

Prévisions de dérives en mer avec Mothy

Pierre Daniel*

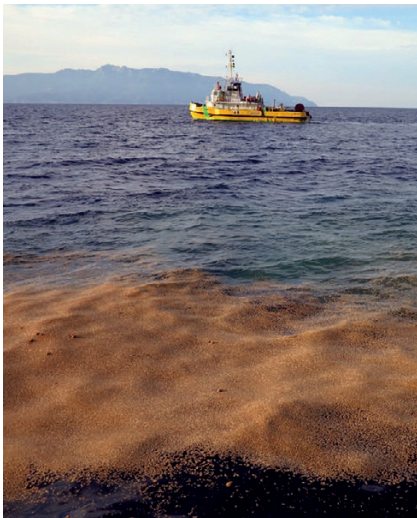
Département prévision marine et océanographique, Direction des opérations pour la prévision, Météo-France, Toulouse

Résumé

Le système Mothy, activé plus de 1 000 fois chaque année par le Centre national de prévisions de Météo-France à Toulouse, calcule la dérive en mer des polluants et des objets flottants. Il soutient les autorités dans la lutte contre les pollutions marines accidentelles et facilite les opérations de recherche et de sauvetage. Après une brève présentation de son fonctionnement, plusieurs exemples viendront illustrer la variété de situations dans lesquelles ce système est utilisé.

Abstract – Marine drift forecasts with MOTHY

Activated more than 1,000 times a year by Météo-France's National Forecast Center in Toulouse, the MOTHY system computes the drift of pollutants and floating objects at sea. It helps to assist the authorities in the fight against accidental marine pollution, and to guide search and rescue operations. After a brief presentation of how it works, several examples will illustrate the diversity of situations in which this system is used.



Essai en mer avec simulant de polluant. © Cèdre.

Météo-France opère un système de prévisions de dérive en mer, destiné à soutenir les autorités dans la lutte contre les pollutions marines accidentelles et les opérations de recherche et sauvetage. Ce système, nommé Mothy (modèle océanique de transport d'hydrocarbures), est utilisé en moyenne une vingtaine de fois par semaine pour des situations réelles de déversements d'hydrocarbures ou de missions de recherche et de sauvetage. Opérationnel à l'échelle mondiale, Mothy peut être activé à tout moment, 24 heures sur 24, par un prévisionniste marine du Centre national de prévisions de Météo-France, situé à Toulouse.

Le rôle de Météo-France en matière de dérives en mer

L'instruction du 19 juillet 2022 relative à la lutte contre la pollution du milieu marin définit les responsabilités des différents acteurs en cas d'accident maritime majeur impliquant une pollution du milieu marin. Dans ce cadre, Météo-France est chargé de mettre en œuvre, en relation avec le Cèdre¹, des prévisions de dérive de polluants et de fournir l'expertise humaine nécessaire à

leur interprétation. Dès 1996, le Cèdre et Météo-France ont mis en place une collaboration technique. Cela permet au Cèdre de disposer rapidement des prévisions météorologiques pour les zones touchées, ainsi que des cartes de dérive pour les nappes d'hydrocarbures et les conteneurs. En retour, le Cèdre contribue à l'amélioration et à la validation des modèles par ses expérimentations sur des pollutions réelles.

Pour ce qui concerne l'assistance aux opérations de recherche et sauvetage, dans le cadre d'une convention entre Météo-France et la direction des Affaires maritimes, de la Pêche et de l'Aquaculture (DGAMPA), Météo-France fournit des prévisions de dérive aux centres régionaux opérationnels de surveillance et de sauvetage (Cross). Météo-France répond également aux demandes des armées sur leurs théâtres d'opérations.

Le soutien apporté par Météo-France s'étend, conformément aux missions d'État et aux engagements internationaux de la France, à une grande partie des mers du monde. Ainsi, l'Organisation météorologique mondiale a confié à la France la coordination de la fourniture d'informations météo-océaniques, incluant les dérives, en cas d'accident

1. Centre expert en pollutions des eaux, le Cèdre conseille les autorités en charge de la réponse antipollution.

*pierre.daniel@meteo.fr

maritime, sur de vastes zones océaniques, dans le cadre du Système d'intervention d'urgence en cas de pollution de la mer (SIUPM).

Le système Mothy

Les prévisions de dérive reposent sur le système Mothy qui intègre deux composantes : un modèle océanique, conçu pour simuler le plus précisément possible le courant de surface ainsi que les courants côtiers, et un modèle de dérive.

Trois modules sont disponibles. Le premier calcule la dérive de substances à la surface de la mer, telles que les hydrocarbures ou les huiles végétales [1, 2]. Ce module peut être initialisé à partir de diverses sources : observations ponctuelles, fuites continues, déversements de navires, ainsi que des images satellitaires fournies par l'Agence européenne de sécurité maritime (AESM) via son service de surveillance CleanSeaNet. Le second est spécifiquement conçu pour calculer la dérive des conteneurs flottants [3]. Il permet aux autorités maritimes de localiser les conteneurs, d'alerter les navigateurs et d'organiser leur récupération. En effet, ces conteneurs représentent un danger pour la navigation et peuvent également constituer une source de pollution. Enfin, le troisième s'applique à une grande diversité de cibles dérivantes : personnes à la mer, radeaux de survie, objets flottants ou navires de toutes tailles, représentant 91 catégories différentes. Les données de dérive utilisées proviennent d'expérimentations menées par les garde-côtes américains, enrichies par des organismes spécialisés et les retours

d'expérience des Cross. Ce module est un outil clé dans les opérations de recherche et de sauvetage.

La performance des prévisions de dérive dépend avant tout de la qualité des données sur les vents et les courants. Ces informations proviennent des modèles de prévision atmosphérique et océanique les plus avancés. Le prévisionniste marine qui est chargé d'activer Mothy garantit l'utilisation des meilleurs forçages disponibles, adaptés à la situation météorologique et géographique. Pour l'atmosphère, les modèles Arome et Arpege de Météo-France ou le modèle IFS du Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) fournissent les données de vent. Pour l'océan, les prévisions s'appuient sur les modèles du service marin de Copernicus², comme Mercator GLO12 et MFS, ainsi que sur des systèmes régionaux tels que Schism, utilisé en Nouvelle-Calédonie.

Quelques exemples d'accidents ayant entraîné une pollution marine

Torrey Canyon en 1967

Cet accident emblématique révèle à l'Europe un risque jusque-là négligé et marque le point de départ des premières politiques de prévention et de lutte contre les marées noires en France, au Royaume-Uni et à l'échelle européenne. Le 18 mars 1967, le pétrolier *Torrey Canyon*, transportant 121 000 tonnes de

pétrole brut, s'échoue entre les îles Scilly et la côte britannique. Pendant trois semaines, plusieurs nappes d'hydrocarbures dérivent dans la Manche, touchant d'abord les côtes de Guernesey, puis celles des Côtes-d'Armor en France.

Cette dérive, principalement influencée par des conditions de vent et de marée fluctuantes, a offert une occasion précieuse de calibrer le système Mothy, en ajustant notamment les paramètres de dérive liés à la flottabilité, au vent de surface et aux courants marins (figure 1) [1].

Erika en 1999

C'est le premier accident de pollution maritime majeur auquel le système Mothy a été confronté. Le 12 décembre 1999, le pétrolier *Erika*, transportant 31 000 tonnes de fioul lourd, se brise en deux à environ 30 milles au sud de la pointe de Penmarc'h (Finistère Sud). La quantité de fioul déversée lors du naufrage est estimée entre 7 000 et 10 000 tonnes. La proue du navire sombre durant la nuit du 12 au 13 décembre, près du lieu de la rupture. La poupe, quant à elle, est remorquée par le navire *Abeille Flandre* pour éviter qu'elle ne dérive vers Belle-Île, mais coule l'après-midi du 13 décembre.

