fabiano B. (2019), Fuel Spill After Ships Collision: Accident Scenario Modelling for Emergency Response, Chemical Engineering Transactions, 74, 1363-1368

Le modèle de prévision du Consortium LaMMA

En ce qui concerne le support aux émergences, le LAMMA utilise une configuration des différents modèles, et en particulier:



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

- le modèle de circulation ROMS (Shchepetkin and McWilliams 2005), employé soit pour la mer Tyrrhénien avec une résolution horizontale de $1/48^\circ$ ($\sim 2.3\text{km}$) et 30 niveaux verticales, soit pour une version plus récente avec une résolution horizontale de $1/72^\circ$ ($\sim 1.2\text{km}$);
- le modèle atmosphérique WRF-ARW ECMWF (Skamarock et al., 2008) avec une résolution de 3km pour les premières 48 heures de simulation et 12 km pour les suivantes. Ce modèle a été utilisé comme forçant du modèle hydrodynamique.
- le modèle NOAA GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) pour la prévision de l'évolution des oil slick, qui utilise les courants fournis par les outputs du modèle hydrodynamique et du modèle météorologique ;

Les modèles de prévision se trouvent avec plus des détails sur le projet (cfr. "SICOMARPLUS_T3.1.1") En ce qui concerne le modèle GNOME, il a été développé par le département ERD (Emergency Response Division) du National Oceanic and Atmospheric Administration Office of Response and Restoration (NOAA OR&R) avec le but de fournir une prévision des trajectoires des polluants déversés dans la mer et il est distribué avec libre utilisation (<https://response.restoration.noaa.gov>) par la majorité des communautés scientifiques.

Il s'agit d'un modèle de type Eulérien/Lagrangien capable de simuler la dynamique des polluants dans la mer due aux effets combinés des courants, du vent, de la dispersion et de l'évaporation (Beegle-Krause, 2001 ; Zelenke et al., 2012). Le déplacement du polluant causé par le vent, défini par le paramètre « windage », est exprimé en pourcentage, avec des valeurs typiquement comprises entre 1 et 4 %. D'autres paramètres liés aux effets des vagues (Stokes drift, over-washing, surface drift et circulation de Langmuir) ne sont pas directement pris en compte même s'ils peuvent être en partie modélisés par l'insertion de forçages supplémentaires dans le modèle.

La dynamique spatiale du déversement est modélisée comme un ensemble de masses ponctuelles appelées LE (Éléments Lagrangiens) qui se déplacent selon une équation d'advection-diffusion horizontale 2D, chacune décrite par une série de paramètres comprenant : la position, le temps de relâchement, l'âge, le type de la pollution (ex. l'essence, le kérosène, etc.) et l'état (flottant, échoué, évaporé). Un LE peut atteindre la côte et y rester (effet « échouage ») ou rester dans l'eau, en fonction des conditions météorologiques et maritimes actuelles et du type de côte avec lequel il interagit. En plus, le pétrole peut s'évaporer selon sa nature et ses constituants (Boehm et al., 1982). Les autres mécanismes de dégradation ne sont pas pris en compte.

Afin de prendre en compte l'incertitude intrinsèque des modèles de vent et de courant, le modèle peut apporter deux solutions pour un même scénario : une « best estimate track » et une de plus grande incertitude (minimum regret solution). La première suppose que les données de forçage d'entrée sont



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

correctes, la deuxième inclut des variations aléatoires de vent et de courants, permettant au modèle de prévoir les trajectoires moins probables, mais potentiellement possibles.

Activité de support à l'émergence après la collision du 7.10.2018

Lors de l'urgence du 7.10.2018, au cours de laquelle suite à la collision du ferry Ulysse avec le conteneur Virginia il y a eu un important déversement d'hydrocarbures dans la mer au nord de la Corse, le Consortium LaMMA a produit pour les autorités compétentes, en particulier pour la Capitainerie Office, un bulletin quotidien. A l'intérieur de ce bulletin, on a fourni à la fois les prévisions à 48h du mouvement des vagues et celles des courants, ainsi que la trajectoire possible du déversement.

Le modèle GNOME RUN initialisé le 7 octobre 2018 à 5h30 a une évolution jusqu'au 17 octobre à 00h00 ; le taux de fuite est continu de 110 LE/heure du début de la simulation jusqu'au 11 octobre à 00h00, avec une sortie totale de 104 LE (correspondant au nombre maximum autorisé par le modèle).

Le coefficient de diffusion de la turbulence horizontale a été fixé à $1 * 10^5 \text{ m}^2 / \text{s}$ et le coefficient de dérive est compris entre 1 et 3 %.

Au cours de la première semaine après le jour de l'accident, le modèle a été initialisé une fois par jour afin de fournir le bulletin mis à jour aux institutions, en utilisant les données hydrodynamiques et les informations sur la forme et la position de la nappe de pétrole par les images satellites Sentinel-1A du 8 octobre à 07h28, 19h21 et du 9 octobre à 19h14. Le contour de la nappe, utilisé pour générer la distribution initiale des LE à chaque initialisation du modèle, a été obtenu à partir d'images satellites.

Le type d'huile, choisi parmi ceux disponibles dans GNOME et selon certaines indications fournies par l'Autorité Portuaire, est le « Fuel oil #4 » (pour plus de détails sur le constituant, voir la documentation technique Zelenke et al., 2012).

Voici quelques captures d'écran relatives au bulletin émis lors de l'urgence.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Bollettino di previsione
10/10/2018

**SIMULAZIONE DELLO
SVERSAMENTO
CAUSATO DALLA
COLLISIONE
ULYSSE/CSL VIRGINIA**

OGGETTO

Il presente bollettino viene redatto in seguito ad una richiesta della Capitaneria di Porto di Livorno (in data 08/10/2018), nell'ambito delle attività di collaborazione istituzionale, per supportare le attività aventi in oggetto la previsione della possibile evoluzione dello sversamento di olio carburante causato dalla collisione Ulysse/Csl Virginia, avvenuta alle 05:30 UTC circa del giorno 07/10/2018.

Il punto della collisione era: lat. 43° 15.0' N – lon. 009° 28.5' E.

Nell'analisi successiva come sversamento di partenza si considera quello osservato dal satellite SENTINEL-1 alle ore 17:14 UTC del 09/10/2018.

La metodologia seguita per la ricostruzione della traiettoria più probabile dello sversamento si basa su calcolo probabilistico basato su modelli previsionali di vento e correnti marine.

