

PROGETTO GIAS

Activité T2.1

Simulation dynamique de la dispersion des polluants et suivi des objets à la dérive

Livrables T2.1.1

Modélisation dynamique de la dispersion des polluants en cas d'accident

Livrables T2.1.2

Modélisation dynamique du suivi d'objets à la dérive (carcasses, conteneurs) en cas d'accident

Partenaire responsable: ARPAL date de début et de fin: 30/03/2022 - 30/09/2022

Version finale 20/09/2022



Préface:

L'activité T2.1 a été réalisée en synergie entre ARPAL, le consortium LaMMA et la Fondation CIMA et concerne la simulation dynamique de la dispersion des polluants en mer et le suivi des objets à la dérive suite à des accidents de navigation. L'activité se concentre sur la prédiction, par le biais de simulations numériques, du devenir des polluants et des objets dérivants rejetés en mer, en exploitant l'expérience de modélisation du consortium ARPAL et LaMMA acquise dans le cadre de plusieurs projets européens tels que SICOMAR et SICOMAR+. En effet, dans le cadre de ces projets, les chaînes de modélisation hydrodynamique ont été calibrées et validées avec les données d'observation disponibles et les modèles de dispersion lagrangienne des polluants rejetés en mer à la suite d'accidents de navigation, tels que les hydrocarbures et les objets à la dérive.

Pour le produit T2.1.1 "Modélisation dynamique de la dispersion des polluants en cas d'accident", des simulations pour la prédiction de la dispersion et de la chronologie des déversements d'hydrocarbures en mer ont été mises en œuvre à l'aide d'applications développées dans SICOMAR, calibrées dans SICOMAR+, et mises en œuvre plus avant au cours du projet GIAS.

Pour le produit T2.1.2 "Modélisation dynamique du suivi des objets dérivants (carcasses, conteneurs) en cas d'accident" en synergie avec la Fondation CIMA et le consortium LaMMA, des modèles de dispersion ont été calibrés pour simuler le devenir des carcasses de grands cétacés.



Livrables T2.1.1

Modélisation dynamique de la dispersion des polluants en cas d'accident

Les produits développés dans les précédents projets européens SICOMAR et SICOMAR+, dans lesquels le consortium LaMMA et ARPAL étaient partenaires du projet, ont été capitalisés dans le projet GIAS en calibrant et en développant davantage les applications de modélisation. En particulier, les modèles de prévision du devenir des hydrocarbures déversés en mer à la suite d'accidents ont été mis en œuvre en considérant également l'effet des vagues et utilisés pour définir les zones les plus à risque d'échouage.

EFFET DES VAGUES DANS LES SIMULATIONS DE MARÉES NOIRES

L'ARPAL dispose depuis 2013 d'une plateforme de modélisation dédiée à l'environnement marin. Le système est basé sur le modèle de circulation tridimensionnel MIKE 3 HD FM de toute la mer Ligure. Le modèle fournit la prévision à 48 heures des principaux forçages physiques et hydrodynamiques : température, salinité, intensité et direction du courant à différentes profondeurs, niveau de la mer (y compris l'onde de tempête et la marée). Le système de modélisation est configuré comme une "mise à l'échelle" du modèle tridimensionnel de la mer Méditerranée (Mediterranean Forecast System - Med-Currents), disponible dans le cadre du programme européen COPERNICUS et exploité par le CMCC (Centre euro-méditerranéen sur le changement climatique), dont il reçoit les conditions limites. Il est ensuite alimenté en interne par les forçages atmosphériques du modèle météorologique MOLOCH, et les forçages hydrologiques du modèle DRiFt, tous deux opérant au CFMI-PC d'ARPAL. Le modèle hydrodynamique est établi sur un maillage triangulaire flexible avec des volumes finis, tandis que verticalement il utilise des couches mixtes sigma et z pour optimiser la transition de l'échelle "océanographique classique" des modèles de circulation à l'échelle "océanographique côtière". Pour les applications côtières qui intéressent le plus l'Agence, la nécessité d'améliorer la fiabilité des prévisions hydrodynamiques est devenue évidente, tant en termes de résolution de la dynamique côtière horizontale que de composantes verticales en termes de reproduction de la thermocline saisonnière. À cette fin, au cours du projet SICOMAR+, un nouveau modèle hydrodynamique a été mis en œuvre, caractérisé par une plus grande résolution sur l'ensemble du littoral ligure et un plus grand nombre de niveaux verticaux le long desquels les principales quantités physiques ont pu être calculées. En outre, les performances du nouveau modèle ont été vérifiées en comparant les résultats de la modélisation avec toutes les mesures de terrain disponibles. La version ainsi mise en œuvre est disponible sur le site de l'agence à l'adresse suivante: https://www.arpal.liguria.it/tematiche/meteo/modelli-marini.html. Un exemple des résultats de la modélisation est présenté dans la Figura 1.