Plusieurs modèles de prévision de dérive des nappes sont alors activés (figure 2), mais dès le 14 décembre, il apparaît clairement que la prévision de Météo-France est la plus précise. Le système Mothy est alors activé quotidiennement, alimenté par des observations aériennes, jusqu'à l'arrivée des nappes principales sur le littoral de la

2. <https://marine.copernicus.eu/fr>

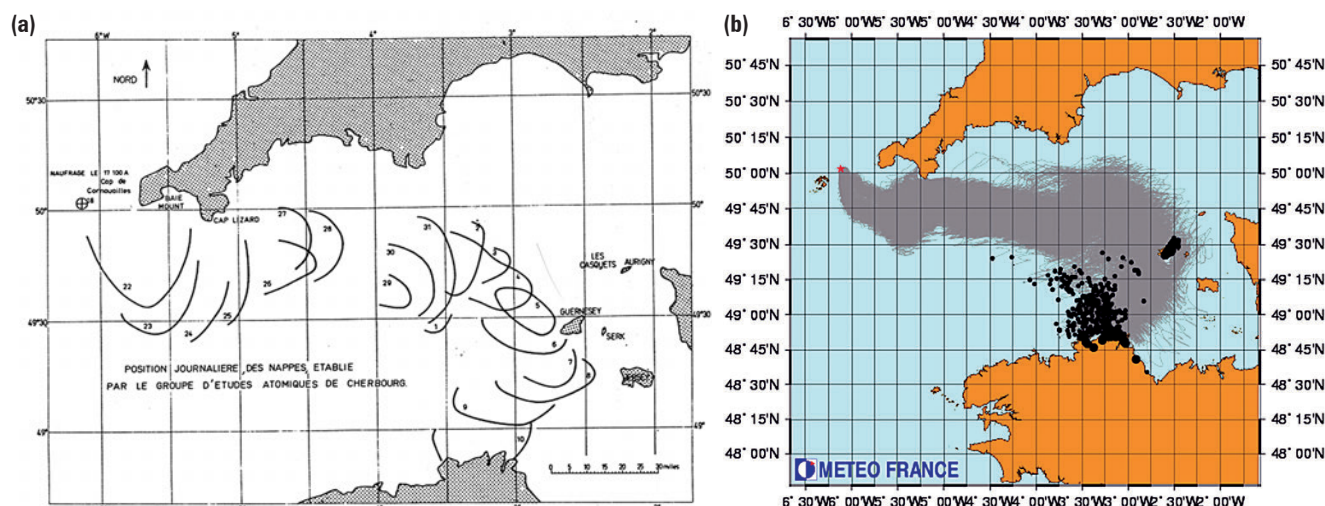


Figure 1. (a) Observations de la dérive des nappes issues de l'accident du *Torrey Canyon*, © Marine nationale ; (b) Prévisions de la dérive des nappes par le système Mothy. Voir une animation en <http://www.meteorologie.eu.org/mothy/torrey.html>

Loire-Atlantique, avec une anticipation fiable de deux jours. Cet accident a mis en lumière le rôle crucial de l'observation, soulignant qu'une partie de la pollution échappe souvent à la détection dans ce type de catastrophe. Par exemple, les premières nappes atteignant la côte près de la pointe de Penmarc'h n'ont pas pu être anticipées, faute d'observations du fioul libéré avant la rupture du navire, ainsi que du fioul remontant des épaves au fond de la mer [4].

Lykes Liberator en 2002

Les pertes de conteneurs sont courantes en hiver, notamment lors de conditions météorologiques difficiles. Le 2 février 2002, le porte-conteneurs *Lykes Liberator*, transportant 3 000 conteneurs, signale en avoir perdu 60 au cours d'une tempête, à environ 120 milles à l'ouest de l'île de Sein. Parmi eux, un conteneur attire particulièrement l'attention : il renferme des produits classés comme dangereux. Ce conteneur, un modèle ouvert (une structure métallique sans toit ni parois), contient trois citernes de produits chimiques (figure 3a). Ces substances posent un risque sérieux, car elles sont réputées hydro-réactives, capables de s'enflammer spontanément au contact de l'eau et de provoquer de graves brûlures.

Le même jour, un avion de surveillance de la Marine nationale repère une citerne jaune flottant dans la zone signalée par le *Lykes Liberator*. Cette observation est confirmée le lendemain, mais par la suite les citernes disparaissent. Pour anticiper leur trajectoire, une prévision

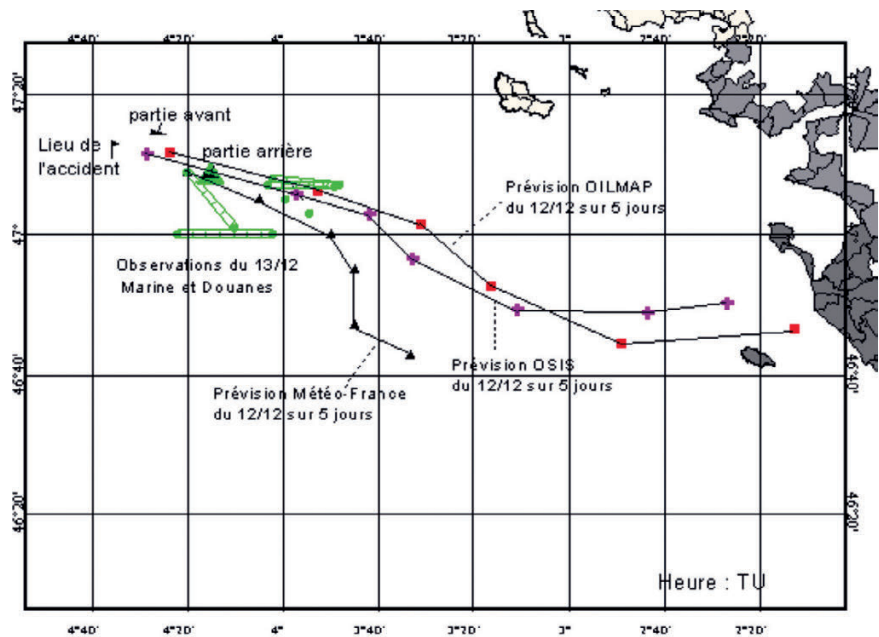


Figure 2. Premières prévisions de dérive à la suite du naufrage de l'*Erika*, illustrant les différences entre modèles. Les observations sont en vert. © Cedre. Voir une animation en http://www.meteorologie.eu.org/moathy/erika_anim.html

de dérive est réalisée à l'aide du système Mothy. Les calculs prévoient qu'elles atteindront le rail d'Ouessant dans les cinq jours (figure 3b).

Le 8 février, une citerne est effectivement repérée à proximité du rail d'Ouessant et, deux jours plus tard, toutes les citernes sont récupérées avec succès, écartant ainsi le danger qu'elles représentaient.

Prestige en 2002

Le 13 novembre 2002, le pétrolier *Prestige* subit une avarie au large des côtes de Galice. Bien que les efforts de sauvetage réussissent à éviter que le

navire ne s'échoue, ils ne parviennent pas à empêcher sa rupture en deux (figure 4) et son naufrage à plus de 3 000 mètres de profondeur. Le fioul libéré par l'épave pollue les côtes de Galice, puis dérive dans le golfe de Gascogne en direction des côtes françaises [5].

