

Intégration des courants issus de l'océanographie opérationnelle (systèmes Mercator) dans le modèle de dérive Mothy (Météo France)

Stéphane Law Chune (1), Yann Drillet (1), Pierre Daniel (2) et Pierre De Mey (3)

(1) Mercator-Océan, (2) Météo-France, (3) Legos-CNRS

Résumé

L'objectif de cette étude est d'améliorer les résultats du modèle de dérive de nappe d'hydrocarbure utilisé à Météo France (Mothy) en introduisant un forçage océanique supplémentaire, issu de l'océanographie opérationnelle (Mercator Océan). En effet, le modèle de dérive (Mothy) utilise une approximation d'océan barotrope pour sa modélisation interne des courants en vue d'une exécution rapide. Dès lors, le système décrit mal les eaux turbulentes, mal mélangées, ou encore celles soumises à une circulation grande échelle importante, comme c'est typiquement le cas en Méditerranée. Une solution consiste à additionner au courant de Mothy un courant issu de l'océanographie opérationnelle afin d'introduire la circulation océanique générale et la signature de processus baroclines. Ce courant horizontal est sélectionné au niveau 100m afin de ne pas prendre en compte à nouveau les effets du vent, déjà considérés dans le système. Nous cherchons ici à trouver de nouvelles stratégies d'introduction en testant tout d'abord différents types de forçages, puis en évaluant une mise à jour du système opérationnel utilisé. Les données utilisées comme cas d'étude correspondent à une manœuvre de dérive en conditions réelles, conduite en Méditerranée Occidentale dans le cadre du projet Européen Mersea.

Introduction

Les côtes Françaises voient chaque année l'acheminement d'environ 300 millions de tonnes d'hydrocarbures, qui transitent vers les marchés d'Amérique, d'Afrique, mais aussi d'Asie via le canal de Suez, en Méditerranée. Cette activité intense induit un risque de pollution des eaux en cas d'incidents, en plus de fournir un cadre propice aux actions de dégazages sauvages. Afin d'assister les autorités en charge de la lutte contre les pollutions marines accidentelles, Météo France opère un système de dérive : le système Mothy (Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbure). Ce modèle, à vocation totalement opérationnelle, fût développé dans le cadre des engagements de Météo France: au niveau national dans le cadre de l'Action de l'Etat en Mer ; et au niveau

international dans le Système d'Intervention d'Urgence en cas de Pollution de la Mer (SIUPM) coordonné par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO (COI). Mothy est aujourd'hui fréquemment sollicité, et a déjà montré son efficacité lors de grands incidents, comme les naufrages des pétroliers l'Erika et le Prestige.

Description de Mothy et de la problématique

La structure générale de Mothy est représentée en figure 1. Ce système simule les principales forces contraignant une nappe de pétrole en mer : le courant d'Ekman, lié à la

dynamique océanique, et deux processus dépendant de la nature du polluant, la flottabilité (forces verticales) et les forces de turbulence visqueuse (forces tridimensionnelles). La modélisation du polluant est de type particulaire: une nappe de pétrole est définie par un ensemble de gouttelettes de tailles diverses (réparties selon une distribution donnée) et indépendantes les unes des autres (les trois forces précédentes sont évaluées et appliquées pour chacune d'entre elles).