Figura 1 Champ de courant de surface simulé par la chaîne de modélisation opérationnelle ARPAL

Ce modèle constitue la "base hydrodynamique" sur laquelle se greffent les modèles de prévision du transport et de la dispersion des polluants en mer, tels que ceux résultant d'accidents de navigation (marée noire) ou d'objets dérivants.

En particulier, le module MIKE Oil Spill de DHI considère une approche lagrangienne avec une composante de dispersion aléatoire, une composante advective due à l'effet des courants et du vent, et des processus d'altération (émulsification, évaporation, entraînement et dissolution) selon les différents types d'hydrocarbures considérés.

Pour le projet GIAS, l'effet des vagues a été ajouté à la dispersion des hydrocarbures afin d'évaluer dans quelle mesure cet effet pouvait améliorer la prédiction en réduisant l'incertitude. Un certain nombre de simulations de déversements d'hydrocarbures ont été effectuées le long des principales voies de navigation vers le port de Gênes dans des conditions de forte houle. La Figura 2 montre un exemple des résultats obtenus en considérant un déversement le long de l'une des principales voies de navigation vers le port de Gênes dans des conditions de mer forte (carrés blancs), avec (points fuchsia) et sans l'effet des vagues (points verts) : au large, l'effet des courants et du vent joue un rôle décisif dans la dispersion, en fait les deux simulations se chevauchent, tandis qu'à l'approche de la côte, l'effet des vagues se fait sentir, provoquant une plus grande dispersion des hydrocarbures sur les côtes.





Figura 2 Trajectoires de déversement en considérant un possible accident le long de la route vers le port de Gênes (carrés blancs) en considérant le modèle de déversement d'hydrocarbures avec effet de vague (points fuchsia) et sans (points verts), dans des conditions de forte houle..

CARTES DES RISQUES LIÉS AUX MARÉES NOIRES

Le consortium LaMMA a produit des cartes des risques de rejets accidentels d'hydrocarbures pour la région du nord-ouest de la Méditerranée. Les cartes sont construites à partir des données de réanalyse météo-océanographique pour l'année 2017 (Figura 3) et des données de densité de trafic de navires (pétroliers) pour la même année (Figura 4), obtenues à partir du portail EMODNET (https://www.emodnet-humanactivities.eu/).



Figura 3 Exemple de carte de vitesse des courants de surface pour la zone d'étude du nord-ouest de la Méditerranée.





Figura 4: Carte de densité du trafic maritime obtenue à partir du portail EMODNET.

Les cartes indiquent en fait une valeur attendue H(x,y,t) de la distribution spatiale (x,y) de la concentration de pétrole à un nombre spécifique de jours après le rejet (t). Cette quantité est obtenue en multipliant la probabilité d'un rejet dans une certaine zone par l'ampleur de l'événement, représentée par la concentration d'hydrocarbures flottants.

D'un point de vue procédural, les mesures suivantes ont été prises:

- rééchantillonnage de cartes de densité de trafic maritime TD de plus basse résolution;
- réalisation de multiples simulations lagrangiennes de marée noire pour l'année 2017;
- calcul de la magnitude H(x,y,t) par moyenne pondérée de la distribution spatiale de la concentration avec des pondérations données par les cartes de densité du trafic maritime.

Le rééchantillonnage est effectué parce que les cartes fournies par EMODNET ont une résolution de 1 km x 1 km et que la simulation d'un rejet pour chaque cellule serait trop coûteuse en termes de calcul. Les cartes de densité du trafic maritime de la TD sont fournies à l'échelle mensuelle et indiquent les heures de présence des navires par unité de surface pour chaque mois. Plusieurs stratégies d'échantillonnage peuvent être utilisées. Une approche possible consiste à diviser simplement le domaine en cellules de résolution réduite (par exemple 10 km x 10 km) et à attribuer à chacune d'elles une valeur de densité de trafic maritime TD(i) (avec i = 1,...,NTD, et NTD le nombre de cellules après rééchantillonnage) égale à la somme des valeurs de densité de trafic maritime contenues dans la i-ème cellule. Cela permet de préserver le nombre d'heures de présence des navires par unité de surface.

