



Interreg



UNIONE EUROPEA

SICOMAR
plus

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Non è possibile visualizzare l'immagine



Prodotto - Livrable T3.1:

**Riduzione dell'incertezza dei sistemi di
previsione della circolazione marina - Livrable**

Data prevista - Date prévue : 15/12/21

Data di consegna - Date d'échéance : 22/12/21

Versione - Version : V1.1

Non è possibile visualizzare l'immagine



Informazioni generali sul documento / Informations générales sur le document	
Componente / Composante	T3
Attività/Activité	T3.1
Prodotto/Livrable	T3.1.1
Nome Documento / Nom Document	“Prodotto T3.1.1: Modelli previsionali oceanografici a ridotta incertezza” / “Livrable T3.1.1 : Modèles prévisionnels océanographiques à incertitude réduite”
ID File/ID Fichier	SICOMAR PLUS_T3.1.1.pdf

Processo di approvazione / Procédure d'approbation				
	Nome/Nom	Ente/Établissement	Data/Date	Visto/Vu
Coordinatore/ Coordinateur	Gilda Ruberti	Regione Toscana		
CP Leader/ CP Leader	Carlo Brandini	Consorzio LAMMA		

Processo di revisione / Procédure de révision			
Revisione/ Révision	Autore/Auteur	Data Rev./ Date Rév.	Modifiche/Modifications
V1.0	Mechele Bondoni,	22/12/2021	Prima stesura



	Maria Fattorini		
	Carlo Brandini, Massimo Perna, Alessio Innocenti	15/01/2022	Revisione, aggiornamento e traduzione

Introduzione/ Introduction

La riduzione di incertezza nei sistemi di previsione del mare è fondamentale soprattutto in ambito operativo, per fornire informazioni utili sia in fase prevenzione che per la gestione di eventuali incidenti.

Ad esempio, l'incidente dovuto allo scontro tra la portacontainer Cls Virginia e il traghetto Ulysse avvenuto a Nord di Cap Corse nell'Ottobre 2018, e il conseguente sversamento di carburante, hanno mostrato come sia importante, ai fini della realizzazione delle attività di anti-inquinamento, avere una previsione accurata delle correnti marine che guidano il trasporto e la dispersione degli idrocarburi sversati.

La realizzazione di un sistema di previsione idrodinamica a scala locale assimilato è un obiettivo di lungo termine che non si conclude con il Progetto SICOMAR Plus, tuttavia grazie al progetto si è iniziata a predisporre un'attività finalizzata a sfruttare più possibile i dati raccolti dai sistemi di osservazione installati nel progetto, a cominciare dai radar HF. Nel seguito vengono descritti i risultati, ancora non definitivi, di questa attività.



La réduction de l'incertitude dans les systèmes de prévision de la mer est particulièrement cruciale dans l'environnement opérationnel, pour fournir des informations utiles tant dans la phase de prévention que dans la gestion d'éventuels incidents.

Par exemple, l'accident dû à la collision entre le porte-conteneurs Cls Virginia et le ferry Ulysse survenue au nord du Cap Corse en octobre 2018, et le déversement de carburant suivant, ont montré combien il est important, pour la mise en œuvre d'actions anti-pollution, de disposer d'une prédiction précise des courants marins qui pilotent le transport et la dispersion des hydrocarbures déversés.

La création d'un système de prévision hydrodynamique à une échelle locale assimilée est un objectif à long terme qui ne s'arrête pas avec le projet SICOMAR Plus. Cependant, grâce au projet, les travaux ont commencé pour exploiter au mieux les données collectées par les systèmes d'observation installés dans le projet, à commencer par les radars HF. Les résultats de cette activité, qui ne sont pas encore définitifs, sont décrits ci-dessous.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Non è possibile visualizzare l'immagine

Sistemi previsionali/ *Systèmes de prévision*

L'obiettivo dei sistemi previsionali operativi è quello di fornire giornalmente previsioni meteorologiche e/o oceanografiche che le persone possono utilizzare per prendere decisioni. Queste vanno dalle semplici scelte del privato cittadino fino a decisioni riguardanti interessi strategici come la messa in moto, da parte delle istituzioni, di sistemi di allerta e prevenzione del rischio.

Le previsioni oceanografiche vengono realizzate con sistemi integrati di modelli matematici e osservazioni attraverso una catena operativa implementata sui calcolatori dell'ente gestore, che prepara i dati di input (pre-processing), lancia le simulazioni del forecast ed elabora i risultati (post-processing). L'esito di ciascun passaggio della procedura viene registrato in file di "log" in modo da poter ricontrollare la catena degli eventi e, in caso di errori o malfunzionamenti, individuarne tempestivamente la causa.

Un aspetto dei sistemi previsionali non globali, che quindi si concentrano su una porzione di territorio e/o di mare, è la necessità definire al modello le condizioni al contorno (e le condizioni iniziali a seconda della catena operativa implementata) per l'integrazione del forecast che provengono da modelli globali o a più ampia scala. Risulta quindi fondamentale il passaggio di verifica della disponibilità e scaricamento dei dati dai server delle strutture che li forniscono.

Il corretto funzionamento della catena operativa non esaurisce tuttavia l'obiettivo del sistema previsionale. E' infatti necessario che i risultati dei modelli, insieme alle informazioni raccolte in tempo reale dalla rete osservativa, siano vagliati ed interpretati da esperti (previsori) al fine di produrre una previsione che sia interpretabile dagli utenti del servizio. Possono infatti sussistere particolari condizioni per cui i modelli restituiscono risultati con un maggiore grado di incertezza (vedi paragrafo Incertezza e sua riduzione), in queste situazioni sono infatti strettamente necessarie l'interpretazione e l'esperienza dell'esperto.

I modelli matematici su cui si basano le previsioni sono strumenti necessari per risolvere, con l'aiuto di un calcolatore, la forma discretizzata delle equazioni fondamentali della dinamica dei fluidi in ambito geofisico. Sono composti da un insieme di programmi informatici che contengono le istruzioni ed i compiti (algoritmi) che il calcolatore deve svolgere, in un tempo finito detto tempo di calcolo, per trovare una soluzione approssimata delle equazioni della fluidodinamica attraverso metodi numerici.

Le equazioni che descrivono la dinamica dell'oceano, dette anche primitive, sono equazioni alle derivate parziali e rappresentano matematicamente i principi da cui prendono il nome: l'equazione di conservazione della massa, l'equazione di conservazione della quantità di moto, l'equazione di conservazione dell'energia, e l'equazione di stato che lega tra loro densità, salinità e temperatura. Su queste vengono apportate alcune semplificazioni che permettono di ridurre il grado di complessità del sistema (approssimazione di Boussinesq; approssimazione idrostatica; media su scale temporali brevi: Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations – RANS).

Non è possibile visualizzare l'immagine



Le scale del moto che si possono risolvere sono legate al grado di dettaglio impiegato nella discretizzazione delle equazioni ovvero la risoluzione. Questa corrisponde alla grandezza degli elementi o celle di calcolo (Figura 1) in cui viene suddiviso il dominio geografico analizzato ed è un aspetto importante dei modelli numerici: risoluzioni più alte implicano celle più piccole e quindi dettagli maggiori, al costo però di tempi di calcolo molto più lunghi. Inoltre, al processo di discretizzazione consegue l'impossibilità di conoscere la variabilità dell'informazione a scale spaziali più piccole della risoluzione adottata, dette anche di "sotto-griglia".