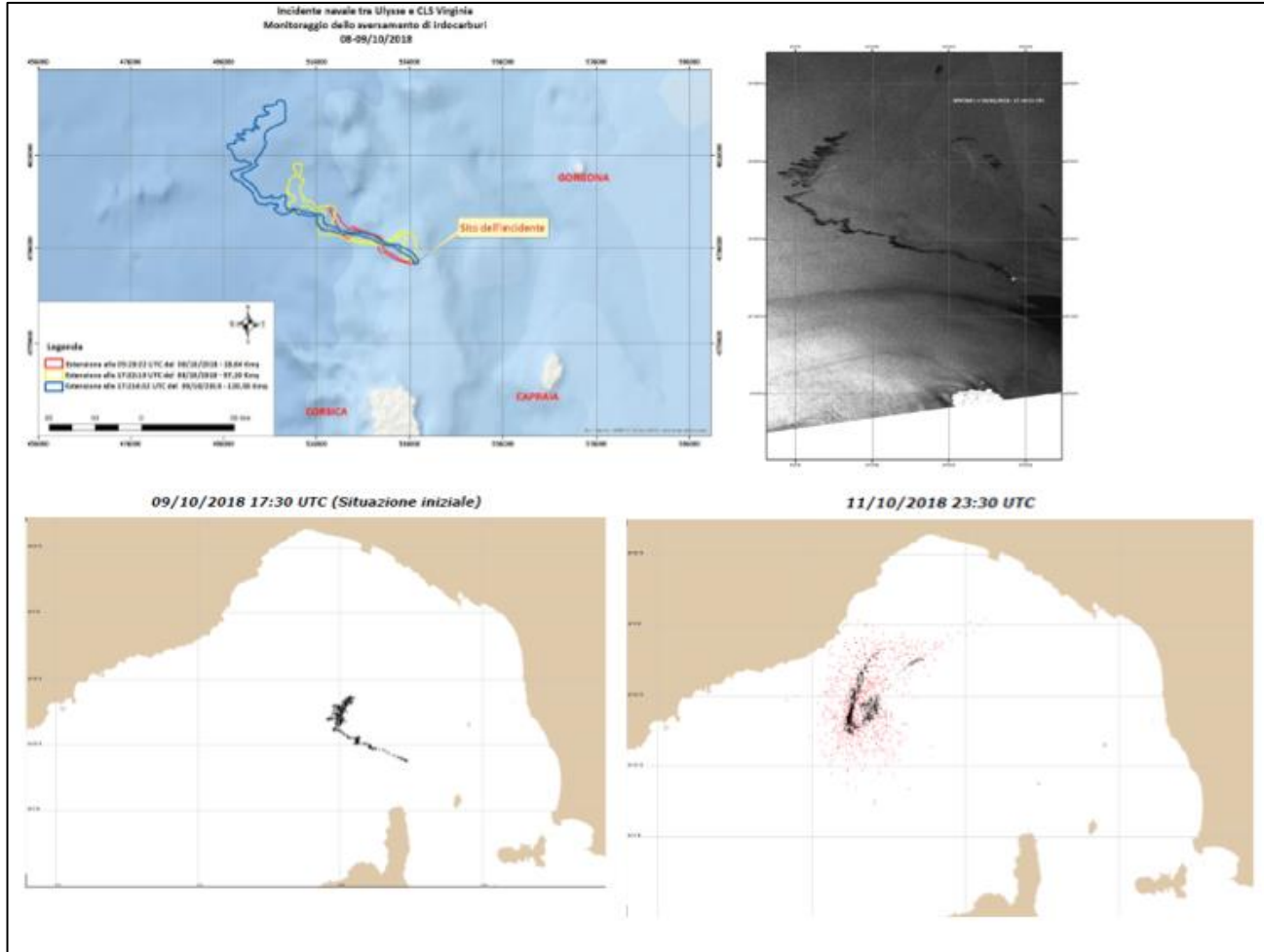


Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



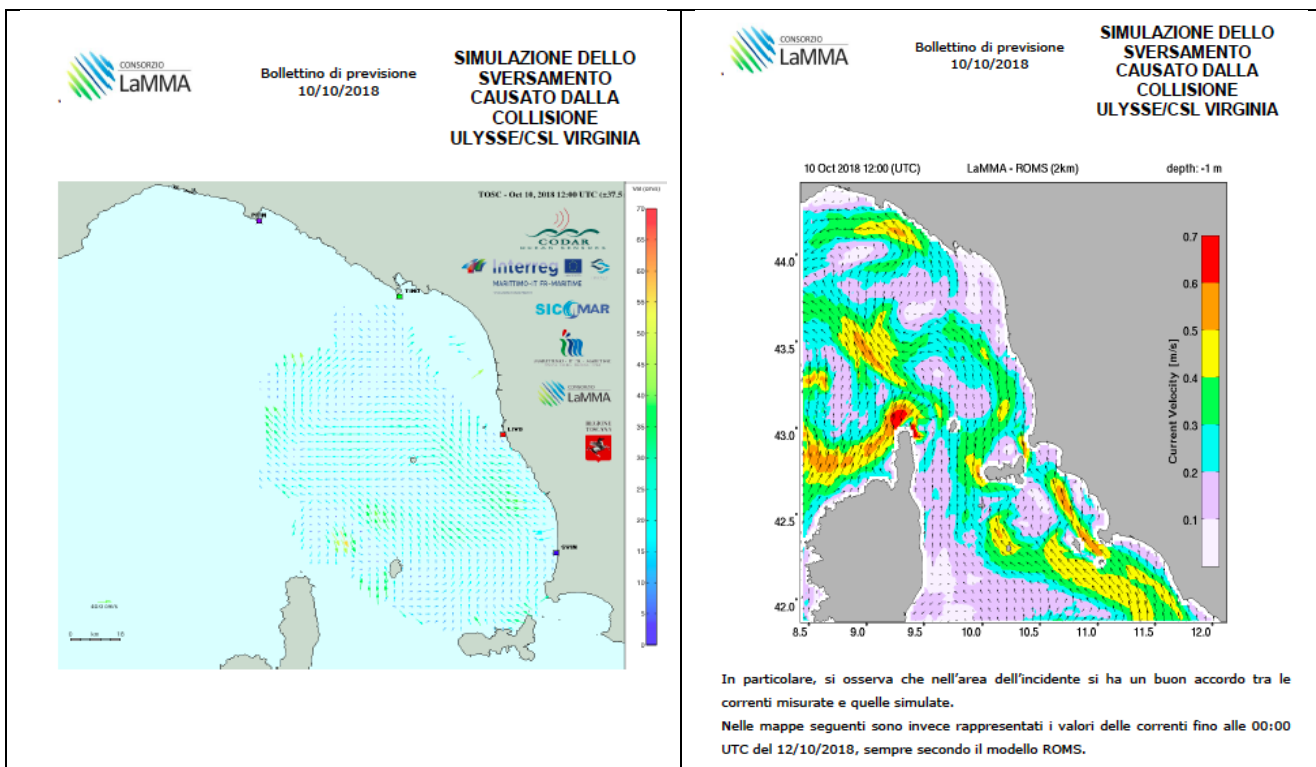
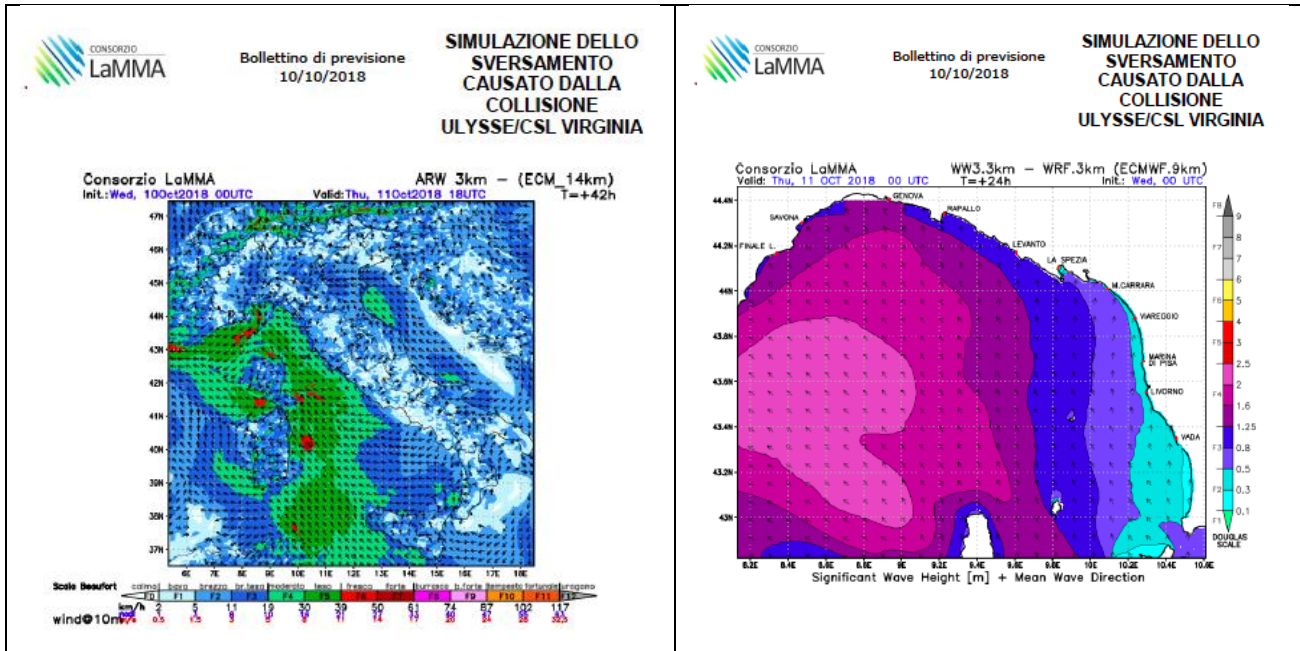