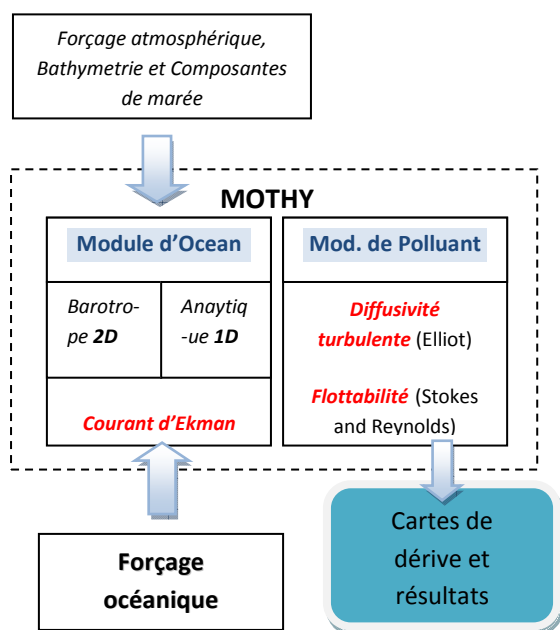


Fig. 1 : schéma général de Mothy

Le courant d'Ekman est calculé par un modèle d'océan barotrope suivant les équations de Saint Venant. Ceci est satisfaisant pour une description sur le plateau continental et pour de courtes échéances temporelles de prévision. L'advection résultante est alors horizontale, mais peut être calculée avec précision sur n'importe quel niveau vertical, analytiquement, à partir du modèle de Madsen (viscosité turbulente 1D), en résolvant explicitement la spirale d'Ekman. Les forces de flottabilités suivent les lois de Stokes et Reynolds alors que la diffusion turbulente est modélisée par un processus aléatoire se basant sur le modèle d'Elliot. En entrée, le système utilise des champs de vents et de pression, qui sont des prévisions de divers modèles atmosphérique (ECMWF à 6hr, Arpège à 3hr et Aladin à 3hr disponibles et utilisés en opérationnel). Le

domaine considéré est extrait d'une bathymétrie GEBCO à une minute de résolution. Celle-ci peut être ré-interpollée au 12^{ème} de degré pour des calculs de dérive loin des côtes, afin de réduire le temps de calcul. Il est enfin aussi possible de simuler la marée aux frontières de la zone d'étude, qui est reconstruite à partir de constantes harmoniques de diverses données marégraphiques.

Notre problématique vient de cette décomposition du courant en « 2D+1D », qui bien que permettant une exécution très rapide (nécessaire pour l'opérationnalité du système), limite en revanche les performances dès que la situation barotrope n'est plus valable (eaux mal mélangées et turbulentes, conditions d'instabilités) et/ou en présence d'une circulation permanente marquée. Une solution cependant existe pour améliorer les performances du système tout en conservant sa configuration actuelle : on ajoute au courant calculé un courant extérieur, contenant les processus manquants. Celui-ci doit néanmoins être soustrait des effets des forçages de surface déjà pris en compte. Ce « forçage océanique » supplémentaire peut provenir soit de climatologies, soit de sorties de systèmes d'océanographie opérationnelle, qui fournissent une information plus complète, et évaluée pour une date (ou un instant) donnée.

Champs utilisés comme forçage océanique

Dans cette étude, nous utilisons les sorties des systèmes opérationnels Mercator pour le forçage océanique externe de Mothy en Méditerranée à une fréquence journalière. Jusqu'à présent, une extraction des composantes horizontales du courant à 100 m était effectuée, en considérant l'influence du forçage de surface nul à cette profondeur. Une des motivations de cette étude est dans un premier temps l'évaluation d'autres candidats au forçage océanique de Mothy, et que l'on espère finalement meilleurs que le courant à 100m dans cet exercice. Dans cette optique, nous avons calculé les trois champs suivants de manière diagnostique :

- **U_geotherm**: qui est le courant géostrophique calculé à partir de la hauteur dynamique modélisée. On lui ajoute ici une contribution aux forces de flottabilité liée à la température de surface.

$$\begin{cases} \overline{u_{g\theta\theta}} = -g/f \frac{\partial \xi}{\partial y} + h/2f \frac{\partial \theta}{\partial y} \\ \overline{v_{g\theta\theta}} = +g/f \frac{\partial \xi}{\partial x} - h/2f \frac{\partial \theta}{\partial x} \end{cases}$$

$$\xi = SSH + h \quad \nabla \theta = g \cdot \chi_z \cdot \nabla SST$$

- **U_moy_m_ek**: qui est le courant moyen dans la couche de surface [0-100m] soustrait du courant d'Ekman barotrope correspondant.

$$\begin{cases} \overline{u_{ekman}} = +1/fh \left(\tau^x - A \frac{\partial v}{\partial x} \right) |_{-h} \\ \overline{v_{ekman}} = -1/fh \left(\tau^y - A \frac{\partial u}{\partial y} \right) |_{-h} \end{cases}$$

- **U_sous_he**: qui est une extraction dynamique du courant à la base de la couche de mélangée par le vent seul (sous la profondeur dite d'Ekman). Un ordre de grandeur de la couche d'Ekman sur la Méditerranée pour cette période est au maximum de 30 m.

$$h_E = 2A/f$$

L'évaluation de ces champs se fait par inter-comparaison avec ceux disponibles et utilisés en opérationnel:

- **Clim**: Une climatologie mensuelle à 6 m. calculée à partir d'analyses Mercator-PAM (ancien système à une résolution de 1/8°), construite sur 3 ans (1998-2000)
- **MFS**: Extraction à 100 m du système opérationnel Italien pour la Méditerranée (résolution de 1/16°)
- **Wind_only**: Mothy seul, sans forçage océanique.
- **100m**: Extraction du courant Mercator PSY2V2 à la profondeur 100 m.