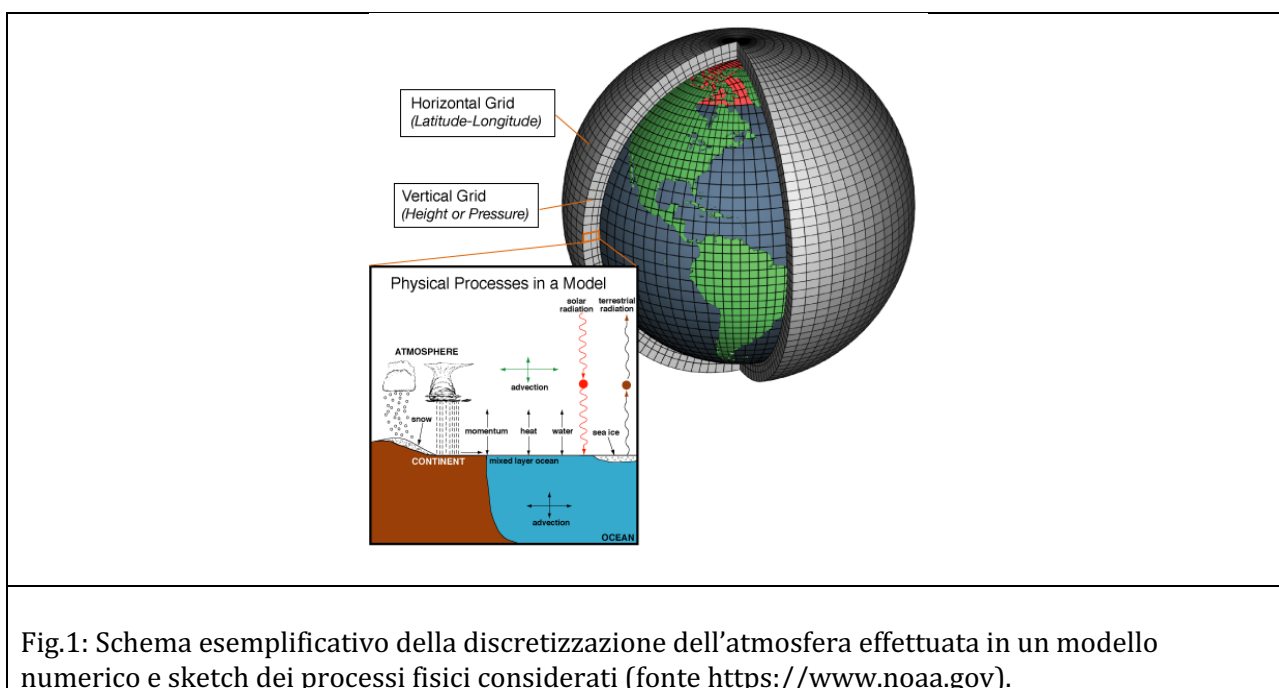


Fig.1: Schema esemplificativo della discretizzazione dell'atmosfera effettuata in un modello numerico e sketch dei processi fisici considerati (fonte <https://www.noaa.gov>).

Il modello numerico non è in grado di "risolvere" tali scale spaziali (e temporali), ovvero non può dare una descrizione della loro evoluzione. Il loro effetto sulla dinamica generale, ovvero quella che il modello numerico è in grado di risolvere, viene tenuto in conto attraverso opportune parametrizzazioni (termini addizionali nelle equazioni discretizzate).

Velocità orizzontali, temperatura, salinità e quota del pelo libero sono le variabili prognostiche. Densità, velocità verticale (nei modelli idrostatici) sono dette variabili diagnostiche. Tali grandezze rappresentano, ad esempio, l'output del modello oceanografico operativo in esercizio presso il Consorzio LaMMA, il quale ha una risoluzione orizzontale di 1.4 km e forecast fino a 5 giorni.

I modelli oceanografici hanno come forzante i campi atmosferici che sono forniti da modelli atmosferici i cui output stanno alla base delle previsioni meteorologiche.



L'objectif des systèmes de prévision opérationnelle est de fournir des prévisions météorologiques et/ou océanographiques quotidiennes qui peuvent être utilisé pour prendre des décisions. Il peut



s'agir de simples choix effectués par des citoyens privés ou de décisions concernant des intérêts stratégiques, comme la mise en place de systèmes d'alerte et de prévention des risques par des institutions.

Les prévisions océanographiques sont réalisées à l'aide de systèmes intégrés de modèles mathématiques et d'observations à travers une chaîne opérationnelle mise en œuvre sur les ordinateurs de l'organisme gestionnaire, qui prépare les données d'entrée (prétraitement), lance les simulations de prévision et traite les résultats (post-traitement). Le résultat de chaque étape de la procédure est enregistré dans des fichiers journaux afin de pouvoir vérifier à nouveau la chaîne des événements et, en cas d'erreurs ou de dysfonctionnements, d'en identifier rapidement la cause.

Un aspect des systèmes de prévision non globaux, qui se concentrent donc sur une portion de territoire et/ou de mer, est la nécessité de définir les conditions limites dans le modèle (et les conditions initiales selon la chaîne opérationnelle mise en œuvre) pour l'intégration de la prévision provenant de modèles globaux ou à plus grande échelle. L'étape de vérification de la disponibilité et du téléchargement des données à partir des serveurs des structures qui les fournissent est donc fondamentale.

Cependant, le bon fonctionnement de la chaîne opérationnelle n'épuise pas l'objectif du système de prévision. Il est en effet nécessaire que les résultats des modèles, ainsi que les informations recueillies en temps réel auprès du réseau d'observation, soient passés au crible et interprétés par des experts (prévisionnistes) afin de produire une prévision interprétable par les utilisateurs du service. En effet, il peut y avoir des conditions particulières dans lesquelles les modèles donnent des résultats avec un degré d'incertitude plus élevé (voir "L'incertitude et sa réduction"); dans ces situations, l'interprétation et l'expérience de l'expert sont strictement nécessaires.

Les modèles mathématiques sur lesquels reposent les prédictions sont des outils nécessaires pour résoudre, à l'aide d'un ordinateur, la forme discrétisée des équations fondamentales de la dynamique des fluides dans le domaine géophysique. Ils se composent d'un ensemble de programmes informatiques contenant les instructions et les tâches (algorithmes) que l'ordinateur doit exécuter, en un temps fini appelé temps de calcul, pour trouver une solution approximative aux équations de la dynamique des fluides en utilisant des méthodes numériques.

Les équations qui décrivent la dynamique de l'océan, également appelées primitives, sont des équations aux dérivées partielles et représentent mathématiquement les principes dont elles tirent leur nom: l'équation de conservation de la masse, l'équation de conservation de la quantité de mouvement, l'équation de conservation de l'énergie et l'équation d'état qui relie la densité, la salinité et la température. Celles-ci sont simplifiées pour réduire la complexité du système (approximation de Boussinesq; approximation hydrostatique; moyenne sur de courtes échelles de temps: Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations - RANS).

Les échelles de mouvement qui peuvent être résolues sont liées au degré de détail utilisé dans la discrétisation des équations, c'est-à-dire la résolution. Cela correspond à la taille des éléments ou cellules de calcul (figure 1) dans lesquels le domaine géographique analysé est subdivisé et constitue un aspect important des modèles numériques: des résolutions plus élevées impliquent des cellules plus petites et donc plus de détails, mais au prix d'un temps de calcul beaucoup plus longs. En outre, le processus de discrétisation ne permet pas de connaître la variabilité de l'information à des échelles spatiales inférieures à la résolution adoptée, également appelées échelles de "sous-maille".

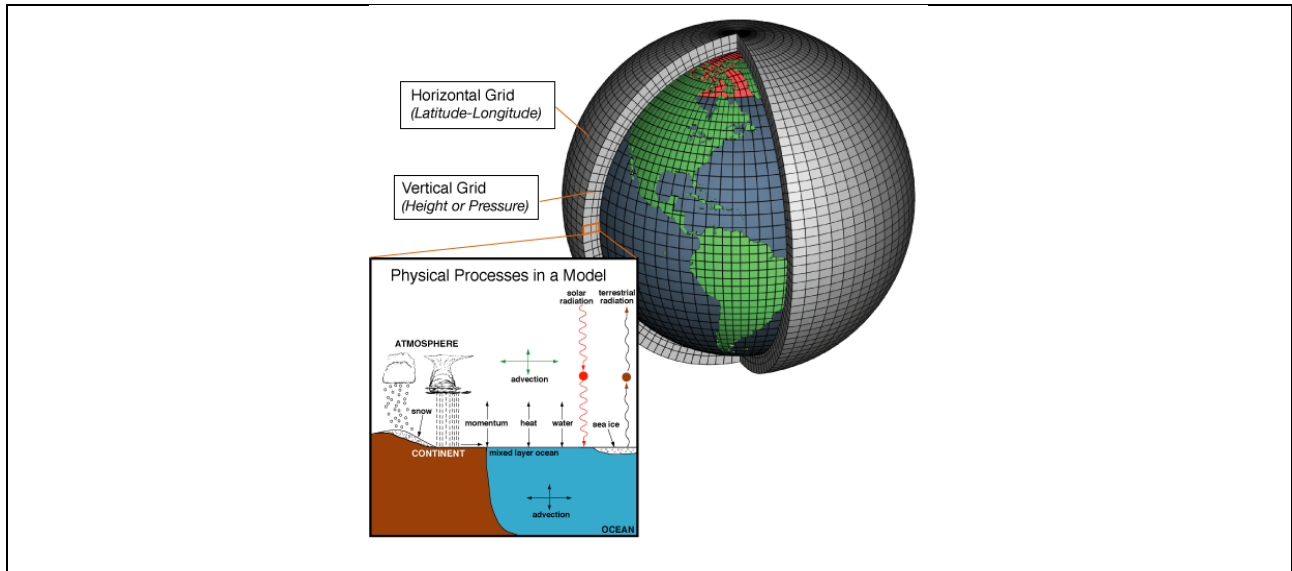


Fig.1: Exemple de diagramme de la discrétisation de l'atmosphère réalisée dans un modèle numérique et schéma des processus physiques considérés (source <https://www.noaa.gov>).