Fig. 3 Quelques captures d'écran extraites du bulletin émis par le Consortium LaMMA pour l'Autorité Portuaire le 10/10/2018



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Ici, dans la Fig. 4 on montre l'output du modèle dans une simulation plus étendue effectuée quelque jour après de l'accident :

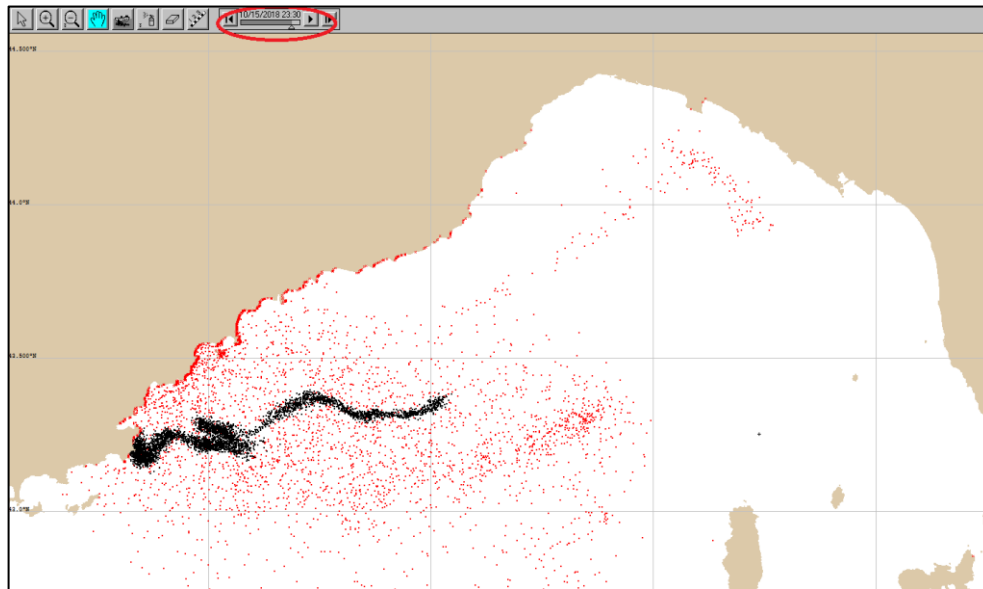


Fig. 4 Prévisions d'échouage près de Saint-Tropez le 16/10/2018 00:00 dans une simulation étendue

Ce qui étonne dans cette figure est la capacité du modèle d'obtenir le moment et le lieu de l'échouage avec précision. Les observations permettent de supposer un premier échouage près du Golfe de Saint Tropez le 15 octobre à 23:30h UTC. Dans ce cas, le modèle sous-estime l'horaire d'arrivée, au contraire la zone d'échouage est estimée correctement.

[En Français] 

Utilisation des observations pour l'amélioration des prévisions – inter-comparaison et définition d'une métrique partagée

Les services de surveillance et de prévision visant à limiter l'impact potentiel des événements de pollution dans la mer, tels que les accidents de pollution causés par les hydrocarbures, bénéficient de la disponibilité d'observations et de produits numériques à l'échelle régionale, tels que les radars HF et les observations satellitaires à haute résolution. Les activités de prévision de la dispersion des hydrocarbures lors de l'épisode du déversement de pétrole qui s'est déroulé en octobre 2018 dans la mer Ligurienne, au nord du Cap Corse et sur l'île de Capraia, ont bénéficié de la disponibilité des données.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Dans cette zone se trouvent en effet les radars HF du réseau dédié à la surveillance de la zone côtière du nord-ouest de la Méditerranée : ils ont fourni des informations dans la zone proche du point de l'accident. La disponibilité des observations satellitaires, et notamment des données Sentinelle-1, a permis de cartographier la zone touchée par la propagation de la nappe d'hydrocarbures, et donc non seulement d'évaluer la fiabilité des prévisions fournies aux autorités, mais aussi pour réinitialiser l'emplacement de la nappe pendant les phases d'intervention d'urgence.

En outre, ces informations ont été utilisées pour valider les modèles de déversements d'hydrocarbures, et pour optimiser la calibration de certains paramètres, afin de pouvoir fournir des prédictions de plus en plus fiables et d'améliorer les performances des modèles de calcul utilisés, en termes de : résolution, forçage météorologique et paramétrisation des processus physiques.

Dans ce cadre, il est également extrêmement utile de comparer les résultats de simulations réalisées par des différentes institutions, à travers la comparaison croisée des résultats des modèles, afin d'affiner les capacités de réponse des différentes institutions, et de mieux identifier les sources d'incertitude de ce type de simulations. Les partenaires ARPAL et LAMMA ont collaboré pour évaluer et quantifier les performances de leurs modèles de dispersion des polluants.

Pour estimer l'écart des simulations avec les observations satellitaires, on a introduit 'Skill Score', défini par Liu et Weisberg (2011) et créée pour mesurer la distance entre les trajectoires parcourues par les drifters. Ce Skill Score, ci-après dénommé plus brièvement « ss », est défini comme :

$$ss = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$$

où N est le nombre de time step depuis le début de la simulation pour tout l'intervalle d'observation, L_i est la longueur de la trajectoire observée au i -ième time step, d_i est la distance à chaque time step entre la position du drifter et celle simulée (Fig. 5).