Les simulations lagrangiennes sont effectuées avec le logiciel PyGnome (https://github.com/NOAA-ORR-ERD/PyGnome). Les particules lagrangiennes simulent chacune une partie du rejet



d'hydrocarbures et sont transportées par des courants, des processus de mélange et l'effet du vent. Le logiciel est également capable de reproduire les processus d'altération qui ont pour effet de réduire la masse totale de pétrole après un certain temps après le rejet.

Pour chaque jour de l'année, une libération de 200 particules correspondant à 1000 m3 de pétrole est effectuée sur chaque cellule de la carte de densité de trafic TD(i) et les particules sont suivies pendant les 10 heures suivantes.

Le calcul du risque H(x,y,t) pour le mois identifié par le jour initial Gini et le jour final Gfin, est calculé comme suit:

$$H(x, y, t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{TD}} TD(i)} \frac{1}{G_{fin} - G_{fin}} \sum_{j=G_{ini}}^{G_{fin}} \sum_{i=1}^{N_{TD}} C_{ij}(x, y, t) \cdot TD(i)$$

où Cij(x,y,t) est la concentration d'hydrocarbures flottants associée au i-ème rejet, effectué au cours du j-ème jour, à l'emplacement (x,y) après t jours de rejet.

Un exemple de cartes de valeurs attendues [kg/km2] associées aux 4 trimestres de l'année pour 2 jours après le rejet est présenté à la Figura 5. Il convient de garder à l'esprit que différentes valeurs de concentration peuvent être obtenues selon qu'une quantité différente d'hydrocarbures est simulée pour chaque rejet (dans ce cas, un volume de 1000 m3 par rejet a été supposé).



Figura 5: Cartes de danger 2 jours après la libération par quartiers (janvier - février - mars en haut à gauche ; avril - mai - juin en haut à droite ; juillet - août - septembre en bas à gauche ; octobre - novembre - décembre en bas à droite).



Livrables T2.1.2

Modélisation dynamique du suivi d'objets à la dérive (carcasses, conteneurs) en cas d'accident

LARGAGE DE BOUÉES AIS EN MER

Pour le projet GIAS, la Fondation Cima a envisagé 3 configurations différentes de bouées AIS (Figura 6) avec différentes configurations de flottabilité faisant référence aux différentes flottabilités des carcasses en mer (Figura 7).



Figura 6 Différentes configurations BOE AIS utilisées par la Fondation CIMA ; de gauche à droite : 0 DRIFTER, 1 DRIFTER, 2 DRIFTER, DRIFTER seulement



Figura 7 Correspondance entre différentes configurations de bouées AIS et différents types de carcasses de cétacés en fonction de leur flottabilité.



La première configuration, avec uniquement la bouée AIS, émule le comportement des carcasses de baleines dans un état de décomposition élevé pour lesquelles la partie émergée correspond à près de 70% de la masse totale. La deuxième configuration, une bouée AIS et un dériveur, concerne toujours les carcasses de baleines mais qui n'ont pas encore atteint le plus haut degré de décomposition. La dernière configuration, bouée AIS et deux bouées dérivantes, émule le comportement des carcasses de cachalots qui flottent sur le côté et restent immergées dans l'eau pour environ 50% de leur masse.

Sur la base de ces différentes configurations, la Fondation CIMA a effectué 12 lancements en mer, et dans certains de ces lancements, les dritfers fournis par le consortium LaMMA ont également été utilisés. La Figura 8 montre sur la carte les trajectoires de toutes les bouées et dériveurs lâchés au cours des 12 lancements.



Figura 8 Traces de bouées et dériveurs, fournis par le consortium LaMMA, relâchés lors des 12 lancements effectués par la Fondation CIMA.



Le tableauTabella 1 montre les informations principales des 12 lâchers: date, heure de début et de fin du lâcher, position initiale où les bouées ont été lâchées, type de bouées et/ou de dériveurs considérés.