Le modèle numérique n'est pas en mesure de "résoudre" ces échelles spatiales (et temporelles), c'est-à-dire qu'il ne peut pas donner une description de leur évolution. Leur effet sur la dynamique générale, c'est-à-dire celle que le modèle numérique est capable de résoudre, est pris en compte au moyen de paramétrages appropriés (termes supplémentaires dans les équations discrétisées).

La vitesse horizontale, la température, la salinité et l'élévation de surface libre sont les variables pronostiques. La densité, la vitesse verticale (dans les modèles hydrostatiques) sont appelées variables de diagnostic. Ces quantités sont, par exemple, la sortie du modèle océanographique opérationnel en service au Consortium LaMMA, qui a une résolution horizontale de 1,4 km et des prévisions jusqu'à 5 jours.

Les modèles océanographiques ont comme force de forçage les champs atmosphériques qui sont fournis par les modèles atmosphériques dont les sorties constituent la base des prévisions météorologiques.



Incertezza e sua riduzione/ L'incertitude et sa réduction

Incertezza e prevedibilità associate ad un sistema dinamico sono due grandezze fortemente correlate per cui all'aumentare dell'una l'altra tende a diminuire e viceversa. Con prevedibilità si intende quanto posso conoscere l'evoluzione futura del sistema in base a certe condizioni iniziali. L'incertezza è una misura dell'affidabilità della previsione in esame.

La propensione all'imprevedibilità è una caratteristica dello specifico stato del sistema in esame. Gli errori presenti nelle soluzioni numeriche dei modelli, dovute alle approssimazioni delle equazioni, all'introduzione di schemi approssimati, all'incertezza dei modelli a monte della catena operativa (nelle condizioni iniziali, nelle condizioni di bordo e nelle forzanti atmosferiche) tendono a crescere in modo potenzialmente incontrollato a causa della natura caotica del sistema. La dinamica dell'oceano non è lineare e durante l'integrazione numerica nel tempo può comportare un aumento esponenziale dell'errore e quindi di incertezza della previsione.

Per contrastare la crescita incontrollata degli errori e quindi per ridurre l'incertezza delle previsioni si possono sia utilizzare le osservazioni, integrandole all'interno della catena previsionale, sia incrementare la risoluzione del modello. Quest'ultima strada permette di risolvere scale del moto sempre più piccole e avere batimetria e linea di costa più dettagliate, ma allo stesso tempo introduce ulteriori gradi di libertà nel sistema riducendo il range temporale di forecast (Sandery and Sakov 2017).

L'ingestione delle osservazioni per la riduzione dell'incertezza avviene attraverso l'assimilazione dei dati. La procedura di assimilazione combina in maniera ottimale le informazioni derivanti dalla soluzione di partenza (background) e dalle osservazioni al fine di ottenere una soluzione aggiornata detta analisi, da cui lanciare un forecast. Il forecast risulterà in linea di principio più affidabile avendo ridotto l'errore sulla condizione iniziale.

Il termine ottimale viene utilizzato poiché l'analisi viene determinata attraverso una procedura di minimizzazione, in modo che la soluzione sia il più possibile vicina al background e alle osservazioni in maniera inversamente proporzionale agli errori ad essi associati (matrici di covarianza degli errori di background e delle osservazioni). Inoltre, l'informazione sulle osservazioni, che risulta sparsa e scarsa rispetto allo spazio coperto dallo stato del sistema, viene propagata ed estesa anche a punti non interessati dalla rete osservativa.

Tra i principali metodi di assimilazione dati figurano: l'Optimal Interpolation (OI), la 3-dimensional Variational Assimilation (3DVAR) ed il suo analogo 4-dimensionale (4DVAR), ed il Filtro di Kalman (KF).

L'OI e la 3DVAR si concentrano su un solo istante temporale, ciò significa che le osservazioni assimilate vengono considerate contemporanee all'istante in cui è disponibile il background e quindi l'analisi. Un ulteriore avanzamento è conseguito attraverso la 4DVAR. In questo caso le osservazioni sono assimilate lungo una finestra temporale. Questa corrisponde ad un intervallo temporale che va da uno specifico istante nel passato fino all'istante di lancio del forecast. La condizione iniziale di lancio del forecast (ovvero l'istante finale dell'analisi) avrà a questo punto incamerato le informazioni disponibili anche in tempi passati.

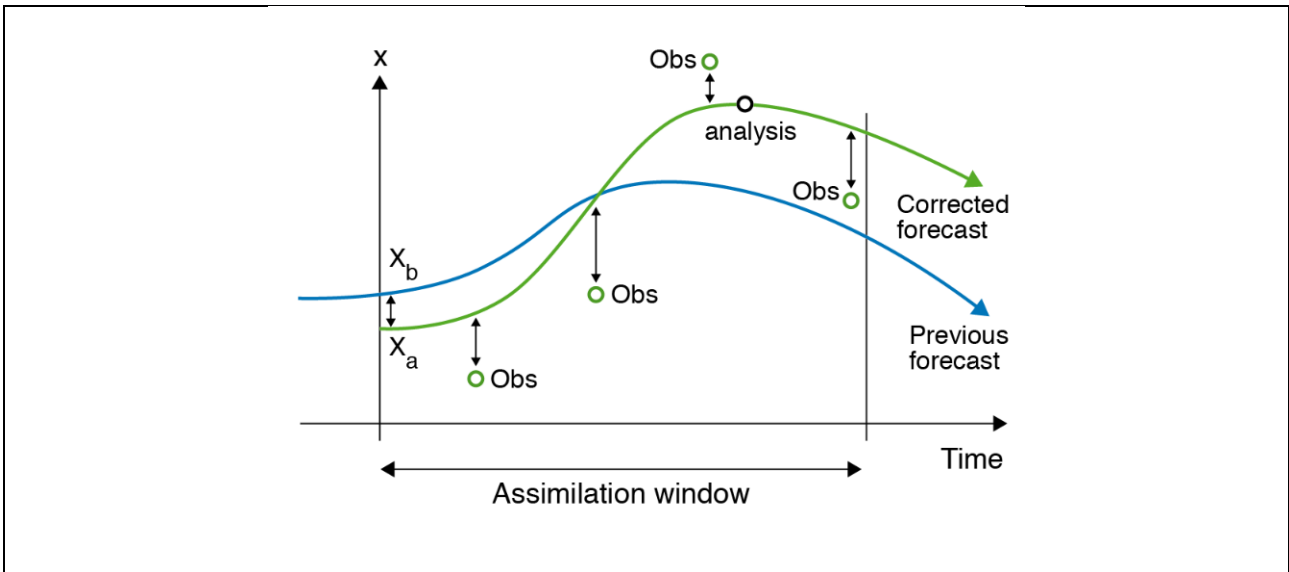


Fig.2: Sketch che rappresenta concettualmente l'assimilazione dati. In blu è rappresentato lo stato di background ed in verde l'analisi ed il successivo forecast, oltre la finestra di assimilazione. I cerchi verdi rappresentano le osservazioni (immagine tratta da <https://www.ecmwf.int>).

In Figura 2 è riportato uno schema semplificato per illustrare il funzionamento della 4DVAR, per cui l'analisi (traiettoria in verde fino all'inizio del forecast) risulta "da qualche parte" tra le osservazioni (cerchi verdi) e la traiettoria di background (linea blu). In figura è riportato anche un cerchio nero denominato analisi che rappresenta l'istante a cui viene lanciato il successivo forecast (esiste tuttora un abuso di terminologia per cui con analisi si intende sia la traiettoria del sistema corretta a seguito dell'assimilazione sia l'istante da utilizzare come condizione iniziale per il forecast). Se volessimo considerare la 3DVAR, dovremmo concentrarci soltanto sull'istante iniziale e la finestra di assimilazione si ridurrebbe ad un singolo tempo.



L'incertitude et la prévisibilité associées à un système dynamique sont deux quantités fortement corrélées, de sorte que lorsque l'une augmente, l'autre tend à diminuer et vice versa. La prévisibilité donne la mesure dans laquelle je peux connaître l'évolution future du système dans certaines conditions initiales. L'incertitude est une mesure de la fiabilité de la prédiction considérée. La propension à l'imprévisibilité est une caractéristique de l'état spécifique du système considéré. Les erreurs dans les solutions des modèles numériques dues aux approximations des équations, à l'introduction de schémas approximatifs et à l'incertitude du modèle en amont de la chaîne opérationnelle (dans les conditions initiales, les conditions à bord et le forçage atmosphérique) ont tendance à croître de manière potentiellement incontrôlée en raison de la nature chaotique du système. La dynamique océanique n'est pas linéaire et, lors de l'intégration numérique dans le temps, elle peut entraîner une augmentation exponentielle de l'erreur et donc de l'incertitude des prévisions.