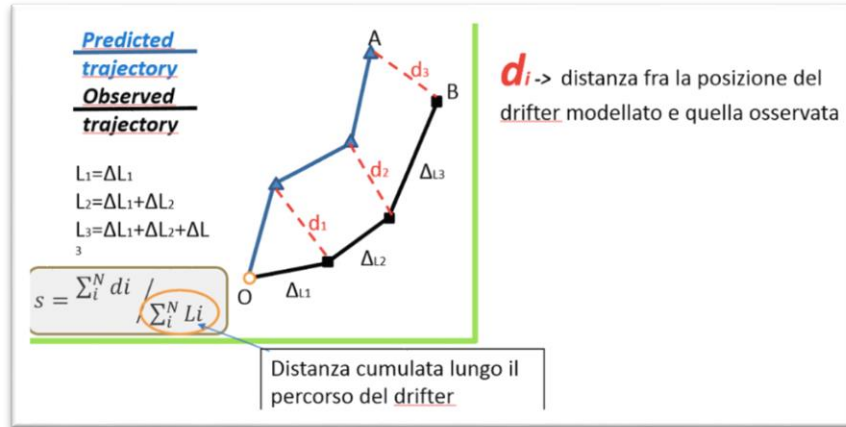


Fig. 5 Skill Score (s) proposé par Liu e Wisberg

Dans ce cas, vue qu'il s'agit d'une nappe, pour déterminer les différentes d_i , on a inséré la notion de distance introduite par Besse et al. (2016), qui concerne les deux objets avec une forme irrégulière. En considérant les objets V_1 e V_2 constitués par un cluster des points $v^1_i, i = 1, \dots, N_1$ and $v^2_j, j = 1, \dots, N_2$, il est possible d'exprimer cette distance $d_i(V_1, V_2)$ comme:

$$d_i(V_1, V_2) = \frac{d_{SPD}(V_1, V_2) + d_{SPD}(V_2, V_1)}{2}$$

avec

$$d_{SPD}(V_1, V_2) = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \min_{v_j^2} [d(v_i^1, v_j^2)] \text{ and } d_{SPD}(V_2, V_1) = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \min_{v_i^1} [d(v_i^1, v_j^2)].$$

Les objets V_i pourraient représenter, dans le cas présent, la nappe de pétrole. Avec cette méthodologie il est possible d'effectuer non seulement une comparaison de l'évolution des trajectoires avec les observations satellitaires, mais aussi une inter-comparaison entre le modèle adopté par LaMMA et celui mis en œuvre par ARPAL (voir Fig. 7 et Fig.6).

La comparaison entre l'évolution de la nappe de pétrole modélisée par LaMMA avec les observations fournies par le satellite Sentinel-1A pour trois instants de temps différents est présentée sur la figure 6. La figure met en évidence les contours de la nappe de pétrole modélisée (hachure plus foncé) et celui observé (hachurage clair). Il est possible d'observer un accord substantiel entre le modèle et les observations, à l'exception de la partie Nord-Ouest de la nappe du 9 octobre 2018 à 19h00.

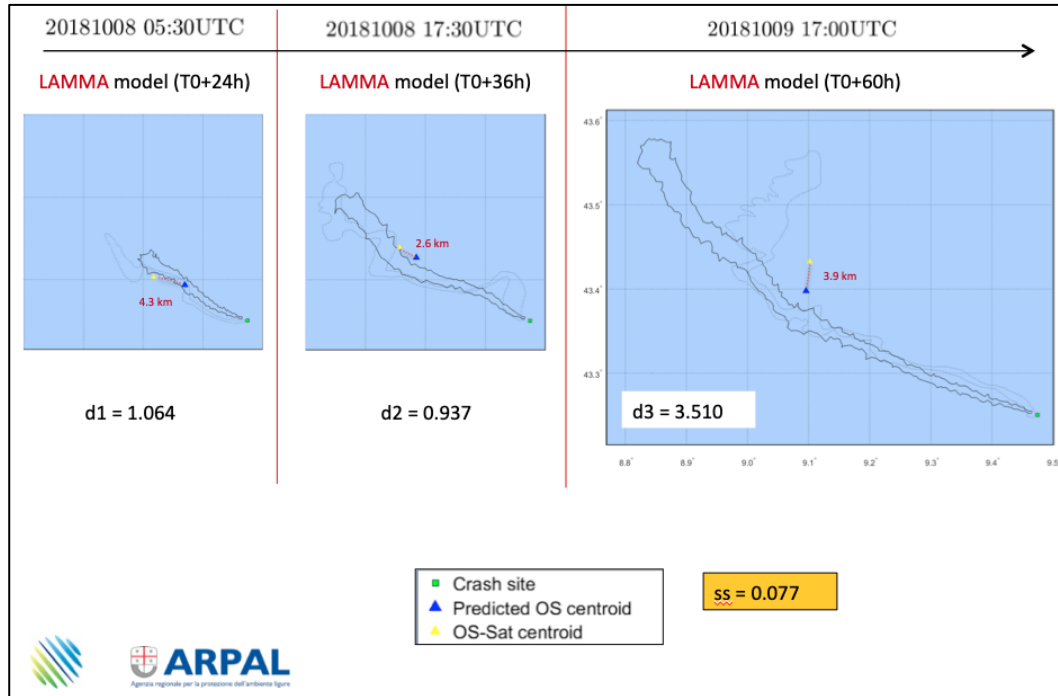


Fig. 6 Skill Score (s) calculé pour la trajectoire LaMMA

La Fig. 7 montre la comparaison entre l'évolution du oil slick modelé par ARPAL (hachure plus foncé) avec les observations de Sentinel-1 (hachure plus claire).