RILASCI BOE CIMA							
campagna n°.	DATA	ORA INIZIO (UTC)	ORA FINE (UTC)	LON	LAT	n° lanci	TIPOLOGIA DRIFT
1	31/10/20	9:55	14:54	8.369	44.135	3	BOA AIS 3 config
2	4/11/20	9:55	14:15	8.368	44.137	3	BOA AIS 3 config
3	10/11/20	8:50	13:50	8.380	44.123	3	BOA AIS 3 config
4	13/11/20	10:05	14:00	8.375	44.125	3	BOA AIS 3 config
5	19/11/20	9:15	14:00	8.380	44.123	3	BOA AIS 3 config
6	26/11/20	11:20	15:20	8.530	44.293	3	BOA AIS 3 config
7	24/2/21	10:45	15:45	8.366	44.137	4	BOA AIS 3 config + 1 drifter
8	10/3/21	9:30	14:20	8.346	44.149	4	BOA AIS 3 config + 1 drifter
9	19/8/21	21:35	6:50	8.641	44.041	3	BOA AIS 3 config
10	28/9/21	09:30	14:40	8.452	44.153	2	drifter consorzio LaMMA
		10:40	15:40	8.451	44.151	2	BOA AIS 1 drifter
11	29/9/21	07:25	15:30	8.449	44.151	2	drifter consorzio LaMMA
		08:25	16:30	8.449	44.151	3	BOA AIS 3 config
12	14/12/21	09:37	14:00	8.399	44.163	2	drifter consorzio LaMMA
		10:35	15:00	8.399	44.163	1	BOA AIS 2 drifter

Tabella 1 : Caractéristiques des 12 lancements effectués par la Fondation CIMA : lieu de lancement, date, heure et configuration des bouées AIS et/ou des dériveurs.



Le tableauTabella 2 indique la durée du lâcher en mer, la distance de la côte, la longueur maximale parcourue par les bouées et leur dispersion maximale les unes par rapport aux autres. Comme le montre le Tabella 3, les lâchers ont eu lieu en moyenne à environ 8 km de la côte, ont duré 5 heures et les bouées ont parcouru environ 5 km, se dispersant les unes les autres d'un maximum d'environ 400 mètres. De plus, comme le montre leTabella 2, les bouées se dirigent dans la plupart des cas vers l'ouest-sud-ouest, dans la direction dominante du courant Ligure-Provençal de la circulation de méso-échelle.

RILASCI BOE CIMA							
campa gna n°	data	costa	Direzione drifter/boa	durata (h)	distanza da costa (km)	lunghezza lancio (km)	dispersione massima (m)
1	31/10/20	Finale Ligure	S -SW	5	6	4	50
2	04/11/20	Caprazoppa	W	4	5	4.5	100
3	10/11/20	Caprazoppa	SW - N	5	8	0.9	200
4	13/11/20	Caprazoppa	W-SW	4	7	4	400
5	19/11/20	Caprazoppa	N	5	8	3.5	800
6	26/11/20	Savona	W	4	4.5	6	100
7	24/02/21	Caprazoppa	S	5	5	4	450
8	10/03/21	Caprazoppa	SE -W	5	2	4	1000
9	19/08/21	Varigotti	W	10	34	7	500
10	28/09/21	Varigotti	W	5	6.6	9	400
11	29/09/21	Varigotti	W	8	6.6	18	300
12	14/12/21	Varigotti	E	4	3	1	200

Tabella 2 : Durée, distance du rivage et longueur des 12 lancements effectués par la Fondation CIMA

	durata (h)	distanza da costa (km)	lunghezza lancio (km)	dispersione massima (m)
MIN	4	2	0.9	50
MEDIA	5	8	5	375
MAX	10	34	18	1000

Tabella 3 : Caractéristiques moyennes, maximales et minimales des 12 lancements de bouées AIS effectués par la Fondation CIMA.



MODÉLISATION DU SUIVI DES BOUÉES LÂCHÉES EN MER

Sur la base des résultats des lâchers effectués par la Fondation Cima, l'ARPAL a simulé les trajectoires des bouées avec les outils de modélisation en sa possession, mis en œuvre au fil des années et décrits dans les paragraphes précédents.

Pour la simulation de la dispersion des particules dans la mer, le module de dispersion lagrangienne des particules (MIKE Particle Tracking) est utilisé à partir de la prédiction hydrodynamique, qui fournit des informations sur les trajectoires et les vitesses de déplacement des objets et des substances dans la mer en raison de l'effet des courants et du vent de surface.