Pour contrer la croissance incontrôlée des erreurs et ainsi réduire l'incertitude des prévisions, on peut soit utiliser des observations, en les intégrant dans la chaîne de prévision, soit augmenter la résolution du modèle. Cette dernière voie permet de résoudre des échelles de mouvement de plus en plus petites et de disposer d'une bathymétrie et d'un littoral plus détaillés, mais elle introduit en même temps des degrés de liberté supplémentaires dans le système en réduisant l'intervalle de temps de prévision (Sandery et Sakov 2017).

L'ingestion d'observations pour la réduction des incertitudes se fait par assimilation de données. La procédure d'assimilation combine de manière optimale les informations de la solution de départ (background) et les observations afin d'obtenir une solution actualisée appelée analyse, à partir de laquelle une prévision peut être lancée. La prévision sera en principe plus fiable puisque l'erreur sur la condition initiale est réduite.

Le terme optimal est utilisé car l'analyse est déterminée par une procédure de minimisation, de sorte que la solution soit la plus proche possible du fond et des observations inversement proportionnelles aux erreurs qui leur sont associées (matrices de covariance des erreurs du fond et des observations). En outre, l'information sur les observations, qui est dispersée et éparse par rapport à l'espace couvert par l'état du système, est propagée et étendue à des points non affectés par le réseau d'observation. Parmi les principales méthodes d'assimilation de données figurent l'interpolation optimale (OI), l'assimilation variationnelle tridimensionnelle (3DVAR) et son analogue quadridimensionnel (4DVAR), ainsi que le filtre de Kalman (KF).

OI et 3DVAR se concentrent sur un seul instant dans le temps, ce qui signifie que les observations assimilées sont considérées comme contemporaines de l'instant où le fond et donc l'analyse sont disponibles. Un nouveaux progrès est possible grâce à la 4DVAR. Dans ce cas, les observations sont assimilées le long d'une fenêtre temporelle. Cela correspond à un intervalle de temps allant d'un instant précis dans le passé à l'instant du lancement de la prévision. La condition initiale du lancement de la prévision (c'est-à-dire l'instant final de l'analyse) aura à ce moment-là assimilé les informations disponibles dans les temps passés.

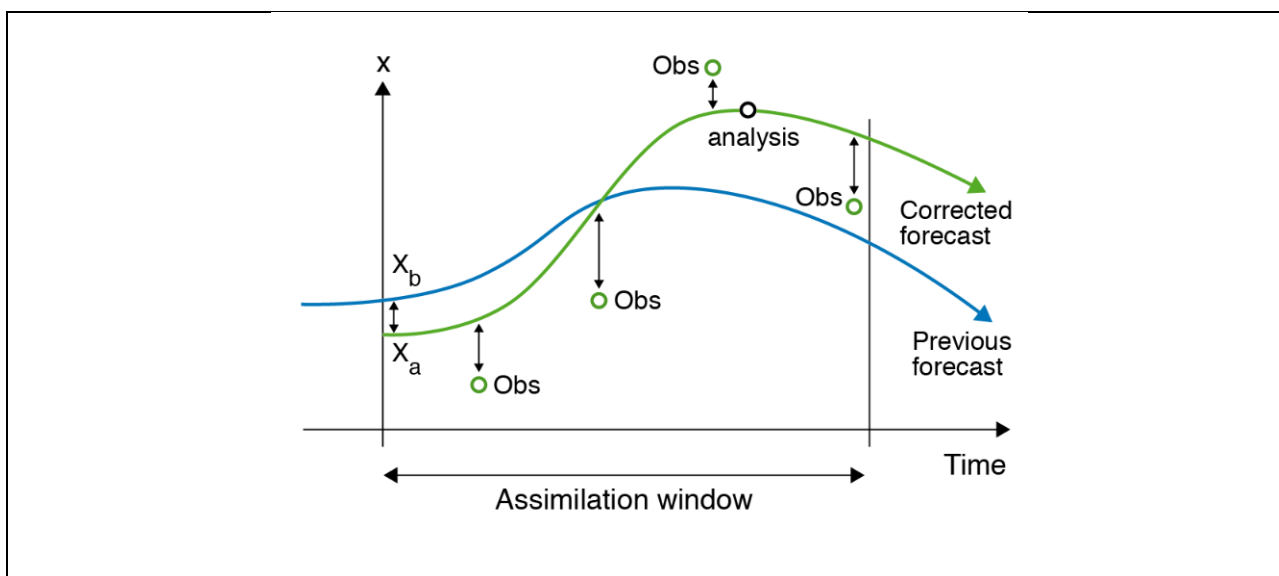


Fig.2: Schéma représentant conceptuellement l'assimilation des données. En bleu, l'état de fond et en vert l'analyse et la prévision suivante, au-delà de la fenêtre d'assimilation. Les cercles verts représentent les observations (source <https://www.ecmwf.int>).

La figure 2 présente un schéma simplifié pour illustrer le fonctionnement de la 4DVAR, dans laquelle l'analyse (trajectoire en vert jusqu'au début de la prévision) se situe "quelque part" entre les observations (cercles verts) et la trajectoire de fond (ligne bleue). Dans la figure, il y a également un cercle noir appelé analyse qui représente l'instant auquel la prochaine prévision est lancée (il existe toujours un abus de terminologie selon lequel l'analyse signifie à la fois la trajectoire du système corrigé après assimilation et l'instant à utiliser comme condition initiale pour la prévision). Si l'on voulait considérer le 3DVAR, il suffirait de se concentrer sur l'instant initial et la fenêtre d'assimilation serait réduite à un seul temps.



Modelli implementati / Modèles mis en œuvre

Allo stato attuale il sistema oceanografico previsionale del Consorzio LaMMA utilizza il Regional Ocean Modelling System (ROMS, www.myroms.org) per la realizzazione dei forecast giornalieri. L'attività di implementazione del sistema di assimilazione ROMS-4DVar è in corso e di seguito verrà presentato lo stato dei lavori.

ROMS è un modello idrostatico che risolve le equazioni primitive ed utilizza coordinate verticali di tipo sigma (seguono l'andamento del fondo marino). La forzante atmosferica è applicata attraverso il calcolo dei flussi di calore, di massa e della quantità di moto con la formulazione bulk (Shchepetkin e McWilliams, 2005).

Il sistema si compone di due modelli innestati: LBLUE E LPURPLE (Figura 3). La procedura di assimilazione è effettuata sul modello LBLUE, mentre il forecast sarà generato su entrambi i modelli.

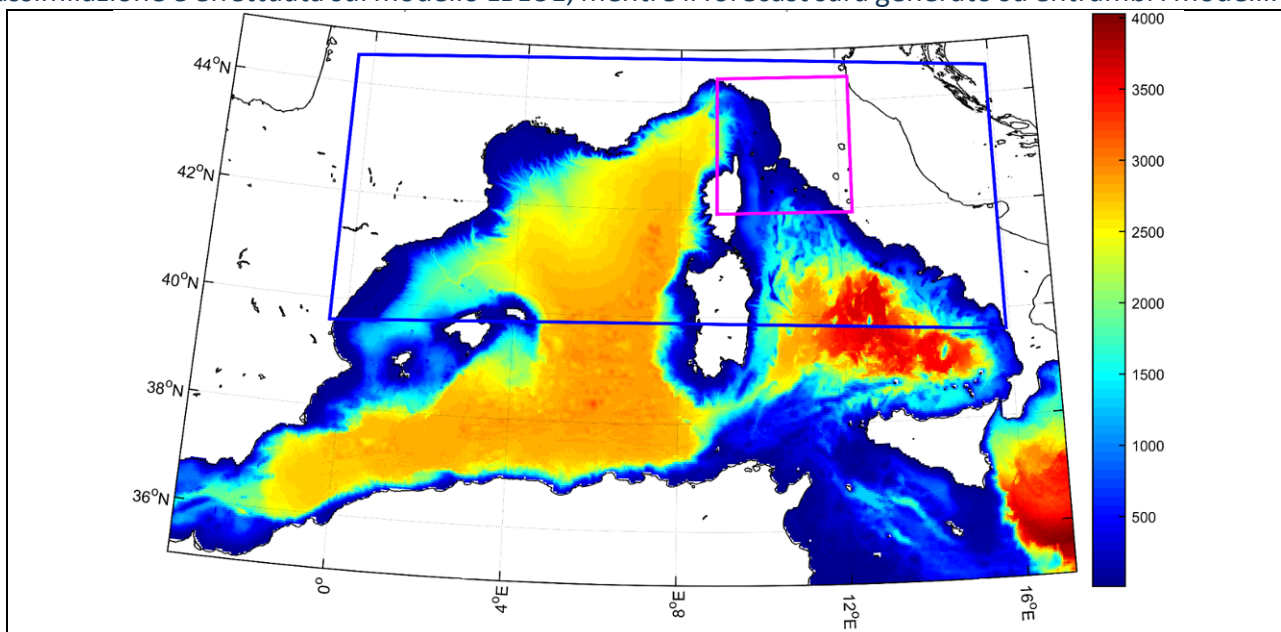


Fig.3: Sistema di modelli innestati per la previsione delle correnti marine nel Nord Tirreno.