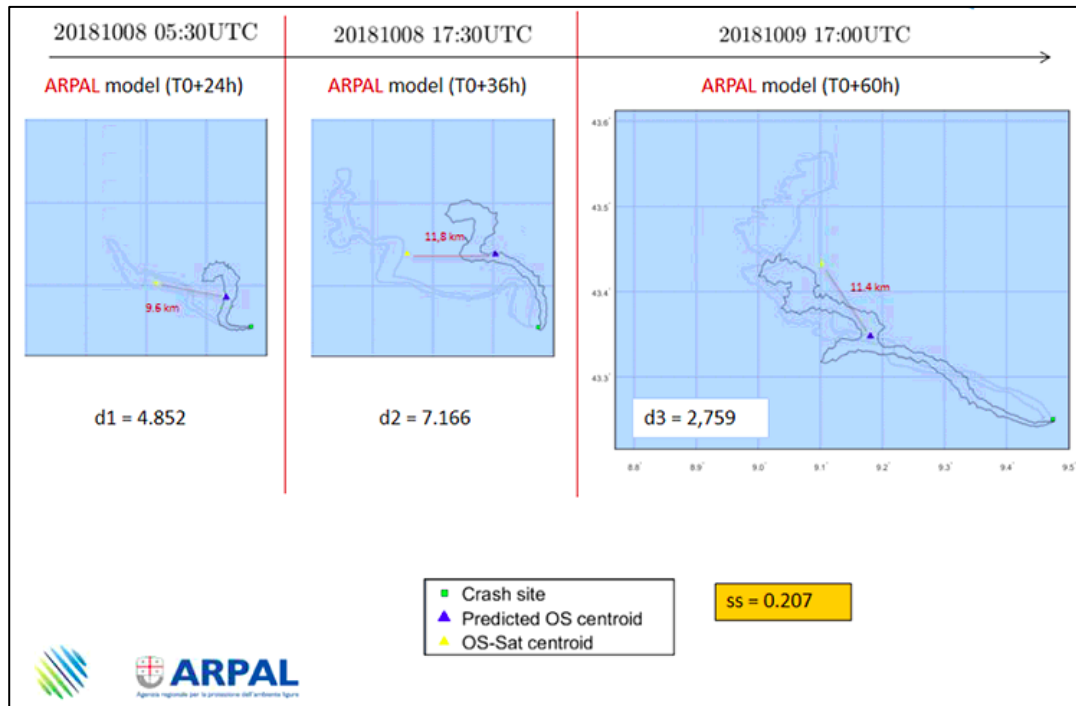


Fig. 7 Skill Score (s) calculé pour la trajectoire de l'ARPAL

Il est possible d'observer un accord substantiel entre le modèle et les observations même si, par rapport au résultat du modèle LAMMA, la distance entre la nappe modélisée et observée apparaît d'abord plus grande, successivement elle se superpose beaucoup mieux à la réalité, au moment de la troisième observation satellite (T + 60h). Cela peut être causé par un certain nombre de facteurs qui nécessitent une enquête plus approfondie. Les conditions météorologiques et hydrodynamiques des premières 24 heures après l'accident ne peuvent pas être reconstituées de manière optimale par le modèle, entraînant le « retard » de la nappe simulée au premier passage du satellite. L'extrême sensibilité des trajectoires à la composante du vent rend difficile de discriminer si les écarts détectés sont à attribuer davantage à la paramétrisation qu'à l'entrée du modèle météo (vue que les observations sur l'intensité du vent sont absentes).

En réinitialisant deux fois le modèle GNOME avec des informations mises à jour sur la forme de la nappe, précisément le 8 octobre à 19h21 et le 9 octobre à 12h15, aucune différence substantielle n'a été trouvée et l'Oil Skill reste quasiment inchangée.



Le tableau 01 compare les différentes valeurs assumées par le score de compétence soit pour les runs ARPAL, soit pour celles de LaMMA. Dans le Tab.02, en revanche, la comparaison entre les distances et le Skill Score relatif est effectuée uniquement pour le modèle ARPAL pour les deux initialisations distinctes. Les valeurs de Skill Score sont calculées en supposant deux formulations différentes pour la distance : la distance entre les centroïdes et le SSPD.

Metric	d [km] 08/10/18 – 07:30		d [km] 08/10/18 – 19:30		d [km] 09/10/18 – 19:00		s [-] 09/10/18 – 19:00	
	ARPAL	LaMMA	ARPAL	LaMMA	ARPAL	LaMMA	ARPAL	LaMMA
	Centroid	9.600	4.365	11.878	2.635	11.407	3.921	0.462
SSPD	4.852	1.064	7.166	0.937	2.759	3.510	0.207	0.077

Tab. 01 Comparaison entre les distances et les Skill Score associés pour le modèle ARPAL e LaMMA.

Metric	d [km] 08/10/18 – 19:30		d [km] 09/10/18 – 19:00		s [-] 09/10/18 – 19:00	
	ARPAL init.1	ARPAL init.2	ARPAL init.1	ARPAL init.2	ARPAL init.1	ARPAL init.2
	Centroid	4.430	-	9.286	15.000	0.241
SSPD	2.662	-	3.576	2.784	0.110	0.076

Tab. 02 Comparaison entre les distances et les Skill Score associés pour le modèle ARPAL avec deux initialisations.

Une première comparaison montre que la valeur 'ss' calculée avec le modèle LaMMA est inférieure à celle de l'ARPAL pour chacun des time step d'observation dans le cas d'un seul run initialisé à l'instant de référence T0. Le score du modèle ARPAL profite le plus de la réinitialisation en raison du retard accumulé au temps t0 + 24. Les performances différentes des deux modèles sont probablement liées aux paramètres de calibration utilisés, mais aussi aux différents modèles utilisés dans la zone étudiée. Ces différences nécessitent une analyse plus approfondie et des évaluations ultérieures pouvant être menées sur un ensemble de données plus nombreuses.

Bibliografia/ Bibliographie

- Beegle-Krause, J. (2001). General NOAA oil modeling environment (GNOME): a new spill trajectory model. In International Oil Spill Conference (Vol. 2001, No. 2, pp. 865-871). American Petroleum Institute.
- Liu, Y., & Weisberg, R. H. (2011). Evaluation of trajectory modeling in different dynamic regions using normalized cumulative Lagrangian separation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C9).
- Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, 227(7), 3465-3485.
- Shchepetkin A. F., McWilliams J. C., (2005). The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, *Ocean Modelling* vol. 9, pp. 347-404.
- Zelenke, B., C. O'Connor, C. Barker, C.J. Beegle-Krause, and L. Eclipse (Eds.), (2012). General NOAA



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation. U.S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 40. Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA. 105 pp. http://response.restoration.noaa.gov/gnome_manual.

Besse et al. Review Perspective for Distance Based Clustering of Vehicle Trajectories. IEEE Transactions on Intelligent. Transportation Systems, IEEE, 2016, 17 (11), pp.3306-3317.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

La suite des modèles du CNR-IAS

Dans le domaine du Projet SICOMARplus, le CNR-IAS a développé une suite de modèles numériques océanographiques et d'interfaces graphiques pour la gestion des systèmes d'exploitation de prévision appliqués dans la zone d'étude comprenant les Bouches de Bonifacio, le golfe d'Asinara et le golfe d'Olbia Tavolara. On a mis en place un système d'exploitation capable de réaliser, *on demand*, des simulations de prévision des trajectoires suivies par d'éventuels déversements d'hydrocarbures dans la zone d'intérêt. Ce système repose sur l'utilisation d'un modèle hydrodynamique et ondulatoire basé sur la méthode des éléments finis mis en œuvre à l'intérieur d'une chaîne opérationnelle capable de gérer automatiquement les données atmosphériques et océanographiques à grande échelle nécessaires à la réalisation de prévisions marines quotidiennes à 3 jours. Ce système fournit les données des courants de surface et des vagues à un modèle pour simuler le transport dans un système de référence lagrangien. Cet outil est capable de fournir à un utilisateur pas expert le *path* suivi par les déversements potentiels d'hydrocarbures ainsi que les zones d'impact. Ci-dessous on montre une description des outils numériques utilisés, du système du modèle d'exploitation des transports et de l'interface graphique développée.