Appliquant les leçons tirées de l'accident de l'*Erika*, des simulations de dérive du fioul échappé de l'épave sont mises en place pour détecter d'éventuelles nappes non observées. Cette méthode se révélera efficace pour permettre de localiser d'importantes quantités d'hydrocarbures dans une zone non identifiée initialement.

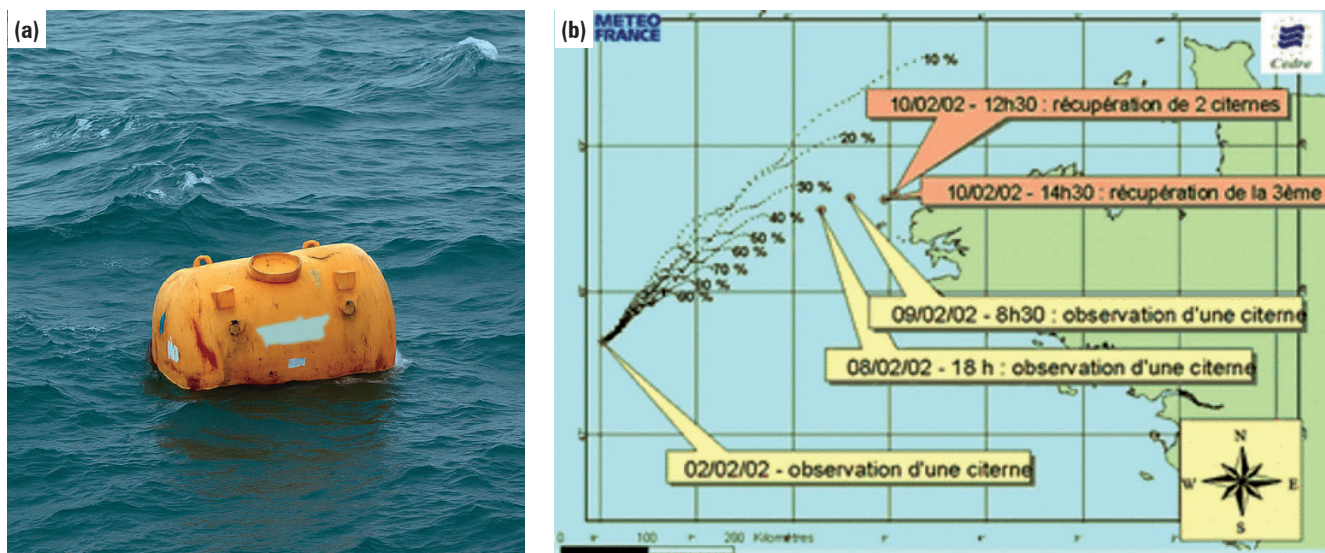


Figure 3. (a) Citerne à la dérive, © Cedre. (b) Prévision de dérive des citernes en fonction de leur pourcentage d'immersion, jusqu'au 7 février et lieux de récupération des citernes.

Dès les premiers jours de l'accident, un groupe de travail réunissant Météo-France, la Marine nationale et le Cedre est formé pour anticiper la dérive des nappes et coordonner la réponse. Il évolue rapidement en un comité technique, coordonné par le Cedre et incluant le Shom et l'Ifremer, fournissant quotidiennement des prévisions au préfet maritime. Travaillant en lien avec les experts espagnols et portugais, ce comité produit des cartes de dérive jusqu'au 23 mars. Cette organisation sera pérennisée avec la création du Comité de dérive (Coder), officialisée dans l'instruction Polmar.

L'accident du *Prestige* a constitué la première occasion de mobiliser de nouveaux systèmes océanographiques pré-opérationnels, tels que le système britannique Foam et le système français Mercator. Ces outils ont démontré leur utilité en améliorant la précision des calculs de dérive le long des côtes espagnoles. C'est dans ce contexte que les premières méthodes d'intégration de ces courants dans le modèle Mothy ont été développées.

Ulysse et CSL Virginia en 2018

Le 7 octobre 2018, le navire roulier *Ulysse* entre en collision avec le porte-conteneurs *CSL Virginia* au nord de la Corse (figure 5a). En raison de conditions météorologiques défavorables, le fioul de soute déversé ne peut être entièrement récupéré par les navires antipollution français et italiens. Le 16 octobre 2018, des



Figure 4. Le naufrage du *Prestige*. © BSAM/Douanes françaises.

boulettes et galettes de fioul très visqueuses atteignent les plages de la côte d'Azur. Les dates et lieux d'échouement des principales nappes ont été précisément prévus par le modèle de dérive Mothy, combiné aux courants du système MFS (Mediterranean Forecasting System)³ (figure 5b) [6].

Cet incident souligne l'importance du choix des courants pour calculer les dérives, renforçant ainsi la confiance dans le modèle océanographique italien MFS pour la Méditerranée. Dans le cadre d'un programme d'intercomparaison de modèles de dérive⁴, Mothy, associé aux courants MFS, s'est distingué parmi plusieurs modèles étrangers en étant le seul à prévoir l'arrivée des nappes sur la presqu'île de Saint-Tropez [7].

Grande America en 2019

Le 10 mars 2019, un incendie se déclare à bord du navire de commerce *Grande America*. L'incendie devient incontrôlable et l'équipage doit abandonner le navire. Il sombre le 12 mars, à 4 600 mètres de profondeur, à 350 km des côtes de la Charente-Maritime, emportant avec lui environ 2 200 tonnes de fioul de propulsion, 365 conteneurs et 2 000 véhicules.

3. <http://medforecast.bo.ingv.it/>

4. Programme d'intercomparaison piloté par le Cedre visant à évaluer les performances des modèles de dérive pour pouvoir répondre plus efficacement en cas de crise. À partir de cas emblématiques ou d'exercices avec lâchers de bouées, les résultats des différents outils, partagés entre Météo-France, Shom, Ifremer, le Cedre et certains partenaires étrangers, font l'objet de comparaisons quantitatives.