Il modello LBLUE copre la parte settentrionale del Tirreno e il bacino ligure-provenzale con una griglia orizzontale C-Arakawa ortogonale di 1360 km (direzione WE) per 550 km (direzione SN) risolta a $1/36^\circ$ (ca. 2.3 km), ed è innestato nel modello di riferimento europeo Mediterranean Forecasting System (Clementi et al., 2021) su campi medi giornalieri di $1/24^\circ$ risoluzione spaziale.

Il modello LPURPLE ha una risoluzione di $1/108^\circ$ (ca. 0.8 km).

Entrambi i modelli sono forzati con venti a 10 m, umidità e temperatura dell'aria a 2m, copertura nuvolosa, pressione atmosferica, pioggia, e radiazioni solari incidenti (corta e lunga), da campi tri-orari del modello ECMWF di risoluzione pari a $1/10^\circ$.



Actuellement, le système de prévision océanographique du Consortium LaMMA utilise le Regional



Ocean Modelling System (ROMS, www.myroms.org) pour la réalisation des prévisions quotidiennes. La mise en œuvre du système d'assimilation ROMS-4DVar est en cours et l'état d'avancement des travaux sera présenté ci-dessous.

Le ROMS est un modèle hydrostatique qui résout les équations primitives et utilise des coordonnées verticales de type sigma (suivant la tendance du plancher océanique). Le forçage atmosphérique est appliqué par le calcul des flux de chaleur, de masse et de quantité de mouvement en utilisant la formulation de masse (Shchepetkin et McWilliams, 2005).

Le système se compose de deux modèles branchés: LBLUE ET LPURPLE (figure 3). La procédure d'assimilation est effectuée sur le modèle LBLUE, tandis que la prévision sera générée sur les deux modèles.

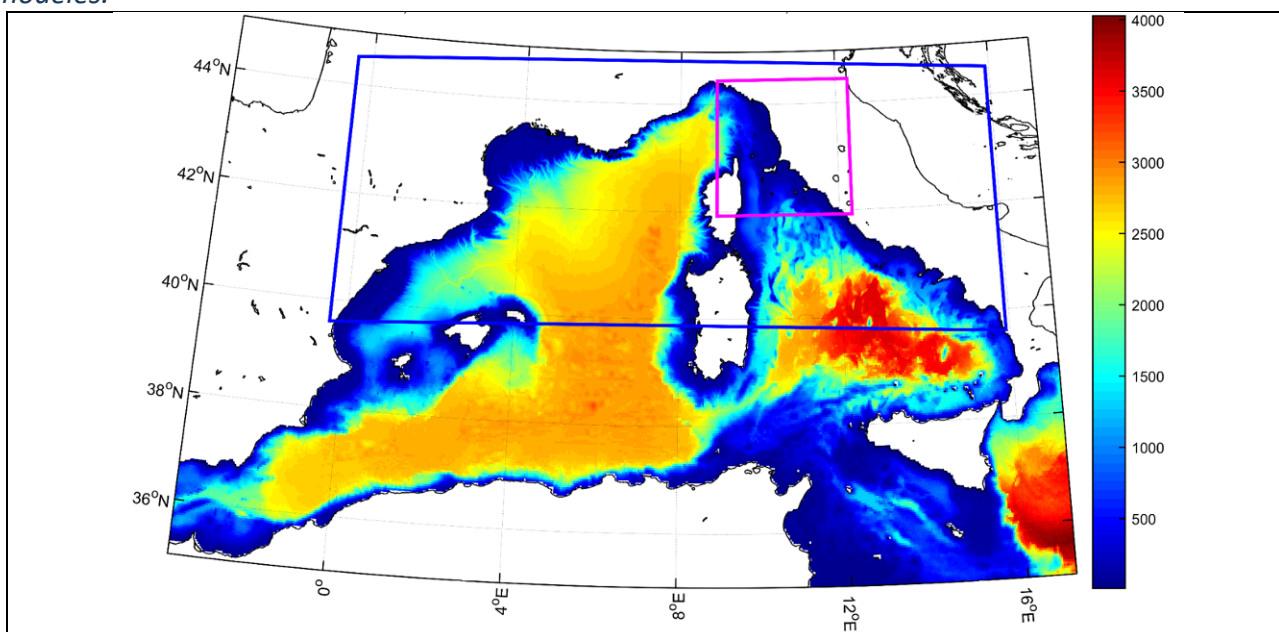


Fig.3: Système de modèles branchés pour la prévision des courants marins dans la mer Tyrrhénienne du Nord.

Le modèle LBLUE couvre la partie nord de la mer Tyrrhénienne et le bassin Ligure-Provençal avec une grille horizontale orthogonale C-Arakawa de 1360 km (direction WE) par 550 km (direction SN) résolue à $1/36^\circ$ (ca. 2.3 km), et est branché au modèle de référence européen Mediterranean Forecasting System (Clementi et al., 2021) sur des champs moyens quotidiens de résolution spatiale $1/24^\circ$.

Le modèle LPURPLE a une résolution de $1/108^\circ$ (environ 0,8 km).

Les deux modèles sont forcés avec les vents à 10 m, l'humidité et la température de l'air à 2 m, la couverture nuageuse, la pression atmosphérique, la pluie et le rayonnement solaire incident (court et long), à partir de champs tri-horaires du modèle ECMWF de résolution $1/10^\circ$.



Assimilazione / Assimilation

Lo schema di assimilazione utilizzato è il RBL-4DVar (Restricted B-preconditioned Lanczos; Gurol et al., 2014) con vincolo forte, che garantisce velocità di convergenza e ricerca della soluzione nello spazio delle osservazioni (approccio duale).

La procedura di assimilazione è stata testata su di un periodo di circa un mese che va dal 29 Settembre 2020 al 7 Novembre 2020, suddiviso in 13 finestre di assimilazione separate di 3 giorni ciascuna come descritto in Figura 4. Al termine di ogni finestra di assimilazione viene lanciato un forecast. In questo frangente l'attenzione verrà posta esclusivamente sul modello LBLUE su cui si effettua l'assimilazione.

Il processo corregge le condizioni iniziali, le condizioni al contorno e le forzanti atmosferiche. La procedura di minimizzazione avviene attraverso 2 outer loops e 10 inner loops.

Le osservazioni assimilate sono: SSH (superficie libera), SST (temperatura superficiale del mare), T e S in situ (temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua), u e v (velocità superficiali orizzontali da HF-Radar).

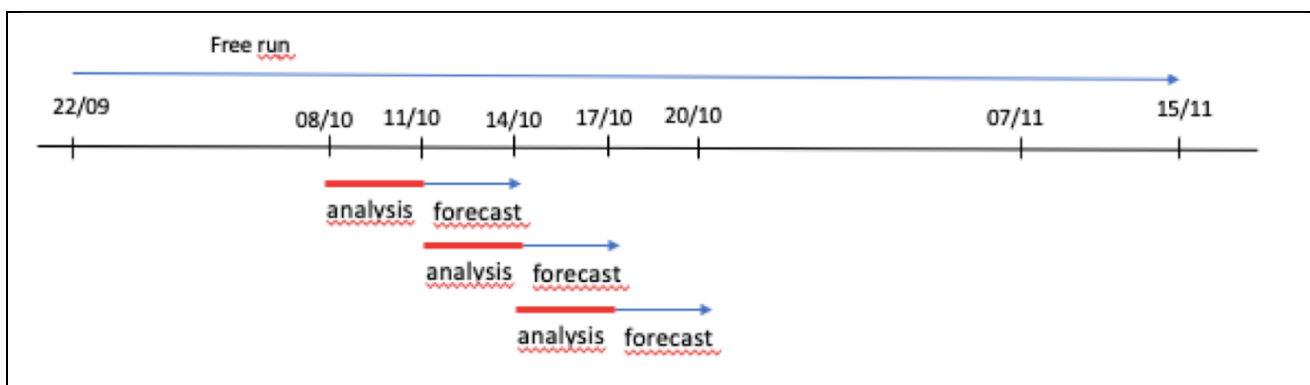


Fig.4: Ciclo di analisi-forecast entrambi di 3 giorni dal 29 Settembre al 7 Novembre 2020, freerun dal 22 Settembre al 15 Novembre 2020.

Per il calcolo delle matrici di covarianza degli errori di background e delle osservazioni sono fornite le deviazioni standard delle variabili assimilate su tutto il dominio di calcolo, le scale di decorrelazione orizzontali (50 km per la superficie libera e per i traccianti, 25 km per la velocità), verticali (30 m), e per le condizioni al contorno (75 km), e gli errori sulle osservazioni in base a quanto riportato sulle specifiche del prodotto. Nel test le deviazioni standard sono state calcolate dalla freerun nel periodo 22 settembre - 15 novembre 2020.