SIMULATIONS NUMÉRIQUES DE BOUÉES LÂCHÉES DANS LA MER

Les simulations de suivi ont ensuite été implémentées à partir des résultats de la chaîne opérationnelle quotidienne, archivés dans les serveurs d'ARPAL. Les simulations de chaque lancement effectuées par la Fondation Cima ont pour but de configurer les paramètres de simulation afin de reproduire le plus fidèlement possible les trajectoires des bouées. Dans un premier temps, on a pensé qu'il serait possible de différencier les paramétrages en fonction du type de carcasse considéré, mais à la lumière des résultats des différents lancements (voir tableauTabella 3 récapitulatif) on peut aisément constater que le comportement des bouées ne diffère pas sensiblement. Par conséquent, l'objectif de cette partie du travail est de trouver la configuration des paramètres numériques qui décrivent le mieux le comportement des bouées AIS libérées par la Fondation CIMA. A cette fin, nous avons tout d'abord procédé en considérant une dispersion due à l'effet du courant de surface seul (configuration sans vent), puis en considérant le vent prédit par le modèle météorologique MOLOCH de l'ARPAL et en faisant varier de manière appropriée son influence sur la dispersion des particules et enfin, lorsqu'il était disponible, en considérant également le vent mesuré par l'utilisateur en mer ; Dans ce dernier cas, il faut tenir compte du fait que le vent a été mesuré par un opérateur en mer, mais nous ne sommes pas en mesure d'apprécier le degré de précision de la mesure car nous ne connaissons pas le type d'instrument utilisé et la fréquence de la mesure ; pour certaines campagnes, on considère qu'il s'agissait d'une estimation visuelle du vent percu et donc certainement beaucoup moins fiable qu'une mesure instrumentale. Pour ces raisons, il a souvent été considéré qu'une telle mesure n'était pas entièrement fiable pour évaluer la qualité de la prévision du modèle météorologique. A la lumière des résultats qui seront présentés en détail, on constate toutefois que le vent est le principal facteur de forçage de la dispersion des bouées, de sorte qu'un niveau de connaissance du vent suffisamment précis permet de réduire considérablement l'incertitude de l'estimation du devenir des bouées et donc, in fine, des carcasses.



n lancio	Giorno	Vento Moloch	vento in mare	Simulation	
1	31/10/2020	3 m/s SE	calma 10:00 2-3m/s 350° 12:00 calma 15:00	λ	rosa: solo corrente maille: vento Moloch (wind weight 3½) bianco: vento misurato dall'utente in mare; verde: vento variabile nel tempo modificato a partire dal dato misurato da utente in mare e wind dritf 0.06
2	04/11/2020	1.5-2 m/s NW	calma 9:30 1.5 m/s 260° 10:00 1.5 m/s 210° 12:30 1.5 m/s 180° 14:00		rosa: solo corrente chelle: vento di Moloch bianoc: vento misurato dall'utente in mare, vento variabile verde: vento costante 2 m/s 180'modificato a partire dal vento
3	10/11/2020	1m/s NW	calma 9:00 1.5 m/s 290* 10:00		rosa: solo corrente graffes vento moloch bianco vento misurato dall'utente in mare: 1m/s 290'
4	13/11/2020	4 m/s NW	3 m/s 360* 10:00 5 m/s 360* 13:30		rosa: solo corrente graffe : vento Moloch bianco: vento misurato dall'utente in mare: 1.5 m/s da Nord costante

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

2



5	19/11/2020	1.5 m/s 300° 9:00 1.5 m/s 100° 14:00		rosa: solo corrente poello: vento di Moloch bianoo: vento misurato dall'utente in mare, vento variabile verde: vento costante 2 m/s 180' modificato a partire dal vento misurato in mare
6	26/11/2020	3-5 m/s 280° 11:00 1m/s 350° 13:00		rosa: solo corrente grafic: vento Moloch bianco: vento misurato dall'utente in mare: 4 m/s da 350° costante
7	24/02/2021	calma 280° 10:30 1 m/s 180° 13:00 1 m/s 180° 15:00	1	rosa: solo corrente giallo: vento Moloch bianco: vento misurato dall'utente in mare
8	10/03/2021	6 m/s 290° 09:30 4 m/s 330° 10:00 6 m/s 330° 11:15 9 m/s 320° 11:30 4 m/s 340° 12:15 4 m/s 33° 12:30 4 m/s 105° 13:00 3 m/s 76° 13:15		rosa: solo corrente grafice vento Moloch bianco: vento misurato dall'utente in mare