1. MODÈLE NUMERIQUE

Afin de reproduire la dynamique de circulation, propagation du mouvement ondulatoire et du transport superficiel, on a utilisé une approche de modélisation numérique. En particulier, on a utilisé un modèle hydrodynamique tridimensionnel (SHYFEM, Umgiesser et al., 2004) basé sur la méthode des éléments finis, le modèle spectral d'onde (WWM, Roland et al, 2009) et un modèle pour la simulation du transport superficiel (Cucco et al., 2016). Cet instrument a été appliqué afin de reproduire les champs d'hauteur et de direction du mouvement ondulatoire, les champs tridimensionnels des courants causés par les vents et les procès du transport des potentiels déversements d'hydrocarbures sur la côte. Ici on insère une description du modèle hydrodynamique SHYFEM, du modèle spectrale WWM et du modèle de transport. SHYFEM (Shallow Water Hydrodynamic Finite Element Model) est une suite des modèles numériques constituées par un modèle hydrodynamique open-source développé par les chercheurs du CNR. Vue ses caractéristiques, cet outil a été utilisé par la communauté scientifiques internationale pour reproduire la circulation des eaux et la propagation du mouvement ondulatoire. Le modèle hydrodynamique résout le système d'équations *Shallow-Water* dans les 3 dimensions avec l'approximation de *Boussinesq* en horizontale et l'approximation hydrostatique en vertical dans la



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

formulation avec les niveaux d'eaux et des transports (Umgiesser et al., 2004; <https://github.com/SHYFEM-model/shyfem>). Le modèle est capable de reproduire le champ du mouvement causé par les gradients de pression barotrope, barocline et atmosphérique. Le modèle utilise la méthode des éléments finis pour l'intégration spatiale et une méthode semi-implicite pour l'intégration temporelle du système d'équations considéré. WWM est un modèle spectral d'onde de troisième génération qui utilise la méthode des éléments finis pour la résolution des *Wave Action Equation* (WAE). Le modèle est couplé au modèle hydrodynamique grâce au système FIFO, qui permet l'échange bidirectionnel d'informations à des pas de temps prédéterminés entre 2 processus. Les deux modèles utilisent la même grille de calcul. Ces informations sont utilisées par le modèle de vague pour calculer les processus de réfraction dus au courant et aux processus de *shoaling*. Une fois reçues les données de courant et de profondeur du modèle hydrodynamique, on calcule les termes de *radiation* qui sont ensuite utilisés par le modèle hydrodynamique pour le calcul des courants induits par le mouvement ondulatoire.

Le système est également couplé à un modèle de simulation des processus de transport et de dispersion de substances dispersées dans l'eau. Ce modèle est basé sur une approche lagrangienne de la solution de l'équation d'advection-diffusion et permet la simulation des processus de transport des déversements potentiels d'hydrocarbures déversés dans la mer.

1.1. SETUP MODÈLE NUMERIQUE

Le modèle SHYFEM utilise la méthode des éléments finis pour l'intégration spatiale des équations du mouvement. Cette méthode prévoit une discrétisation du domaine d'étude à travers des grilles de calcul pas structurées et composées par des éléments triangulaires de dimension variable. Cette méthode permet la reproduction des géométries complexes comme celles qui caractérisent les zones côtières. En ce qui concerne la zone d'intérêt qui inclut les bouches de Boniface, le Golfe de l'Asinara et le Golfe d'Olbia, on a employé une grille de calcul basée sur des éléments triangulaires avec une résolution spatiale entre les 50 m, pour les zones près de la cote et les 5 km pour les zones extérieures. Cette résolution permet une description détaillée de la géométrie et morphologie des zones côtières pris en compte. Le domaine de calcul inclut une partie de la Mer Tyrrhénien centrale et une partie de la mer de la Sardaigne. Le long des frontières à 2 domaines, ils incluent l'ensemble du bassin tyrrhénien et la majeure partie du détroit de Sicile, avec une résolution plus élevée le long des couloirs qui caractérisent les principaux régimes de vent capables de générer des mouvements de vagues le long de la côte orientale de la Sardaigne ou de la Grecale da NE et le Sirocco du SE. Cette extension est



motivée par le choix d'utiliser des données de vent réalistes comme forçage du modèle numérique afin de reproduire la génération et la propagation du mouvement des vagues sans la nécessité d'imposer des conditions aux limites, en fait, dans les 2 cas, tout le domaine du calcul est caractérisé par une condition de *Closed Boundary*. La figure X montre les images de la grille de calcul utilisée avec les caractéristiques bathymétriques obtenues par l'interpolation des données cartographiques, GEBCO et *multibeam*. Comme on peut le voir, l'augmentation de la résolution spatiale est en correspondance avec les zones côtières, en particulier à proximité de l'archipel des trois zones protégées du domaine d'étude, c'est-à-dire l'AMP Asinara, l'AMP Tavolara et le parc international des Bouches de Bonifacio. Cette augmentation de la densité des éléments correspond à une augmentation de la précision du calcul numérique.

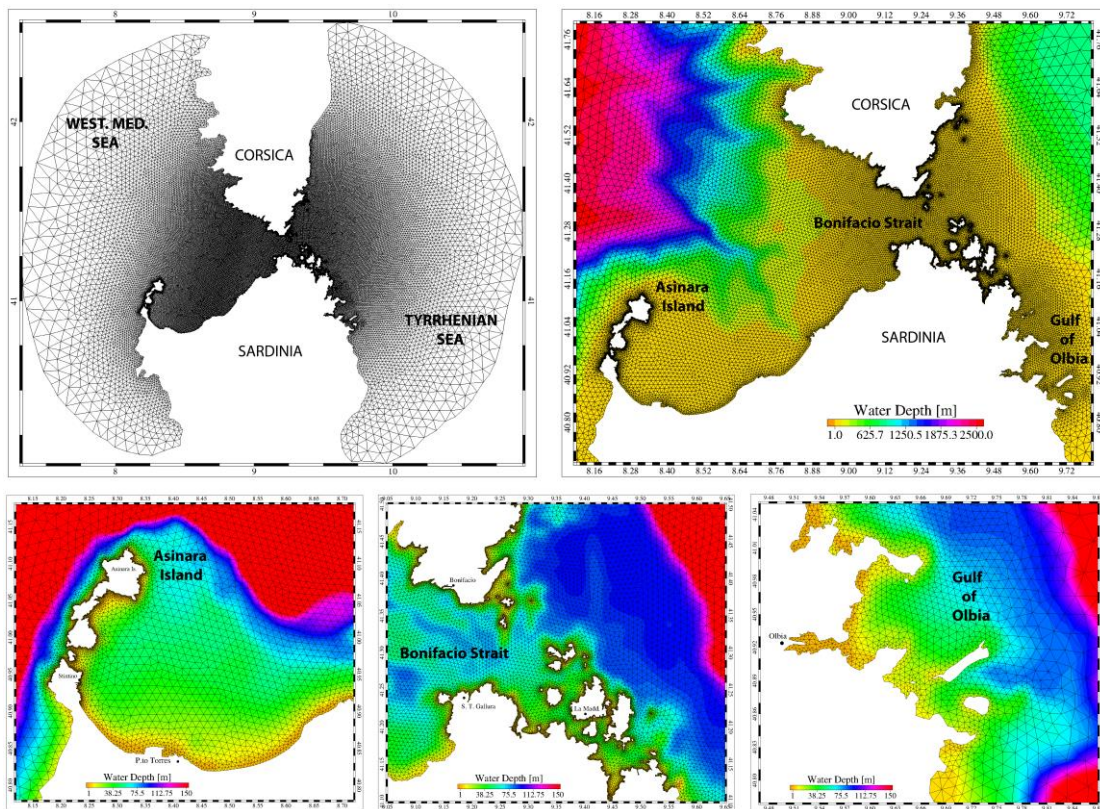


Fig. 8: *mesh* aux éléments terminés et bathymétrie par domaine d'enquête. Les panneaux représentent l'ensemble de la grille de calcul et les zones d'intérêt particulier dont le golfe de l'Asinara, le détroit de Bonifacio et le golfe d'Olbia.