Le schéma d'assimilation utilisé est le RBL-4DVar (Restricted B-preconditioned Lanczos ; Gurol et al., 2014) à forte contrainte, qui garantit la vitesse de convergence et la recherche de solutions dans l'espace des observations (approche duale).

La procédure d'assimilation a été testée sur une période d'environ un mois, du 29 septembre 2020 au 7 novembre 2020, divisée en 13 fenêtres d'assimilation distinctes de 3 jours chacune, comme décrit dans la figure 4. A ce stade, l'accent sera mis exclusivement sur le modèle LBLUE sur lequel l'assimilation est effectuée.

Le processus corrige les conditions initiales, les conditions aux limites et le forçage atmosphérique. La procédure de minimisation s'effectue à travers 2 boucles extérieures et 10 boucles intérieures. Les observations assimilées sont: SSH (surface libre), SST (température de surface de la mer), T et S in situ (température et salinité le long de la colonne d'eau), u et v (vitesses horizontales de surface provenant du radar HF).

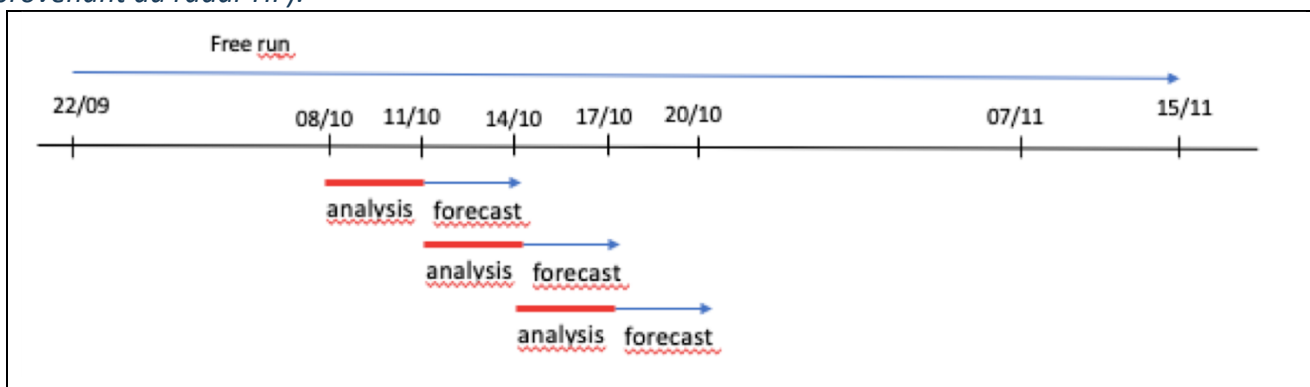


Fig.4 : Cycle analyse-prévision, les deux de 3 jours du 29 septembre au 7 novembre 2020, freerun du 22 septembre au 15 novembre 2020.

Pour le calcul des matrices de covariance des erreurs de fond et des observations, les écarts-types des variables assimilées sur l'ensemble du domaine de calcul, les échelles de décorrélation horizontale (50 km pour la surface libre et les traceurs, 25 km pour la vitesse), verticale (30 m), et pour les conditions aux limites (75 km), et les erreurs sur les observations selon la spécification du produit sont fournis. Lors du test, les écarts types ont été calculés à partir de la freerun de la période du 22 septembre au 15 novembre 2020.



Osservazioni / Observations

In ambito oceanografico sono molteplici le osservazioni che possono essere assimilate all'interno dei modelli numerici. La maggior parte dei dati disponibili per l'assimilazione sono dati superficiali e provengono dai satelliti, i quali mettono a disposizione la temperatura superficiale delle acque (SST) o l'andamento della superficie libera (SSH). Inoltre tutta una serie di strumenti immersi e/o flottanti, fissi e/o mobili (CTD: Conductivity Temperature Depth, ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler, buoys, gliders) forniscono osservazioni su temperatura, salinità e velocità anche nella parte interiore del mare, pur essendo misurazioni che coprono necessariamente una piccola porzione di spazio rispetto ai bacini marini. A terra possono essere installati HF-Radar (High-Frequency-Radar) che raccolgono dati sulle correnti superficiali su un'area che si estende fino a circa 50-70 km dalla costa. Tutte queste osservazioni possono concorrere, attraverso le procedure di assimilazione, a ridurre significativamente l'incertezza delle previsioni.

Nel test proposto in questo report i dati oggetto di assimilazione sono stati i seguenti:

- mappe di temperatura superficiale del mare (SST) estratte dal webserver Copernicus (SST_MED_SST_L3S_NRT_OBSERVATIONS_010_012¹). Si tratta di mappe prodotte selezionando solo dati di alta qualità misurati da diversi sensori satellitari nell'intervallo di tempo notturno, in modo da evitare i cicli diurni e la contaminazione delle nuvole, e rimappati su una risoluzione di 0,01°.
- mappe di Sea Level Anomaly (SLA) riportate su una griglia regolare derivate dai dati di altimetria satellitare estratte dal webserver Copernicus (SEALEVEL_EUR_PHY_L4_NRT_OBSERVATIONS_008_060²). Da cui si ricava la SSH.
- collezione di dati in situ T-S estratti dal database di Copernicus (INSITU_MED_NRT_OBSERVATIONS_013_035³). Sono dati controllati qualitativamente e comprendono profili verticali di temperatura e salinità.
- vettori di velocità orizzontale superficiale (u,v) misurati da HF-radar sia lungo la costa spagnola (catena di radar HF Ebro, punti rossi verso Ovest in Figura 6) sia lungo la costa toscana e ligure (radar Tir-Lig, punti rossi verso Nord-Est in Figura 6), entrambi estratti dal webserver di Copernicus (INSITU_MED_NRT_OBSERVATIONS_013_035³). Queste osservazioni hanno una frequenza di 15 minuti ma vi è stato applicato un filtro passabasso per rimuovere le frequenze maggiori di 3 ore.

¹ Buongiorno et al., 2013. Doi: <https://doi.org/10.48670/moi-00142>.

² Doi: <https://doi.org/10.48670/moi-00142>.

³ Doi: <https://doi.org/10.48670/moi-00142>.

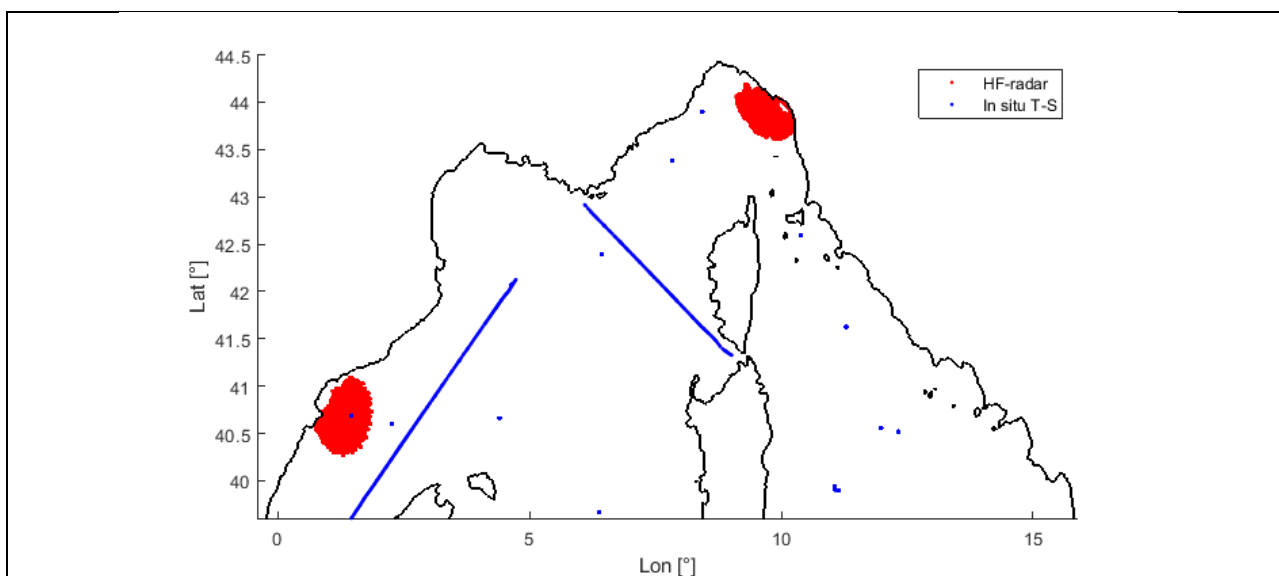


Fig.6: Osservazioni assimilate nella finestra temporale dal 20 al 23 Ottobre 2020.