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

2



9	19/08/2021	1.5 m/s S 3 m/NW	1.5 m/s 30°21:30 4.5 m/s 230°2:30	rosa: solo corrente giallo: vento Moloch bianco: vento misurato dall'utente in mare
10	28/09/2021		2.5 m/s 10' 11:10 4.5 m/s 10' 11:30 4.5 m/s 20' 12:10 4.5 m/s 20' 12:30 2.5 m/s 100' 13:45 2.5 m/s 100' 14:00 0.5 m/s 180' 14:20 0.5 m/s 220' 14:30 0.5 m/s 220' 15:20 0.5 m/s 210' 15:40	rosa: solo corrente grafici: vento Moloch bianco: vento misurato dall'utente in mare
11	29/09/2021		1 m/s 20'N 8:16 1 m/s 10'N 8:47 1 m/s 80'N 9:43 1 m/s 80'N 10:14 3 m/s 120'N 14:04 1 m/s 180'N 14:36 1 m/s 300'N 15:33	rosa: solo corrente diallo: vento Moloch bianco: vento misurato dall'utente in mare
12	14/12/2021		4.5 m/s 270° 10:30 calma 11:30 4.5 m/s 225° 12:30 9.0 m/s 220° 14:00 4.5 m/s 220° 15:00	rosa: solo corrente giallo: vento Moloch bianco: vento misurato dall'utente in mare

Figura 9 Suivi des lancements de bouées AIS dans les différentes configurations et dérives fournies par le consortium LaMMA, en considérant uniquement la contribution du courant (rose) ; le vent simulé par le modèle météorologique MOLOCH (jaune) et basé sur le vent mesuré en mer par l'opérateur (blanc).

L'analyse des résultats des simulations numériques (Figura 9) montre que dans la plupart des cas la meilleure reproduction des trajectoires suivies par les bouées est obtenue en considérant le vent prédit par le modèle atmosphérique MOLOCH (cas 6-7-8-10-11), alors que dans certains cas (3 et 4) le vent mesuré en mer par l'utilisateur s'avère apporter une meilleure contribution au suivi. Dans les cas 1, 2, 5 (mais pourrait être obtenu également pour les cas 5 et 9) à partir du vent mesuré par l'utilisateur, un très bon accord peut être atteint avec la trajectoire suivie par la bouée en variant un peu l'intensité, la direction et la durée du vent estimé par l'opérateur en mer. A partir des résultats obtenus, on peut facilement conclure que le plus grand discriminateur dans la détermination des trajectoires des bouées lâchées depuis la mer est la représentation précise du vent. En outre, il était essentiel de calibrer la contribution du vent, c'est-à-dire de vérifier quelle était la meilleure



configuration des paramètres de dispersion horizontale et du coefficient de résistance au vent. La Figura 10 montre, à titre d'exemple, le travail de calibration du paramètre vent : différentes configurations des coefficients du modèle de dispersion sont testées afin de trouver la meilleure configuration. Dans le cas analysé, les réponses à la variation de la résistance au vent ont été testées: 1%, 3% et 5% représentés dans la figure par les couleurs blanche, bleue et jaune, respectivement.



Figura 10 Trajectoires simulées par le modèle de dispersion sur la base des prévisions hydrodynamiques réalisées par la chaîne opérationnelle ARPAL, en faisant varier le coefficient de traînée du vent : en blanc la trajectoire obtenue avec un coefficient de 1%, en bleu un coefficient de 3% et en jaune un coefficient de 5%.



REPÉRAGE ET SUIVI PAR MODÉLISATION D'UNE CARCASSE EN MER

Le 18/10/2021, au large de la mer Ligure, à environ 28 miles nautiques de la côte, un utilisateur a envoyé un rapport sur l'observation d'une grande carcasse de cétacé en mer. Le rapport n'a malheureusement pas été correctement traité et n'est donc pas entré dans le circuit du réseau d'alerte, mais il a néanmoins été extrêmement utile de suivre la dynamique par la suite. La carcasse a été retrouvée le 21/10/2021 au matin devant le récif de Gênes Nervi.

La Fondation CIMA Research a effectué une recherche scrupuleuse du rapport (Figura 11) parvenant ainsi à retrouver la date et la position précise de l'observation ainsi que les caractéristiques de l'animal : un cachalot d'environ 10 mètres de long. À partir de ces informations, ARPAL et le consortium LaMMA ont tenté de reconstituer la trajectoire parcourue par la carcasse, en supposant que l'animal était déjà mort depuis au moins deux jours, de sorte que ses caractéristiques de flottabilité n'ont pas changé entre le 18 et le 21 octobre 2021. Le champ de courant a été reconstruit à partir des données initiales et limites de la réanalyse CMEMS et des données de vent disponibles auprès des différentes agences.