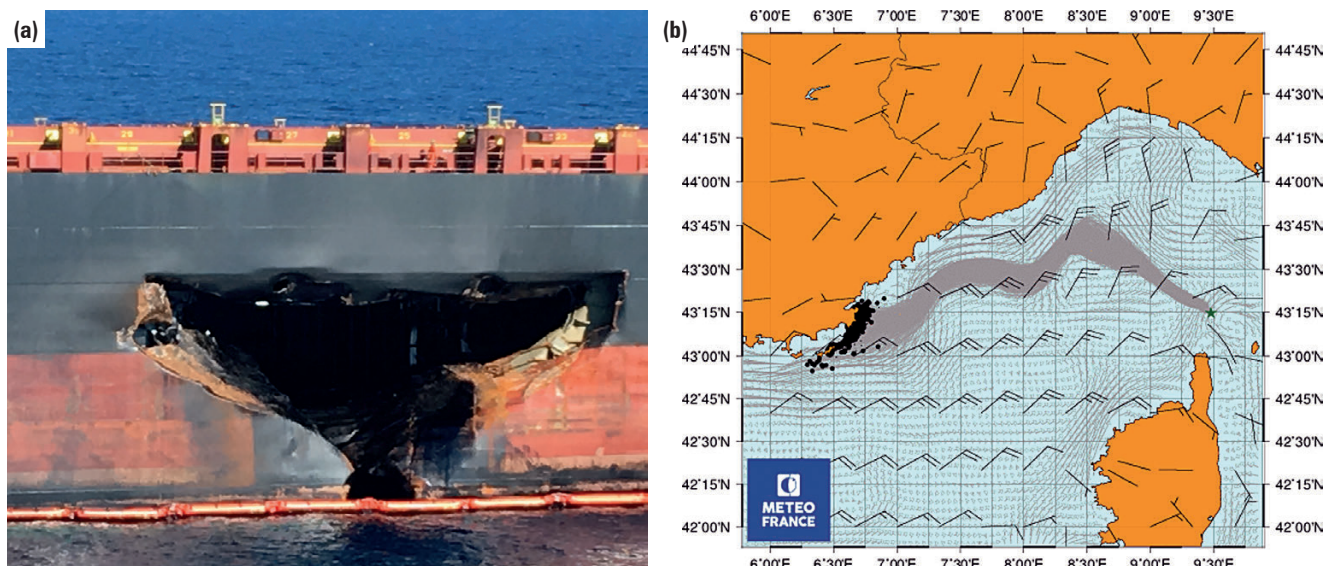


Figure 5. (a) Brèche dans la coque du porte-conteneurs *Virginia*. © Cedre. (b) Prévision de dérive d'hydrocarbures sur 10 jours depuis le lieu de l'accident (étoile verte, à droite) jusqu'à la presqu'île de Saint-Tropez.

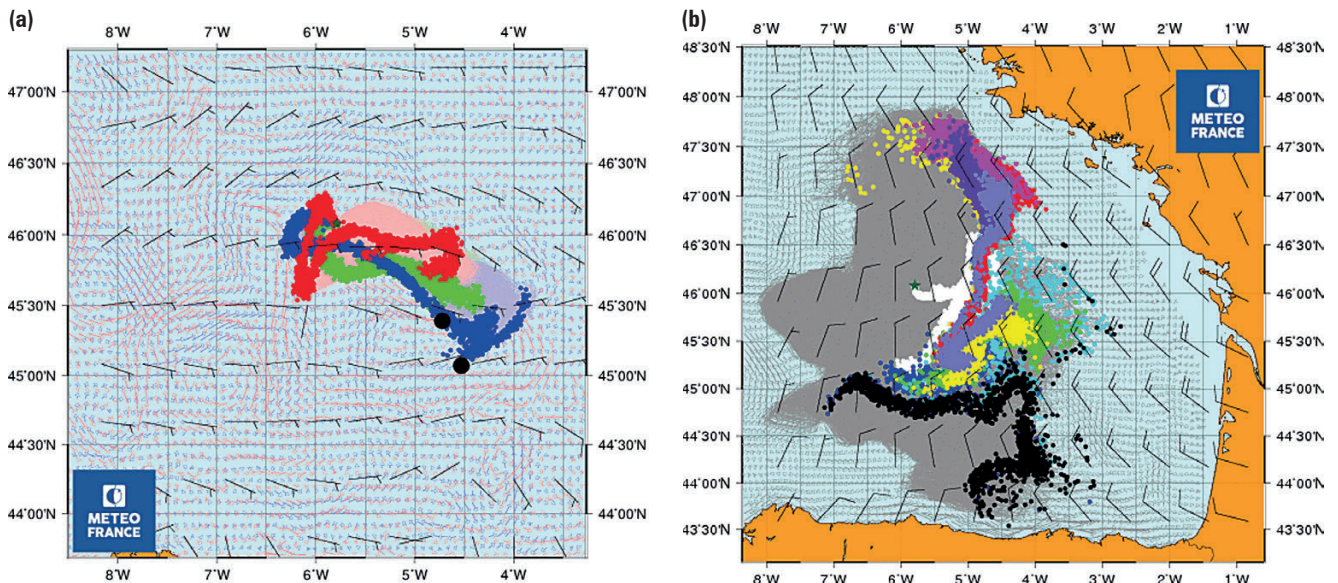


Figure 6. (a) Fuite simulée sur 10 jours à partir de l'épave du *Grande America* (étoile verte près de 46° N-6° W). Les points noirs sont des observations aériennes. Dérive des particules : en vert, sans données sur les courants océaniques ; en rouge, en utilisant les données sur les courants océaniques du système opérationnel d'analyse et de prévision océaniques IBI à 1/36° ; en bleu, en utilisant les données sur les courants océaniques du système opérationnel d'analyse et de prévision océaniques globales Mercator à 1/12°. (b) Fuite simulée sur 2 mois de l'épave du *Grande America* (étoile verte près de 46° N-6° W). Les points noirs correspondent aux hydrocarbures rejetés le jour de l'accident. Les points de couleur représentent les hydrocarbures rejetés pendant les 35 jours de fuite continue de l'épave. Les points blancs représentent un risque potentiel après le colmatage des fuites. En gris, les trajectoires où le pétrole a été présent pendant les 2 mois.

Dès le 14 mars, le Coder se réunit pour analyser les observations et les prévisions de dérive des nappes. Ce comité joue un rôle essentiel dans l'identification des combinaisons optimales de forçages océaniques à intégrer dans Mothy. Contre toute attente, un modèle océanique à haute résolution spatiale se révèle moins efficace qu'un modèle de résolution inférieure (figure 6a), soulignant ainsi l'importance du Coder pour guider les choix les plus pertinents.

Météo-France produira quotidiennement des prévisions déterministes à trois jours concernant la dérive des nappes de fioul et des conteneurs, facilitant ainsi la récupération des matières polluantes par les navires sur place. Des prévisions probabilistes à dix jours permettront d'éviter de mobiliser du matériel à terre, prévoyant qu'aucun arrivage sur la côte n'aura lieu pendant les 15 jours de lutte en mer. Enfin, le calcul de la dérive d'une fuite continue de l'épave (figure 6b) orientera les recherches aériennes pour ne pas négliger d'éventuels hydrocarbures⁵. Bien que la majorité des matières polluantes ait été récupérée par les navires spécialisés, quelques boulettes résiduelles ont été observées sur les côtes six mois plus tard [6].

Wakashio en 2020

Le 25 juillet 2020, le *Wakashio* heurte un récif et s'échoue au large de la pointe d'Esny, sur la côte sud-est de l'île Maurice. Le 6 août au matin, du



Figure 7. La partie arrière du *Wakashio* échouée sur le récif. © Cedre.

pétrole commence à fuir d'un réservoir de carburant endommagé. Malgré les opérations de pompage mises en place, l'arrivée du pétrole sur les côtes mauriciennes ne peut être évitée.

Face à cette situation critique, les autorités mauriciennes sollicitent l'assistance de la France. Le préfet de La Réunion, responsable de la zone de défense du sud de l'océan Indien et délégué du gouvernement pour l'action de l'État en mer, décide d'activer une cellule de crise. Météo-France est alors impliqué pour prévoir la dérive du pétrole dans le lagon de l'île Maurice et évaluer les risques pour l'île de La Réunion.

Le 12 août, la majeure partie du fioul est pompée de l'épave et le nettoyage des côtes commence grâce à l'implication de nombreux bénévoles locaux. Le 15 août, le *Wakashio* se brise en deux

lors d'une tentative de remorquage (figure 7). Les prévisions de dérive incluent désormais les débris du navire. Le 17, la partie avant du navire est remorquée vers le large, tandis que les autorités mauriciennes réfléchissent à l'endroit où la couler. Météo-France établit alors des prévisions de dérive pour plusieurs positions géographiques afin de déterminer les lieux susceptibles de présenter un risque de pollution pour l'île de La Réunion. Suite à cette analyse, le lieu d'immersion est déplacé vers le nord. La proue est coulée le 24 août, la poupe reste sur place et sera démontée par la suite. Aucune pollution n'a touché les côtes de l'île de La Réunion. La pollution qui a touché l'île Maurice est estimée entre 600 et 1 000 tonnes [8].