En ce qui concerne la direction verticale, le modèle prévoit l'utilisation d'une discrétisation à z-levels



constituée par 15 niveaux avec un pas variable de 0.5 m à 500 mètres.

Long les bords ouverts correspondants aux limites Est et Ouest de la mesh de calcul, le modèle est forcé avec des séries temporelles de niveau, température et salinité prévois par le système COPERNICUS (<https://marine.copernicus.eu/>). En ce qui concerne les forces atmosphériques, le vent, les variations de pression et les flux de chaleur, ils sont fournis par le système ECMWF (*European Centre for the Medium-Range Weather Forecasts*). Le modèle utilise un système d'assimilation des champs de TS obtenus par le système COPERNICUS dans la modalité *nudging*. On a considéré aussi les variations de niveau aux bords ouverts générées par la marée astronomique et fournisses par le modèle globale OTIS-OSU (<https://www.tpxo.net/otis>). Le modèle a été validé par la comparaison des données expérimentales de vitesse obtenus par la mensuration des courants lagrangiens (drifters) diffusés dans la zone d'étude à l'intérieur du projet SICOMARplus (WP 2.3). On conseil de voir Quattrocchi et al., (2021) pour une description complète du système, des produits de prévision et des résultats obtenus.

SYSTÈME D'EXPLOITATION

Dans la Fig. 9 on voit le schéma logique des processus intéressés au fonctionnement du système de prévision océanographique et de prévision de l'impact des déversements dans la mer.

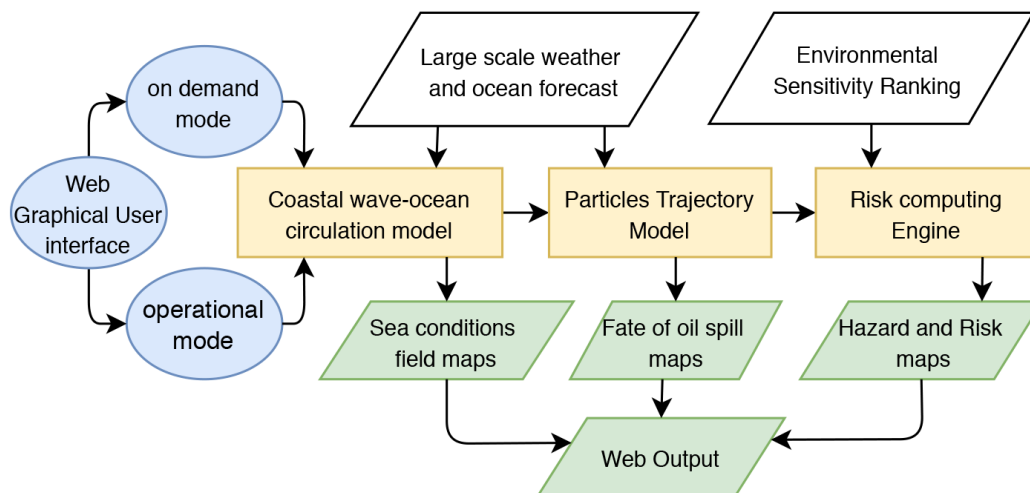


Fig. 9: schéma de fonctionnement du système d'exploitation de prévision des vagues et des courants de transport de surface pour le détroit de Bonifacio, le golfe de l'Asinara et le golfe d'Olbia.

Comme on voit dans la Fig. 9, le fonctionnement du système se base sur une phase opérative qui prévoit la délivrance automatique de produits de prévision océanographiques consultables sur



<http://www.seaforecast.cnr.it/sicomarplus/index.php/en/forecasts/> et une phase *on demand* pour l'ouverture des simulations de prévision de transport d'hydrocarbures.

Dans la Fig. 10 on rapporte quelque exemple des produits délivrés qui incluent la hauteur et la direction du mouvement ondulatoire, l'intensité, la température superficielle et le *stranding time*. Ce dernier indique sur une échelle colorée la dangerosité des traits de la mer en fonction du temps nécessaire à arriver sur la cote par un déversement d'hydrocarbures délivré. En rouge on indique les zones avec un temps de échouage inférieur à 6 heures, en revanche on indique en bleu celles avec des temps supérieurs aux 48 heures.

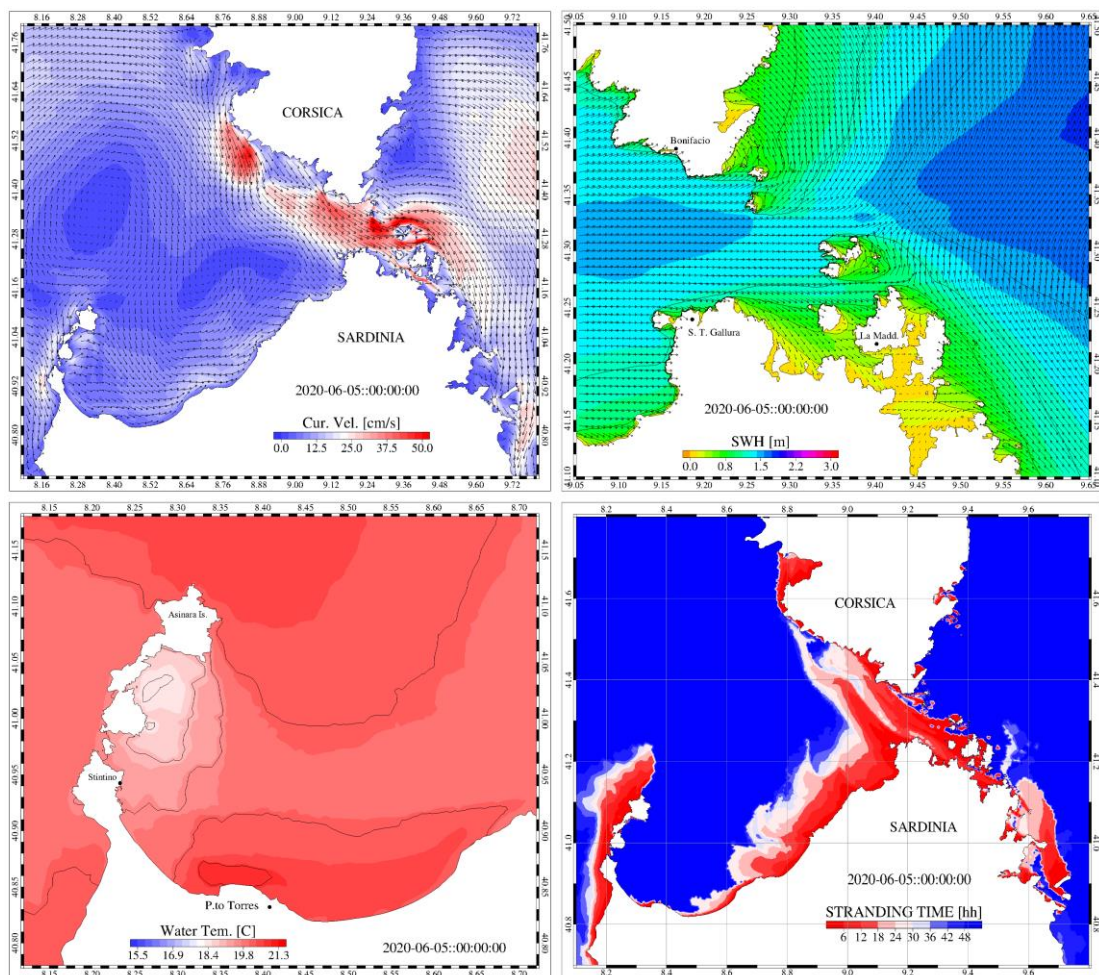


Fig. 10: produits de prévision océanographique publiés par le système d'exploitation développé dans SICOMARplus