Figura 11 Rapport d'observation d'une carcasse de cétacé en mer envoyé par un utilisateur (à droite) et lieu de l'observation (à gauche)





Figura 12 Champ de courant de surface simulé par le modèle Med-Current développé par CMEMS et mis à disposition par le programme Copernicus en tant que produit : Analyse et prévision physique de la mer Méditerranée (<u>https://resources.marine.copernicus.eu/products</u>)

Comme mentionné, les forçages hydrodynamiques utilisés proviennent des sorties de la modélisation CMEMS du programme Copernicus, qui fournit des prévisions sur l'ensemble du bassin de la mer Méditerranée (<u>https://resources.marine.copernicus.eu/products</u>). Pour les jours considérés, la circulation à grande échelle montre (Figura 12):

- le courant de nord-est circulant le long de la côte occidentale de la Corse, d'intensité presque constante;
- le courant Ligure-Provençal qui se développe à partir de l'ouest du promontoire de Portofino et s'écoule vers l'ouest en suivant les côtes liguriennes et françaises en s'intensifiant dans l'extrême ouest de la Ligurie;
- un courant entrant de nord-est se forme entre les deux, dont l'intensité varie au cours des 4 jours;
- une structure cyclonique présente sur le Cap Corse et au large de la Riviera Ligure orientale qui atteint son intensité maximale le 18 octobre mais se maintient au cours des 3 jours suivants;



 dans la partie supérieure de la mer Ligure, près de la côte, les courants ne sont pas très intenses (inférieurs à 0,1 m/s).

Il en résulte un déplacement vers l'ouest des objets à la dérive à partir du point de lâcher considéré, comme on peut le voir sur la Figura 13, qui montre la trajectoire prédite dans le cas de l'effet de traînée dû au seul courant de surface. Évidemment, lorsqu'on considère une carcasse flottante, il faut tenir compte du grand effet du vent dans la prédiction de la trajectoire parcourue, comme le soulignent les lâchers de bouées AIS effectués par la Fondation Cima.



Figura 13 Point initial où la carcasse a été mise en garde et trajectoire simulée après 3 jours, en considérant uniquement l'effet du courant de surface simulé par le modèle hydrodynamique MIKE 3D

Nous avons ensuite ajouté l'effet du vent, en utilisant le vent simulé par le modèle météorologique MOLOCH et en utilisant les paramétrages obtenus à partir des simulations des lâchers de bouées AIS. Avant de procéder, on a essayé de vérifier la fiabilité du modèle météorologique utilisé pour décrire le vent à la surface de la mer prévue pour les jours d'intérêt. Les quelques données mesurées disponibles sont les mesures obtenues à partir des partir des partir des enregistrées par les anémomètres des stations terrestres les plus proches de la portion de mer considérée (Figura 15).



Figura 14 Vent à 10 m au-dessus du niveau de la mer mesuré par les satellites ASCAT les 18-19 et 20 octobre 2021.





Figura 15 Direction du vent mesurée par les deux anémomètres situés dans la zone du vieux port de Gênes, à gauche, et sur le Monte di Portofino (municipalité de Camogli), à droite.

Dans ce cas, le modèle météorologique MOLOCH a bien décrit cette situation, comme le montre l'analyse des sorties du modèle présentée à la Figura 16. En fait, le résultat de l'analyse de ces données met en évidence un régime de haute pression persistant tout au long de la période, mais dans les premiers jours (15-17), un champ barique plus nivelé est observé, conduisant à des vents faibles et très variables, comme le montrent également les données mesurées ; dans les jours suivants, un gradient barique plus élevé est établi, conduisant à un flux sud-sud-ouest plus intense et à plus grande échelle.

La possibilité de comparer les résultats de la modélisation avec les mesures in situ permet de réduire la grande incertitude qui entoure la prévisibilité des événements météorologiques, en particulier dans les situations instables ; l'analyse et les techniques de réduction de l'incertitude sont étudiées par le projet GIAS, précisément pour améliorer les prévisions et les rendre plus fiables. En outre, l'importance des données mesurées est évidente afin de pouvoir évaluer la fiabilité des prévisions et donc de pouvoir corriger et améliorer les prévisions de dispersion.