5. <http://www.meteorologie.eu.org/mothy/grande-america.html>

Les sargasses

Depuis mars 2019, Météo-France a mis en place un système opérationnel pour la surveillance et la détection des bancs de sargasses⁶ dans la région Antilles-Guyane, dans le cadre d'une convention avec le ministère de la Transition écologique. Plusieurs services de Météo-France collaborent activement à cette initiative.

À Lannion, le Centre d'études en météorologie satellitaire développe et met au point des algorithmes de détection des sargasses à partir de données satellitaires (figure 8a) et le Centre de météorologie spatiale fournit les données d'initialisation au système Mothy. Les prévisions de dérive, jusqu'à 4 jours, sont réalisées quotidiennement par le département de prévision marine et océanographique à Toulouse (figure 8b). Ensuite, les équipes des services de prévision et de production de la Direction interrégionale Antilles-Guyane élaborent des cartes de risque d'échouement (figure 8c) et des bulletins spécialisés destinés au public et aux autorités locales.

Aujourd'hui, c'est le module hydrocarbures qui est utilisé pour les calculs de dérive, car il permet une simulation réaliste de la trajectoire de particules passives flottant dans la couche de surface. En prenant un polluant de densité proche de celle de l'eau de mer, on confine les calculs de dérive dans les premiers mètres sous la surface, mimant ainsi le comportement des algues sargasses. Le module conteneur a également été testé, considérant les bancs de sargasses comme des blocs compacts affleurant sous la surface de l'eau. De nouvelles observations de dérive issues de campagnes de mesures sont attendues pour affiner ces choix.

En effet, la principale contrainte actuelle réside dans le manque de

données de terrain nécessaires à la validation des dérives. Cette préoccupation est partagée par les équipes internationales travaillant sur le sujet. C'est pourquoi le ministère de tutelle de Météo-France a apporté son soutien à la mise en œuvre d'une campagne de mesures de terrain en Guadeloupe au printemps 2025. Cette campagne, unique en son genre à ce jour, devrait permettre à Météo-France et à l'État de renforcer leur capacité dans ce domaine de la prévision des sargasses.

Assistance aux opérations de recherche et de sauvetage

Principe de calcul des dérives

Les calculs de dérive pour les personnes, les engins de plage, les radeaux ou les navires suivent une méthode bien définie. Lorsque ces objets dérivent à la surface de la mer, leur déplacement est influencé par plusieurs forces : courants, vent, vagues et flottabilité. Pour estimer leur trajectoire, il est essentiel de prendre en compte les données sur le vent local, les courants de surface ainsi que la forme et les propriétés de flottabilité de l'objet.

En raison de l'asymétrie inhérente à la majorité des objets flottants, ceux-ci dérivent en formant un certain angle par rapport au vent. Ainsi, on peut décomposer le vecteur de la vitesse de dérive en deux composantes : une composante sous le vent, DWL, *downwind leeway*, et une composante perpendiculaire au vent, CWL, *crosswind leeway* (figure 9a).

Ce concept repose sur une approche empirique, compte tenu de la complexité de déterminer précisément la force nette agissant sur un objet dérivant. La diversité des objets (taille, forme) ajoute encore à la difficulté. Les études empiriques sur des objets réels sont donc jusqu'à présent la méthode la plus fiable.

Cette méthode a été développée par Art Allen [9], du service des garde-côtes américains, qui a compilé des résultats d'expérimentations en mer pour comprendre comment différentes classes d'objets réagissent au vent. Les composantes DWL et CWL pour chaque classe d'objet sont déterminées grâce à des régressions linéaires basées sur la vitesse du vent. Les écarts types des coefficients DWL et CWL sont représentés par des « barres d'erreur », indiquant l'incertitude associée aux propriétés de dérive.

L'orientation initiale de l'objet par rapport au vent entraîne une dérive à droite ou à gauche de la direction du vent, avec une probabilité équivalente. Comme l'orientation initiale est souvent inconnue, les prévisions doivent tenir compte de ces deux possibilités. Ces deux positions ne sont pas stables, car l'objet peut changer d'amure⁷ sous l'effet des conditions environnementales, principalement des vagues.

En pratique, on simule la dérive de plusieurs milliers d'objets dont les caractéristiques suivent une distribution statistique, ce qui permet d'associer une probabilité aux prévisions de dérive. L'orientation initiale de l'objet détermine la dérive à droite ou à gauche du vent. Les résultats sont présentés sous forme de cartes montrant deux

6. Les sargasses sont des algues brunes flottantes dont les échouages massifs sur les côtes provoquent des nuisances environnementales, sanitaires et économiques.

7. Position du bateau par rapport au vent.

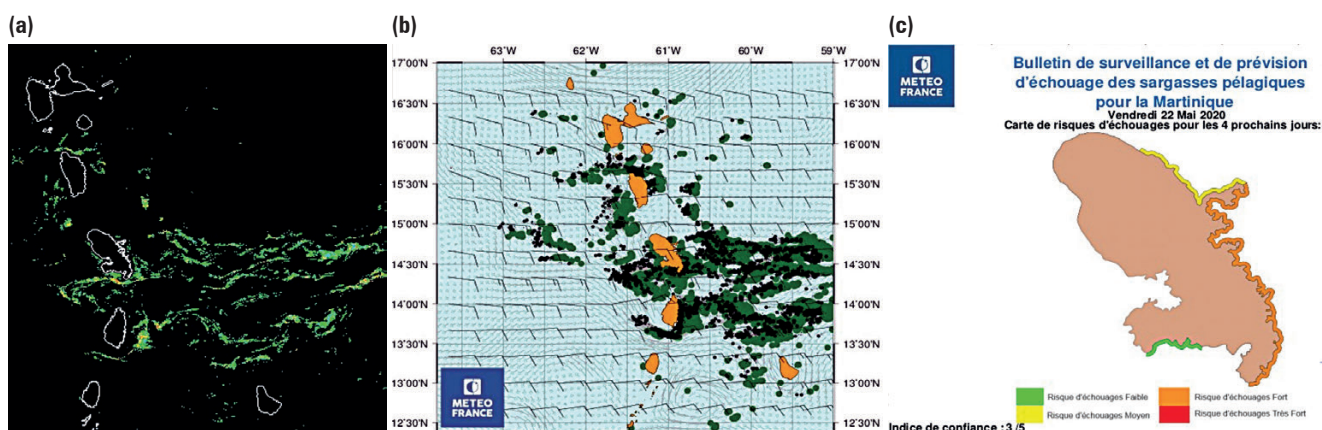


Figure 8. Les trois étapes de la chaîne de surveillance et de prévision de dérive des sargasses : (a) télédétection par satellite, basée sur la couleur de l'eau ; (b) prévision de dérive à 4 jours avec Mothy ; (c) bulletin et carte de risque d'échouement.