	PSY2V2 (ancien système)	PSY2V3 (système actuel)
Modèle d'océan	OPA 8	NEMO 1.09
Système d'Assim.	O.I	SEEK
Grille verticale	Full step	Partial step
Condition en surface	Rigid lid	Free surface
Type de forçage atmosphérique	Flux	Bulk
Schéma d'advection	Centered	T.V.D

Table 2 : caractéristiques des systèmes opérationnels utilisés

Deux systèmes Mercator sont à notre disposition : le système PSY2V2 et sa nouvelle version opérationnelle PSY2V3. Ces deux systèmes décrivent les bassins Atlantique et Méditerranéen avec une résolution de l'ordre du 12^{ème} de degré en utilisant les forçages atmosphériques journaliers de l'ECMWF (résolution de ¼ de degré). Les principales évolutions entre les deux systèmes sont visibles dans la table 2.

Expérience et protocole d'évaluation

Nous utilisons comme cas d'étude une manœuvre de dérive en conditions réelles en Méditerranée, réalisée pendant l'hiver 2007 (expérience de dérive MERSEA, Fig. 3). Six bouées dérivantes de surface, paramétrées pour reproduire le comportement d'une nappe de pétrole en mer, furent lâchées le 10 Octobre 2007 à proximité de la côte d'Azur. Les trajectoires furent échantillonnées heures par heures pendant deux mois. Au terme de l'expérience, le 06 Décembre la majeure partie des bouées se retrouve proche des Baléares, quatre sur six étant échouées. L'exploitation des données suit le protocole suivant: pour chaque simulation réalisée, on effectue des prévisions à 3 jours avec Mothy (échéance de prévision typique demandée lors d'incidents) que l'on compare ensuite à la dérive observée. Chaque position de départ pour une simulation donnée est espacée des autres de 48 hr

sur la trajectoire d'une bouée, afin de considérer chacune d'entre elles comme indépendante et de traiter ensuite les résultats de manière statistique.

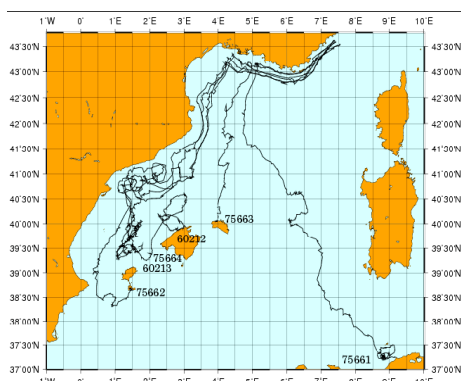


Figure 3 : récapitulatif de l'expérience de dérive Mersea 2007, Bassin occidental.

La figure 4 montre le résultat d'une même simulation réalisée avec Mothy et divers forçages océaniques extérieurs pour la première simulation (72 heures à partir de la position initiale des bouées).

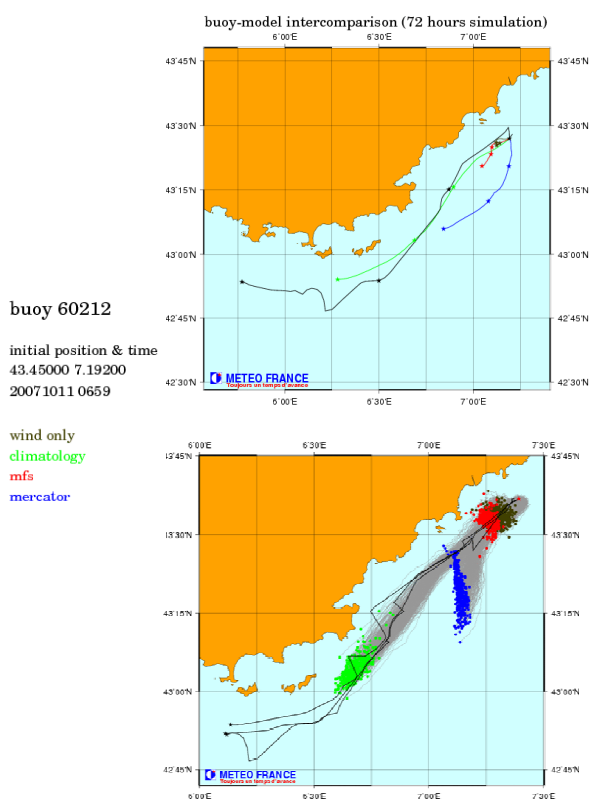


Figure 4 : illustration des protocoles de simulations et d'inter-comparaisons.