I dati osservati che hanno una risoluzione maggiore del modello di analisi prima di essere assimilati vengono ridotti e inglobati in un unico dato per cella di griglia nell'intervallo di un'ora. I dati radar hanno circa la stessa risoluzione spaziale del modello mentre altri dati, tipo la SST satellitare o i dati alcuni in situ, hanno una risoluzione più spinta del modello per quindi all'interno di una cella di calcolo cadono più di una misura: tutte queste vengono quindi sostituite dalla loro media con peso proporzionale alla distanza dal centro della cella.



En océanographie, il existe de nombreuses observations qui peuvent être assimilées dans les modèles numériques. La plupart des données disponibles pour l'assimilation sont des données de surface et proviennent de satellites, qui fournissent la température de l'eau en surface (SST) ou la tendance de la surface libre (SSH). En outre, toute une série d'instruments immergés et/ou flottants, fixes et/ou mobiles (CTD : Conductivity Temperature Depth, ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler, bouées, gliders) fournissent des observations de température, de salinité et de vitesse également dans la partie intérieure de la mer, bien que ces mesures couvrent nécessairement une petite portion d'espace par rapport aux bassins maritimes. Les radars HF (High-Frequency-Radar) peuvent être installés à terre pour recueillir des données sur les courants de surface dans une zone s'étendant jusqu'à environ 50-70 km de la côte. Toutes ces observations peuvent contribuer, à travers des procédures d'assimilation, à réduire significativement l'incertitude des prévisions. Dans le test proposé dans ce rapport, les données suivantes ont été assimilées:



- cartes de température de surface de la mer (SST) extraites du serveur Web Copernicus (SST_MED_SST_L3S_NRT_OBSERVATIONS_010_012¹). Ces cartes sont produites en sélectionnant uniquement des données de haute qualité mesurées par plusieurs capteurs par satellite dans l'intervalle de temps nocturne, afin d'éviter les cycles diurnes et la contamination par les nuages, et remappées à une résolution de 0,01°.
- cartes d'anomalies de niveau de la mer (SLA) sur une grille régulière dérivées des données d'altimétrie satellitaire extraites du serveur web Copernicus (SEALEVEL_EUR_PHY_L4_NRT_OBSERVATIONS_008_060²). D'où le SSH est dérivé.
- collection de données T-S in situ extraites de la base de données Copernicus (INSITU_MED_NRT_OBSERVATIONS_013_035³). Il s'agit de données dont la qualité a été contrôlée et qui comprennent des profils verticaux de température et de salinité.
- vecteurs de vitesse horizontale de surface (u,v) mesurés par des radars HF le long de la côte espagnole (chaîne de radars HF Ebro, points rouges vers l'ouest sur la figure 6) et le long des côtes toscanes et liguriennes (radar Tir-Lig, points rouges vers le nord-est sur la figure 6), tous les deux extraits du serveur Web Copernicus (INSITU_MED_NRT_OBSERVATIONS_013_035³). Ces observations ont une fréquence de 15 minutes mais un filtre passe-bas a été appliqué pour éliminer les fréquences supérieures à 3 heures.

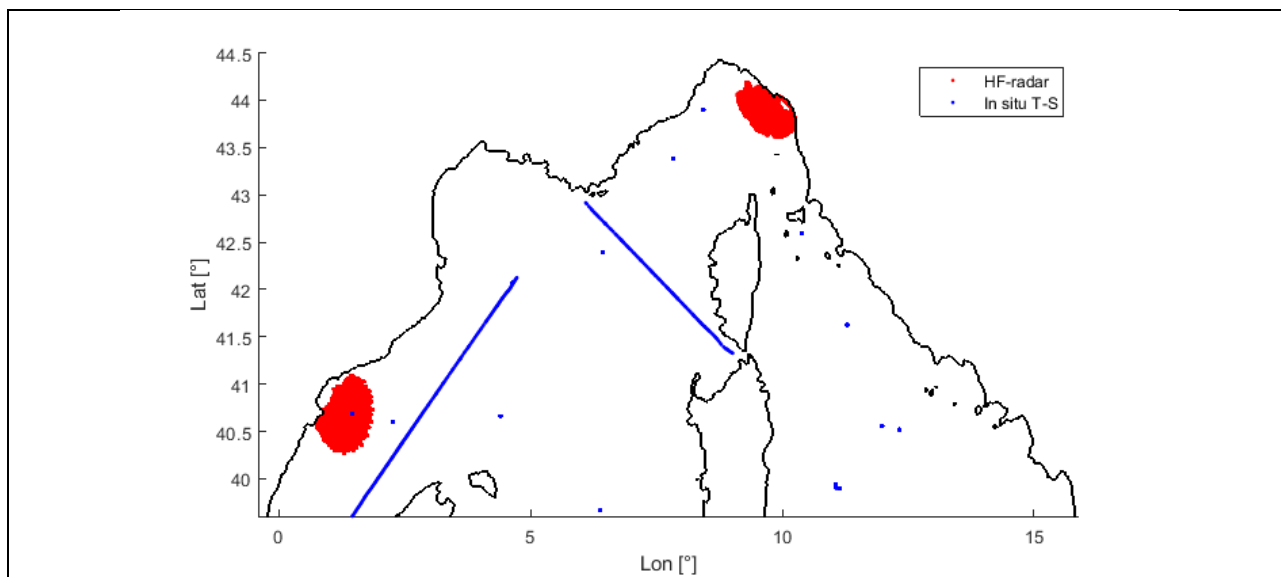


Fig.6 : Observations assimilées dans la fenêtre temporelle du 20 au 23 octobre 2020.

¹Buongiorno et al. , 2013. Doi: <https://doi.org/10.48670/moi-00142>.

² Doi: <https://doi.org/10.48670/moi-00142>.

³ Doi: <https://doi.org/10.48670/moi-00142>.



Interreg 
UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

 possibile visualizzare l'immagine

Les données observées qui ont une résolution plus élevée que le modèle d'analyse, avant d'être assimilées sont réduites et incorporées en une seule donnée par cellule de maillage dans un intervalle d'une heure. Les données radar ont approximativement la même résolution spatiale que le modèle, tandis que d'autres données, telles que les SST par satellite ou certaines données in situ, ont une résolution plus élevée que le modèle, de sorte que plus d'une mesure tombe dans une cellule du maillage: toutes ces données sont alors remplacées par leur moyenne avec un poids proportionnel à la distance du centre de la cellule.

 possibile visualizzare l'immagine

Risultati / Résultats

Per valutare l'assetto del procedimento di assimilazione confrontiamo lo scarto quadratico medio tra le osservazioni assimilate e le variabili corrispondenti estratti dal modello di analisi e dal modello senza assimilazione (Figura 7).

L'assimilazione porta ad una riduzione degli errori in tutte le variabili. Si rileva solo qualche caso di aumento nel caso della temperatura superficiale. Nella run di forecast, sebbene vi sia un aumento dell'errore rispetto all'analisi, vi rimane una sensibile evidenza del beneficio apportato dall'assimilazione nell'analisi attraverso la condizione iniziale.