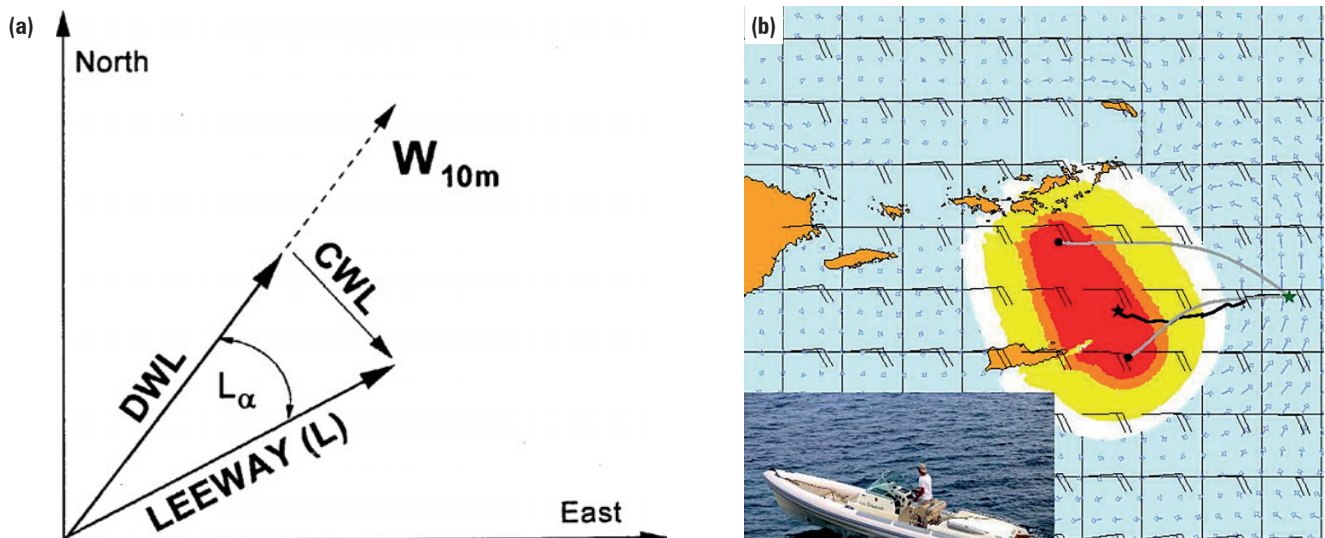


Figure 9. (a) Relation entre le vecteur vitesse de la dérive (L) et le vecteur vitesse du vent (W_{10m}) avec DWL composante de la dérive sous le vent, CWL composante de la dérive travers au vent et L_α angle de la dérive par rapport au vent. (b) Dérive d'un bateau semi-rigide en mer des Caraïbes. Les deux trajectoires en gris représentent les simulations de dérive à gauche et à droite du vent sans changement d'amure. Les zones de recherche, avec changement d'amure, sont colorées, avec en rouge la zone de plus forte probabilité. La trajectoire en noir est la trajectoire réelle du navire.

trajectoires qui prennent en compte l'incertitude sur l'orientation initiale, sans changement d'amure. L'incertitude sur la dérive liée aux caractéristiques de l'objet, à l'environnement et au changement d'amure est représentée par des points de couleur en fonction de leur probabilité de réalisation (figure 9b).

Chalutier *Tommy Evan* en 2018

Dans la nuit du 2 au 3 août 2018, alors qu'il rentre d'une campagne de pêche au concombre de mer, le navire *Tommy Evan* est abandonné par son équipage à 35 milles au sud de Saint-Pierre-et-Miquelon. Le bateau gîte dangereusement, obligeant les marins à se réfugier dans un canot de sauvetage. Ils seront

secourus par un hélicoptère des forces armées canadiennes, avant que le navire ne se retourne complètement (figure 10a). La coque sera retrouvée, toujours flottante, au large des côtes de Terre-Neuve. Le système Mothy reproduit bien cette dérive vers les côtes canadiennes (figure 10b).

Sauvetage de Kevin Escoffier en 2020

Le 30 novembre 2020, le Cross Gris-Nez reçoit un appel de la balise de détresse du PRB qui est alors engagé dans la course du Vendée Globe et se trouve au large de l'Afrique du Sud. Le skipper, Kevin Escoffier, est rapidement retrouvé par Jean Le Cam, qui se trouvait à proximité. Cependant, à mesure que la nuit tombe, Kevin disparaît

de nouveau. Le Cross Gris-Nez déclenche alors l'activation de Mothy, en sélectionnant le type de radeau adapté parmi une trentaine de modèles disponibles.

Des prévisions de dérive du radeau sont réalisées pour les 12 heures suivantes à partir de la dernière position connue. Ces prévisions s'avèrent d'une grande utilité, comme l'explique le directeur de course Jacques Caraës : « Météo-France a mis à notre disposition le modèle Mothy pour prévoir l'endroit où se trouverait le canot de Kevin 2, 6, 9 et 12 heures après le déclenchement de sa balise de détresse. C'est ce qui nous a permis d'optimiser l'envoi de bateaux sur zone et ainsi de gagner un temps précieux dans la recherche. » Kevin Escoffier sera récupéré par Jean le Cam avant la fin de la nuit.

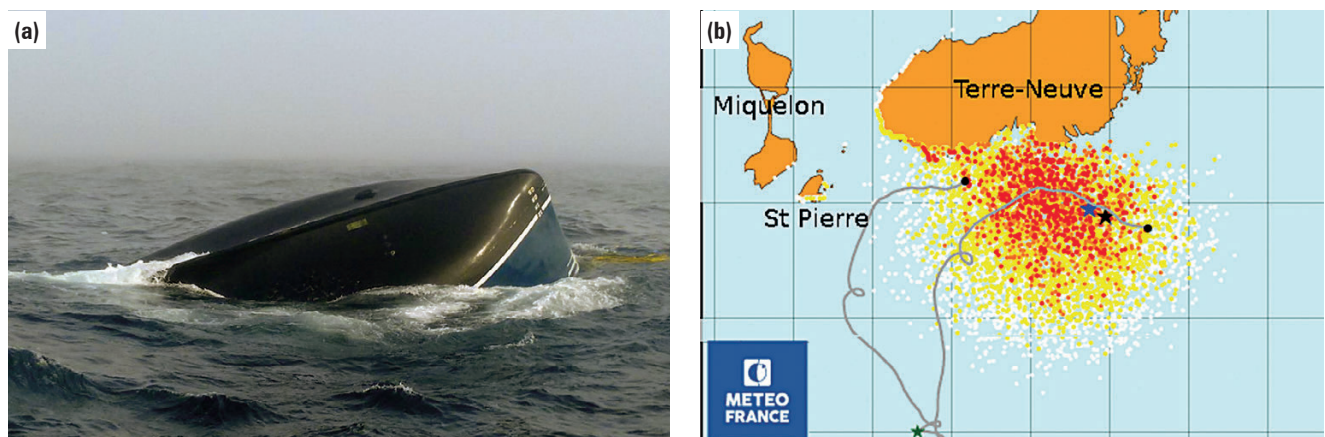


Figure 10. (a) La coque retournée du *Tommy Evan* peu après l'évacuation de son équipage le 3 août 2018 (étoile verte). © SNSM Saint-Pierre-et-Miquelon. (b) Simulation de dérive de la coque retournée. Les deux trajectoires en gris représentent les simulations de dérive à gauche et à droite du vent sans changement d'amure. Les zones de recherche, avec changement d'amure, sont colorées, avec en rouge la zone de plus forte probabilité. L'étoile bleue représente la position de la coque repérée par un navire canadien, le 12 août. L'étoile noire, la position où elle est retrouvée par la SNSM, le 13 août.

Recherche d'épaves d'avion

Dans la nuit du 1^{er} juin 2009, le vol Air France Rio-Paris (AF447) disparaît mystérieusement dans l'océan Atlantique tropical. Les premiers débris sont retrouvés cinq jours après l'accident (figure 11). Afin de déterminer la position probable de l'épave, des calculs de dérive inverse sont alors menés. Toutefois, la zone est peu observée et les performances des analyses opérationnelles de l'océan disponibles dans la région ne permettent pas de fournir des courants suffisamment réalistes pour retrouver l'épave rapidement [10]. Il faudra deux ans avant que l'épave ne soit enfin localisée.