Les forçages utilisés ici sont la climatologie (en vert), le modèle Mercator PSY2V2 à 100m (en bleu), le modèle Italien MFS (en rouge) et Mothy seul (en marron).

La trajectoire du barycentre de la tête de nappe de chaque cas, associé à une couleur particulière, est visible en haut, l'observation étant tracée en noir (3 jours de simulation). La figure du bas montre la position du patch de particule modélisée à l'échéance $t = 48$ hr. On obtient alors des écarts statistiques en terme de distance, de vitesse et de direction de dérive entre le barycentre modélisé et la bouée observée. Ces scores sont calculés pour toutes les bouées et toutes les simulations confondues. Le forçage atmosphérique de Mothy retenu pour cette étude est celui de l'ECMWF (les résultats correspondants étant les meilleurs), et pour les forçages océaniques issus de modèles, uniquement les meilleures analyses sont retenues.

Résultats des champs de courants calculés avec l'ancien système (PSY2V2)

La figure 5 présente les résultats en terme de distance moyenne à l'observation, comptabilisés sur 110 simulations, en testant nos divers forçages océaniques issus du système PSY2V2 que l'on confronte à la climatologie, au modèle MFS et à l'absence de forçage. Il en ressort que si tous les forçages océaniques offrent des performances du même ordre de grandeur pour des échéances relativement courtes (à 12 heures de dérive, les résultats sont groupés autour de 10 km d'erreur de position) les écarts se creusent sensiblement pour des simulations plus longues. La climatologie donne toujours les meilleurs résultats toutes échéances confondues (score final moyen à 35 km de l'observation pour trois jours de dérive), montrant que les systèmes opérationnels utilisés ne sont pas encore suffisamment précis dans la description de la variabilité océanique et dégradent plutôt les résultats dans ce contexte. Les forçages océaniques issus du système PSY2V2 sont même moins performants qu'une utilisation de Mothy seul, mis à part l'extraction sous la couche d'Ekman, qui représente 6% d'amélioration par rapport à la précédente stratégie d'extraction à 100m.

toute l'utilité d'utiliser un forçage océanique dans les zones stables à circulation marquée, tel qu'un courant côtier, la climatologie fournissant des résultats comparables (score final de 27.85 km).

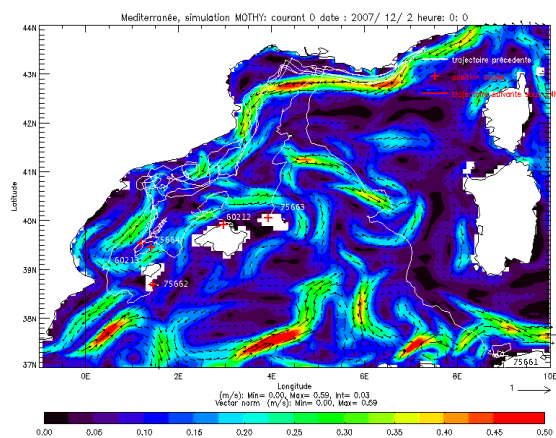


Figure 7 : trajectoire des bouées vs courant de surface PSY2V3 pour le 02/12/2007

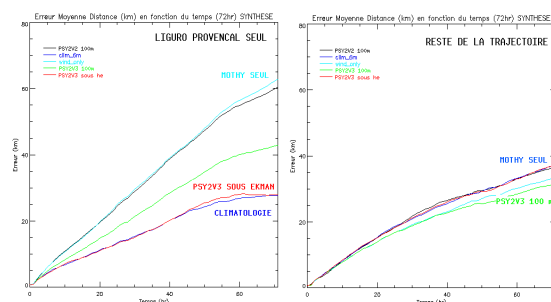


Figure 8 : statistiques (en distance) portant sur la session de dérive liée au courant ligure à gauche, et sur le reste de la trajectoire à droite.