Figura 16 Vent à 10 mètres au-dessus du niveau de la mer prévu par le modèle atmosphérique MOLOCH pour les jours d'intérêt ; on observe une variabilité les 18/19 octobre et l'établissement d'un régime plus stable avec un vent de sud-sud-est les 20/21 octobre 2021.

Nous avons procédé à des simulations de dispersion de la carcasse avec le module PT de MIKE3D, en considérant comme force de forçage le vent à 10 m simulé par le modèle atmosphérique MOLOCH, et en utilisant les paramétrages obtenus à partir des simulations de lancement des bouées AIS : la Figura 17 montre la trajectoire résultante : on peut voir qu'elle est effectivement cohérente avec la constatation faite à Gênes



Nervi le 21 octobre, mais elle ne parvient pas à atteindre la côte. On a donc essayé d'utiliser une paramétrisation qui augmenterait l'effet de traînée du vent sur la carcasse en portant le coefficient de traînée du vent à 7 %. La trajectoire obtenue est représentée sur la Figura 18: le 21 octobre, la carcasse atteint la côte de l'est de Gênes, comme cela a été observé dans la réalité. Cet effet plus important du vent dans le cas de la simulation de la carcasse que dans le cas des bouées AIS est attribuable à la diversité du phénomène considéré : bien que les bouées AIS représentent une bonne approximation du comportement réel d'une carcasse, elles ont été laissées en mer pendant une durée maximale de 10 heures, couvrant une distance maximale de 18 km. La carcasse aperçue a ensuite été retrouvée sur le rivage après 60 heures de dérive et une distance de plus de 50 km. Il faut également considérer que la grande masse du cétacé favorise davantage l'effet de la dérive du vent.



Figura 17Trajectoire de la carcasse du cachalot simulée par le module PT du modèle MIKE3D en considérant le vent à 10 m prédit par le modèle atmosphérique MOLOCH avec la paramétrisation calibrée par les simulations de lancement de la bouée AIS effectuées par la Fondation CIMA.



Figura 18 Trajectoire de la carcasse du cachalot simulée par le module PT du modèle MIKE3D en considérant le vent à 10 m prédit par le modèle atmosphérique MOLOCH et une influence accrue du vent sur la traînée de la carcasse.



MODÉLISATION DU RETOUR EN ARRIÈRE DE LA CARCASSE EN MER

Une fois qu'un paramètre approprié a été trouvé pour décrire le comportement de la carcasse pendant sa dérive, l'étape suivante a consisté à essayer de comprendre d'où venait l'animal, c'est-à-dire où la mort a pu se produire et si elle a pu être due à une collision avec un bateau, comme le suggère le rapport reçu. L'analyse des photos montre une profonde blessure à l'arrière du cou de l'animal (Figura 19).



Figura 19 Photographies de la carcasse du cachalot observé : on peut facilement observer la présence d'une profonde blessure à l'arrière du cou de l'animal, présente tant au moment de la première observation le 18 octobre (à gauche) qu'au moment de l'approche de la côte de Gênes Nervi (à droite)..

La priorité était de déterminer si la collision avait pu se produire dans le sanctuaire des cétacés, en partant du principe que l'animal pouvait être mort depuis environ trois jours au moment de l'observation.

Une simulation de backtracking a ensuite été mise en place, retrouvant la trajectoire parcourue par la carcasse entre le 15 octobre et le 18 octobre. La Figura 20 montre la trajectoire obtenue. D'après la reconstitution de la modélisation, le cétacé a parcouru environ 50 km avant d'être repéré le 18 octobre en mer de Ligurie. L'incident s'est donc produit à l'intérieur du sanctuaire des cétacés et dans une zone de fort trafic maritime, le long d'une des principales routes commerciales vers le port de Gênes : l'hypothèse que la mort ait pu être causée par une collision avec un navire est donc soutenue.

La Figura 21 montre le parcours complet de la carcasse du cétacé depuis le moment de sa mort après la collision jusqu'à sa découverte au large de la côte de Gênes Nervi.





Figura 20 Trajectoire "à rebours" simulée par le modèle et parcours de la carcasse depuis le moment de l'accident présumé, le 15 octobre, jusqu'au point signalé où elle a été repérée le 18 octobre par un bateau.



Figura 21 Trajet total, tel que résultant des simulations numériques, emprunté par la carcasse du cachalot entre le 15 et le 21 octobre 2021, c'est-à-dire entre le moment de sa mort et son échouage le long de la côte de Gênes Nervi.