Le 29 juillet 2015, le flaperon⁸ d'un Boeing 777 est retrouvé échoué sur une plage de La Réunion. Il s'agit d'un morceau de l'avion de la compagnie Malaysia Airlines, disparu 17 mois plus tôt (vol MH370). Une réquisition judiciaire est alors adressée pour effectuer un calcul de dérive à rebours pour retrouver l'épave. Compte tenu de la durée de retro-dérive sur 17 mois, la zone probable de localisation de l'épave est extrêmement vaste. Elle inclut les zones où des recherches seront effectuées au large de l'Australie.

Le 19 mai 2016, un Airbus A320 effectuant le vol EgyptAir 804 entre Paris et Le Caire s'écrase en mer Méditerranée. Des retro-dérives de débris et de nappes de kérosène permettent de retrouver l'épave quelques jours plus tard.

Recherche d'épaves de navire

En janvier 1962, le chalutier *Ravenel* (figure 12a) disparaît au large de Saint-Pierre-et-Miquelon avec 15 personnes à bord. Pour tenter de localiser l'accident et retrouver l'épave du bateau, des calculs de retro-dérive sont effectués à partir des débris découverts sur les côtes de Terre-Neuve quelques



Figure 11. Débris de l'avion d'Air France du vol AF447. © Marinha do Brasil.

jours après l'accident (figure 12b). Malheureusement, en raison de l'étendue de la zone de recherche, des incertitudes concernant les heures d'arrivée des débris sur la côte et des conditions météo-océaniques de janvier 1962, les recherches menées alors n'ont pas permis de retrouver l'épave dans la zone initialement définie.

Elle a finalement été retrouvée le 28 mai 2025. Des calculs de dérive ultérieurs ont permis de préciser la date et l'heure du naufrage, plus tardif que ce qui avait été initialement envisagé.

Fuite des épaves

La corrosion marine dégrade les épaves, qui peuvent alors libérer du carburant et d'autres hydrocarbures présents dans leur soute. Ce processus

peut prendre des dizaines d'années. Dans les eaux françaises, tant en métropole qu'en Outre-mer, le Cedre a identifié 250 épaves, dont 61 présentent un risque de pollution. Parmi celles-ci, l'épave du pétrolier *Tanio* a récemment suscité l'attention. Le 7 mars 1980, il se brise en deux à 25 milles au nord de l'île de Batz (Finistère). Environ 10 000 tonnes de pétrole se déversent en mer, contaminant 200 kilomètres de littoral. La partie arrière, contenant 7 500 tonnes de pétrole, est remorquée jusqu'au Havre, tandis que la partie avant sombre avec 10 000 autres tonnes à environ 80 mètres de profondeur. Au total, 5 100 tonnes de pétrole seront récupérées par la Comex, tandis que des réparations seront effectuées pour colmater les brèches.

8. Surface mobile d'aile utilisée pour le contrôle et la portance de l'avion.

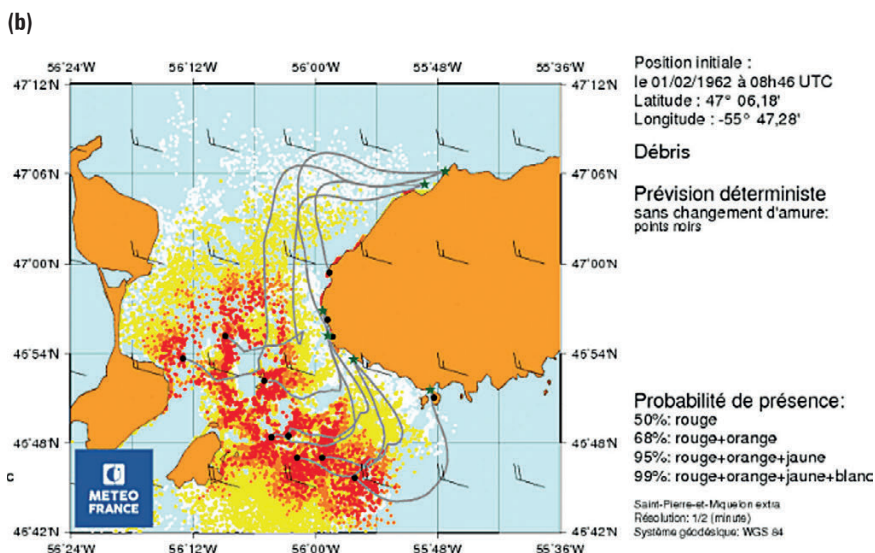


Figure 12. (a) Le chalutier *Ravenel*. © Studio Briand. (b) Rétro-dérives à partir des débris échoués sur les côtes de Terre-Neuve. Les trajectoires en gris représentent les simulations de dérive à gauche et à droite du vent sans changement d'amure. Les zones de recherche, avec changement d'amure, sont colorées, avec en rouge la zone de plus forte probabilité.

Près de 40 ans après son naufrage, en 2019, des oiseaux présentant des traces d'hydrocarbures sont retrouvés sur plusieurs plages du Finistère Nord. Les premières analyses du Cedre révèlent de grandes similitudes avec les hydrocarbures transportés par le *Tanio*. Des investigations sur l'épave sont alors menées par le Centre expert plongée humaine et intervention sous la mer de la Marine nationale, qui constate des fuites intermittentes d'hydrocarbures. Des plaques obturatrices magnétiques sont posées par la Marine nationale sur dix orifices identifiés. Ce dispositif, qui nécessite des vérifications et des compléments réguliers, ne permet pas d'exclure totalement de nouvelles fuites.

Le système Mothy a été utilisé pour identifier les zones côtières susceptibles d'être impactées par ce type de fuite (figure 13). Pour établir des statistiques et tenir compte de toutes les conditions météorologiques, une simulation de fuite continue sur 30 ans, de 1991 à 2020, a été réalisée, permettant d'identifier les zones les plus à risque⁹.

Les cétacés

L'observatoire Pelagis fournit un appui scientifique aux politiques publiques de conservation des mammifères marins. L'augmentation des échouages ces dernières années interpelle la société civile. Pelagis, qui coordonne le Réseau national échouages, cherche à répondre à cette problématique complexe.

Nos premiers travaux avec Pelagis portaient sur la flottabilité des dauphins morts dans l'eau de mer. Nous en avons tiré des enseignements, par similitude, sur la flottabilité des corps humains. Le système Mothy a ensuite été adapté à la dérive de carcasses de dauphin. Il permet de reconstruire les trajectoires en mer des animaux échoués, en fonction des conditions météo-océaniques observées (figure 14). La durée de dérive des animaux échoués est estimée à partir des marques externes de décomposition. Cela permet une évaluation de la mortalité par capture dans un engin de pêche en identifiant les techniques de pêche les plus impactantes [11].

Aujourd'hui, le système Mothy est devenu une référence dans ce domaine. Initialement utilisé dans le golfe de Gascogne, il a progressivement été étendu de l'Espagne aux îles Britanniques [12].