Sur le reste de la dérive, soumise à une plus forte variabilité océanique méso-échelle, les forçages modèles sont moins efficaces (climatologies ou systèmes opérationnels). Les résultats montrent que l'on peut tout de même les utiliser au travers de courants plus en profondeur, donc moins puissants, (PSY2V3 100m : 31.19 km pour 72 hr de dérive), ce qui est légèrement mieux que ne pas utiliser de forçage du tout (Mothy seul : 33.73 km), et vraisemblablement mieux que la climatologie (36.28 km). Ceci est pour le moment un bon compromis entre des processus méso échelles mal décrits et une circulation de basse/moyenne fréquence bien représentée dans les systèmes opérationnels actuels.

Conclusion

L'expérience du couplage Mercator-Mothy a montré que le succès des résultats est fortement lié à la bonne description des processus de fines échelles spatiales et temporelles intervenants en zone turbulente. Les efforts de modélisation de l'océan pour les applications de dérive doivent donc porter sur ces gammes d'échelles dont la résolution est aujourd'hui difficile en regard des limites de l'opérationnel. Un forçage océanique saisonnier ou à plus haute fréquence peut toutefois être utilisé avec un assez bon niveau de confiance dans les zones peu variables et marquées, comme par exemple un courant côtier. Enfin, l'utilisation d'une extraction du courant sous la couche d'Ekman, scientifiquement plus rigoureuse qu'une extraction à 100 m, permet aussi une amélioration sensible des résultats de Mothy.

Perspectives

La suite du travail s'articule autour de 3 grands axes.

Le premier concerne l'aspect modélisation du courant extérieur, en analysant l'impact sur la dérive des paramètres de modélisation, des résolutions du maillage numérique et du forçage atmosphérique utilisé dans les systèmes Mercator.

Le second axe cible le mode de forçage de Mothy : évaluer la fréquence de couplage optimale entre les deux systèmes (pour l'instant journalière), ainsi que la possibilité d'utiliser de nouvelles variables océaniques dans le système (la diffusion verticale ou la température de surface pour des processus de vieillissement par exemple)

Enfin, le troisième axe étudiera la pertinence de générer des simulations d'ensemble et analysera l'impact de diverses sources d'erreur sur les performances de Mothy d'un point de vue statistique (typiquement en perturbant les forçages atmosphériques et océaniques).

Travaux en cours:

Nous proposons à terme d'utiliser des configurations imbriquées dans les systèmes opérationnels actuels pour le forçage de Mothy. Ceci permet d'utiliser une physique et une paramétrisation modèle spécifiques aux applications de dérive ainsi que de monter en résolution sur la zone d'application. Pour le moment, afin d'effectuer nos premiers tests, nous réalisons une configuration sur le bassin occidental, forcée aux frontières par le système PSY2V3, avec une résolution et des paramétrisations physiques identiques. Cette configuration ne dispose pas d'assimilation de donnée. Le modèle sera alors contraint par des redémarrages successifs (positionnés sur les jours d'assimilation, en l'occurrence une fois par semaine le mercredi) à partir du modèle opérationnel grande échelle PSY2V3. Nous testerons prochainement l'impact des modes de redémarrages sur les performances, ainsi que le forçage atmosphérique haute fréquence.

En parallèle, nous avons aussi développé une climatologie globale sur 5 ans (2001-2006) au 12^{ème} de degré à partir d'un prototype ayant des performances identiques à PSY2V3 (grille orca12), mais ne disposant pas encore d'assimilation de données. Si les premiers tests s'avèrent concluant, cette climatologie à haute résolution pourrait à terme être utilisée en opérationnel en lieu et place de la climatologie actuelle.

References:

Daniel P., Varlamov S. and Ph Dandin, 2006: Impact of operational ocean forecasting on improvement of oil spill and fate modelling in Meteo-France, Proceedings of the World Maritime Technology Conference, London UK

Hackett B., Zodiatis G., Daniel P., Broström G., 2008, Oil spill fate forecasting in the MERSEA Integrated Project, Mercator Ocean Quarterly Newsletter#29, april 2008.

Bonjean F., Lagerloeff S. E., 2002, Diagnostic Model and Analysis of the surface currents in the Tropical Pacific Ocean, Journal of Physical Oceanography, vol. 32

Jorda G, Comera E. et al, 2005, Impact of forcing errors in the CAMCAT oil spill forecasting system: a sensitive study, Journal of Marine systems, 2005