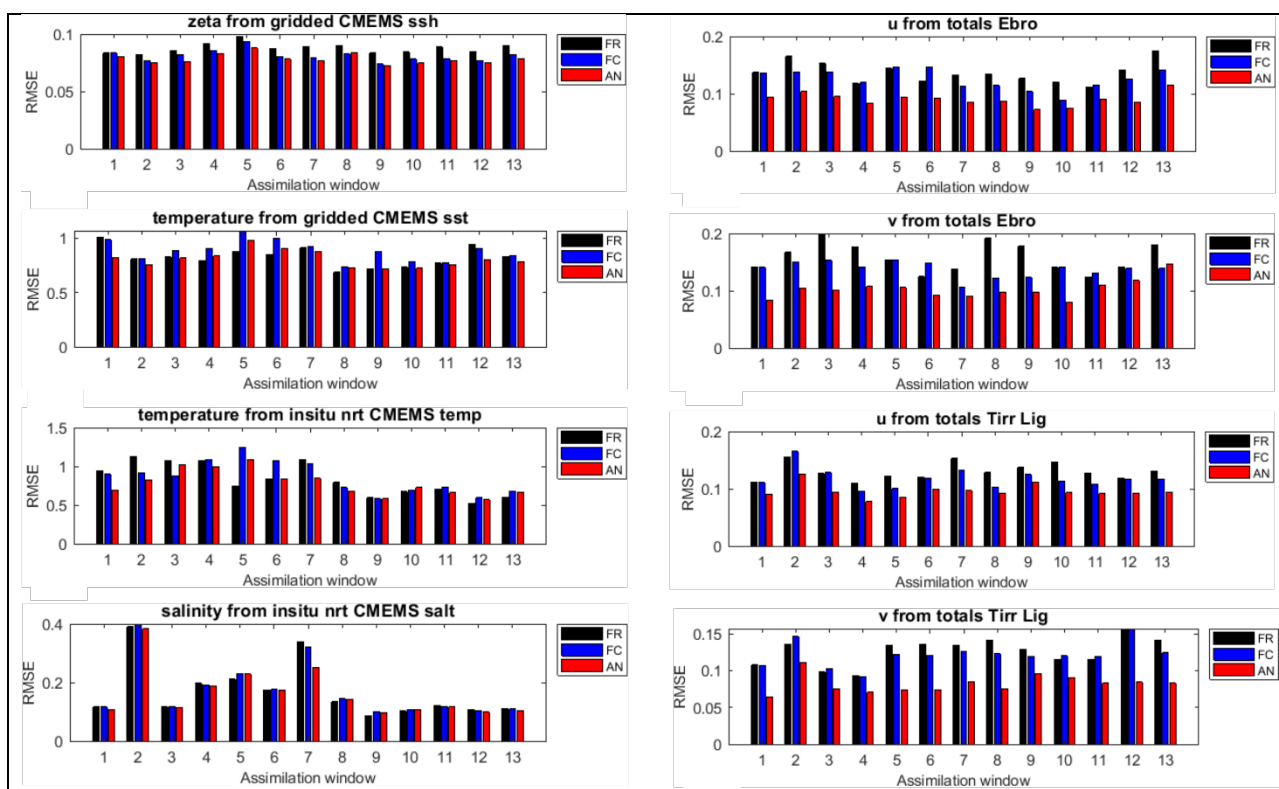


Fig.7: RMSE rispetto alle osservazioni assimilate della freerun (FR), dell'analisi (AN) e del forecast (FC) presentate rispetto alle successive finestre di assimilazioni.

Gli errori sulle velocità superficiali sono presentati separatamente per sistema di radar: entrambi sono in sensibile riduzione nell'analisi. Nel sistema radar Tirreno-Ligure la riduzione di errore è sensibilmente maggiore nella componente di velocità Nord-Sud, correzione che viene molto ridotta nel forecast, mentre nell'altra direzione, pur essendo minore, viene comunque quasi del tutto conservata nella previsione successiva.

Il processo assimilativo è caratterizzato da una moltitudine di parametri e schemi numerici il cui settaggio richiede un'attenta analisi su una moltitudine di esperimenti. Tuttavia già con un primo



test è evidente come l'assimilazione delle osservazioni ci permette di avere sia una riproduzione delle correnti sia una previsione caratterizzati da minore errore rispetto alle osservazioni utilizzate.



Afin d'évaluer la mise en place de la procédure d'assimilation, nous comparons l'écart quadratique moyen entre les observations assimilées et les variables correspondantes extraites du modèle d'analyse et du modèle sans assimilation (Figure 7).

L'assimilation conduit à une réduction des erreurs dans toutes les variables. Il n'y a que quelques cas d'augmentation dans le cas de la température de surface. Dans le run de prévision, bien qu'il y ait une augmentation de l'erreur par rapport à l'analyse, il reste une preuve considérable de l'avantage apporté par l'assimilation dans l'analyse à travers la condition initiale.

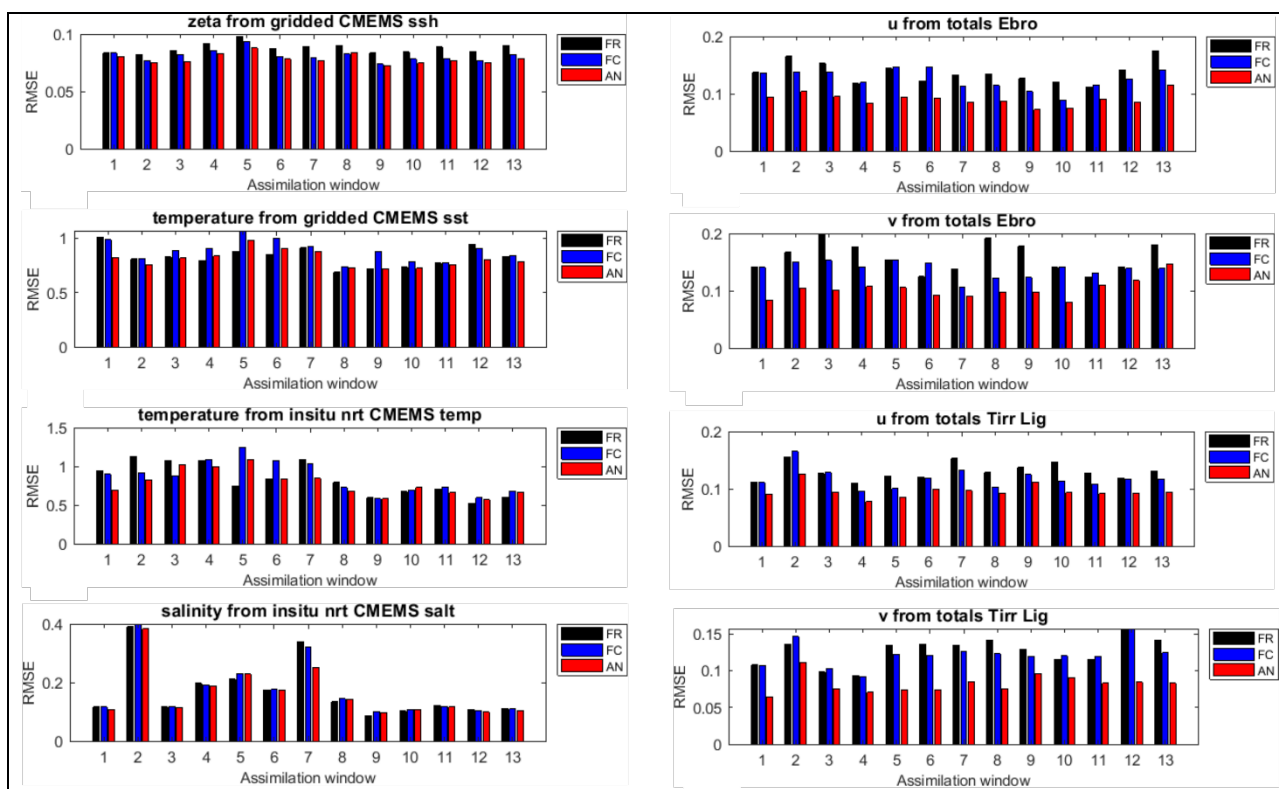


Fig.7 : RMSE par rapport aux observations assimilées de la freerun (FR), de l'analyse (AN) et de la prévision (FC) présentées en fonction des fenêtres d'assimilation suivantes.

Les erreurs sur les vitesses de surface sont présentées séparément par système radar: les deux sont considérablement réduites dans l'analyse. Dans le système radar Tyrrhénien-Ligure, la réduction de l'erreur est nettement plus importante dans la composante de vitesse nord-sud, une correction qui est fortement réduite dans la prévision, tandis que dans l'autre direction, bien qu'elle soit mineure, elle est néanmoins presque entièrement préservée dans la prévision suivante.



Interreg



UNIONE EUROPEA

SICOMAR
plus

MARITTIMO-IT F R-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Non è possibile visualizzare l'immagine

Le processus d'assimilation est caractérisé par une multitude de paramètres et de schémas numériques, dont le réglage nécessite une analyse minutieuse sur nombreuses expériences. Cependant, déjà avec un premier test, il est évident comment l'assimilation des observations permet d'avoir à la fois une reproduction des courants et une prévision caractérisées par une erreur mineure que les observations utilisées.

Non è possibile visualizzare l'immagine



Bibliografia/ Bibliographie

This study has been conducted using E.U. Copernicus Marine Service Information.

Buongiorno Nardelli B., C.Tronconi, A. Pisano, R.Santoleri, 2013: High and Ultra-High resolution processing of satellite Sea Surface Temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project, Rem. Sens. Env., 129, 1-16, doi:10.1016/j.rse.2012.10.012.

Clementi, E., Aydogdu, A., Goglio, A. C., Pistoia, J., Escudier, R., Drudi, M., Grandi, A., Mariani, A., Lyubartsev, V., Lecci, R., Cretí, S., Coppini, G., Masina, S., & Pinardi, N. (2021). Mediterranean Sea Physical Analysis and Forecast (CMEMS MED-Currents, EAS6 system) (Version 1) set. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS).

DOI: https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_006_013_EAS6

Gürol, S., Weaver, A. T., Moore, A. M., Piacentini, A., Arango, H. G., & Gratton, S. (2014). B-preconditioned minimization algorithms for variational data assimilation with the dual formulation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140(679), 539-556.

Moore, Andrew M et al. (2011). _The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-dimensional variational data assimilation systems: Part I_System overview and formulation. Progress in Oceanography 91.1, pp. 34_49.

Sandery, Paul A., and Pavel Sakov. (2017). Ocean forecasting of mesoscale features can deteriorate by increasing model resolution towards the submesoscale. Nature communications 8.1: 1-8.

Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean modelling, 9(4), 347-404.