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT F R-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

En ce qui concerne la phase on demand du système opératif, la structure de fonctionnement décrite dans la Fig. 9 prévoit une première phase de transmission et de transformation des données d'entrées du modèle lagrangien composés par des champs de courants superficiels, la hauteur et la direction des vagues. Successivement on continue avec la quantification des conditions initiales du déversement à la simulation du transport et de l'éventuel échouage dans 3 jours maximum et enfin le calcul du risque de l'impact obtenu par une procès de *post-processing* des données lagrangiennes. L'interaction avec ce système est mise en place à travers une interface graphique basée sur WEBGIS (<http://www.seaforecast.cnr.it/sicomarplus/wp-login.php>). En particulier, une fois définit la position, l'extension et le moment du déclenchement des polluantes, le système, de façon automatique, calcule le parcours suivi par les particules numériques utilisées comme *proxy* de l'agent polluant. Les données produites par la simulation ont été sauvé sur un disque et classés de façon à construire une base de données des scénarios. Les résultats produits sont traités avec un format graphique (*png*) et dans la forme des mappes statistiques relatives à la position horaire de la nappe durant la période simulée avec des informations liées à la trajectoire moyenne suivies par le déversement et l'éventuelle présence des particules échouées mises en évidence en verde (Fig. 11, panneau *middle*). En somme, grâce au *post-processing* (Quattrocchi et al., 2021) on a calculé les indices de risque d'impact d'hydrocarbures dans la cote (figura H, panneau *down*). En outre, il est possible de visualiser en modalité animée l'évolution de la nappe au cours du temps et dans l'espace à travers la génération des gifs animés.



Interreg



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

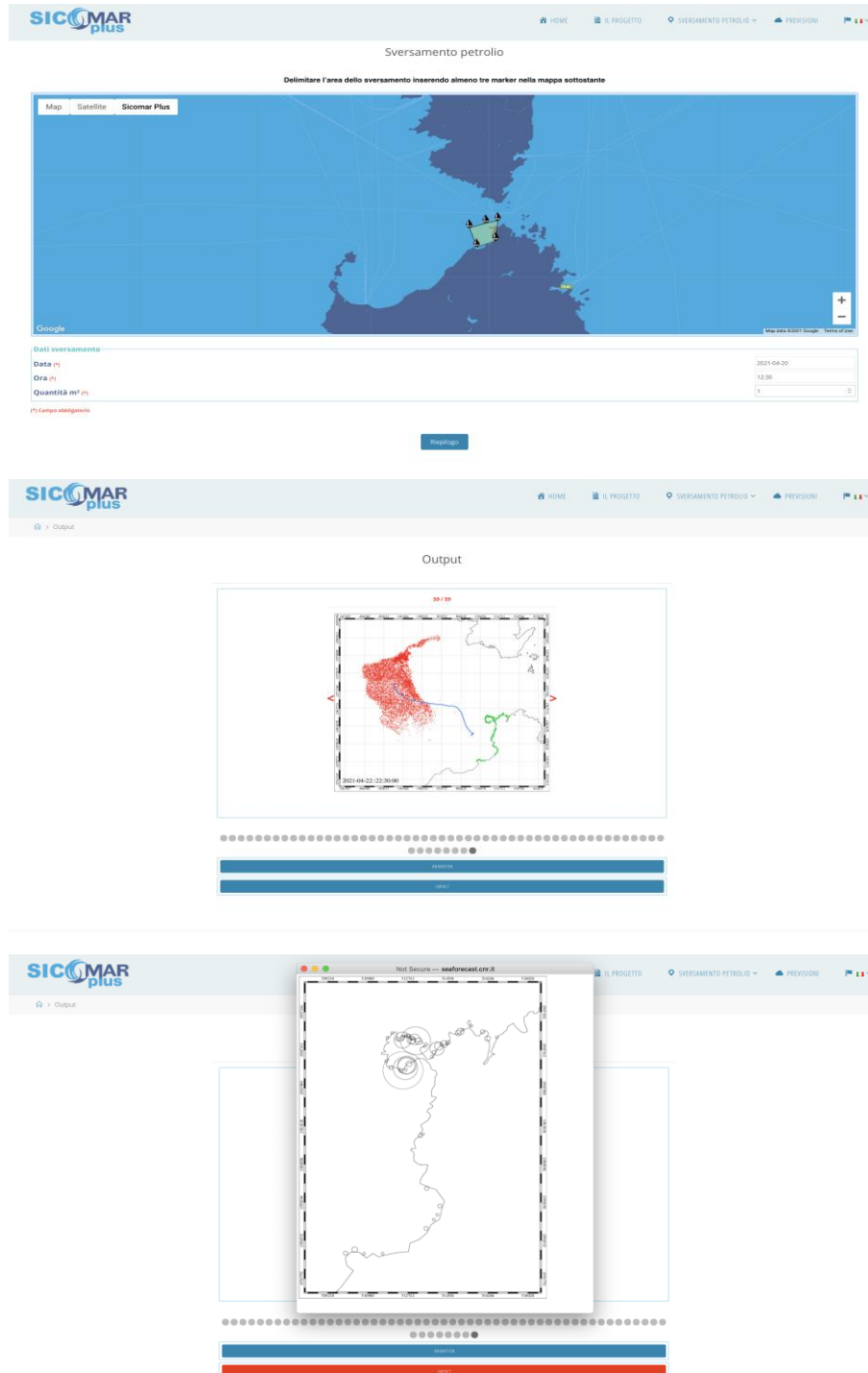


Fig. 11: GUI pour la gestion du système d'exploitation pour la simulation du parcours des déversements potentiels d'hydrocarbures dans la mer. Panneau up, WEBGIS pour la gestion de l'initialisation de la



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

nappe, panneau *middle*, les résultats obtenus relatifs au déplacement et à la modification des caractéristiques de la nappe, panneau *down*, calcul du facteur de risque d'impact sur le littoral.

Bibliografia/ Bibliographie

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).

Quattrocchi G, Simeone S, Pes A, Sorgente R, Ribotti A and Cucco A (2021) An Operational Numerical System for Oil Stranding Risk Assessment in a High-Density Vessel Traffic Area. *Front. Mar. Sci.* 8:585396. doi: 10.3389/fmars.2021.585396

Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., Hsu, T. W., Liao, 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.

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.