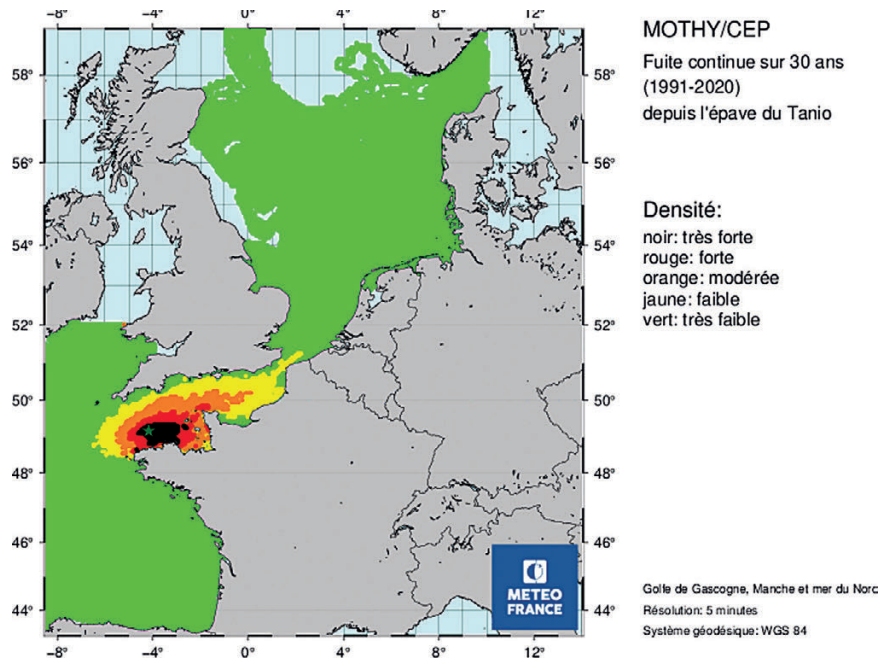


Figure 13. Zones les plus susceptibles d'être impactées en cas de fuite d'hydrocarbures de l'épave du *Tanio* (étoile).

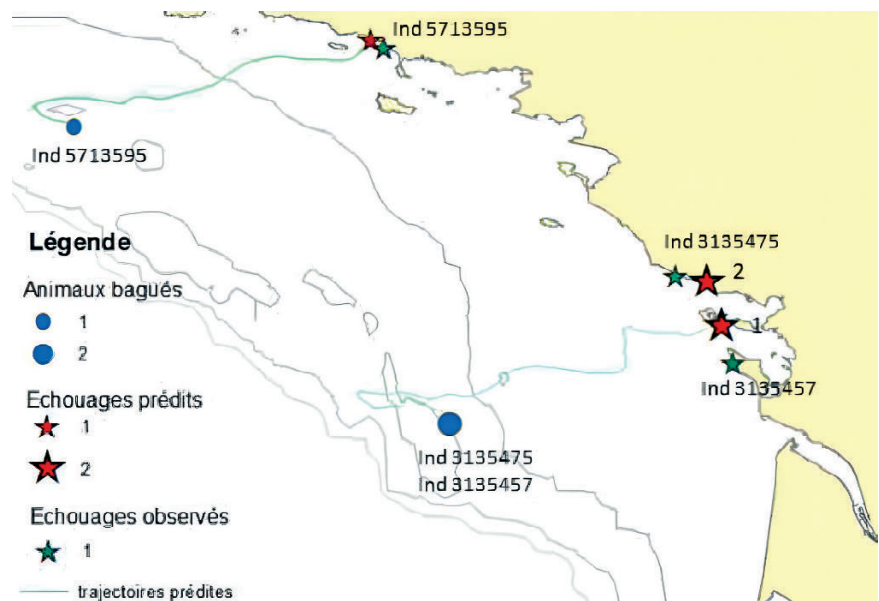


Figure 14. Dauphins bagués remis à l'eau à bord des bateaux de pêche (cercles bleus), ainsi que leurs trajectoires (lignes vertes) et sites d'échouages prévus par Mothy (étoiles rouges), ainsi que les sites d'échouages des animaux retrouvés (étoiles vertes). © Observatoire Pelagis.

Le Polar Pod

Le *Polar Pod* (figure 15a) est un projet de plateforme habitée, initié et dirigé par Jean-Louis Étienne, destiné à explorer l'océan Austral qui entoure l'Antarctique. Conçu pour dériver dans le courant circumpolaire antarctique, le *Polar Pod* sera remorqué depuis Port Elizabeth en Afrique du Sud jusqu'à son point de départ dans ce courant, avant de s'y laisser dériver autour de l'Antarctique.

Ce projet doit relever plusieurs défis importants. Il est essentiel de choisir la bonne latitude pour éviter de se

retrouver coincé dans l'océan Indien en partant trop au nord ou d'être confronté aux glaces de l'Antarctique en partant trop au sud. Par ailleurs, il est crucial d'évaluer la durée nécessaire pour effectuer le tour complet de l'Antarctique.

Pour répondre à ces enjeux, le système Mothy a été mis en œuvre (figure 15b), offrant des simulations et des analyses pour guider le projet dans ses choix stratégiques¹⁰.

9. Une animation est visible en <http://www.meteorologie.eu.org/mothy/fuites-epaves/tanio/>

10. Une animation est visible en <http://www.meteorologie.eu.org/mothy/polarpod/>

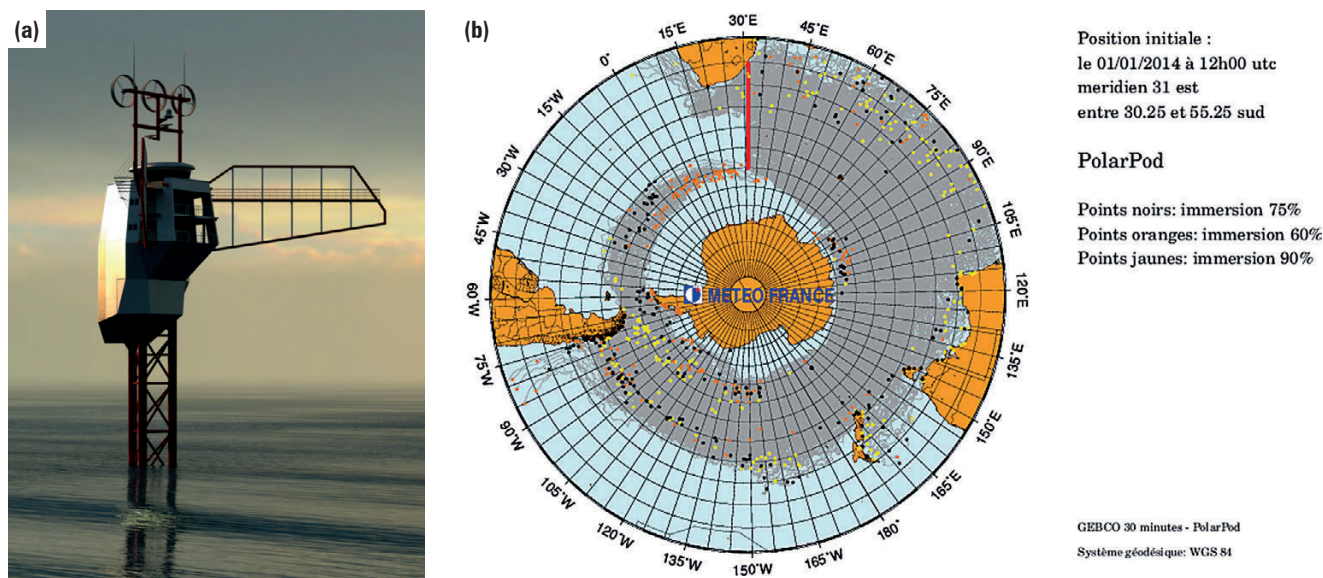


Figure 15. (a) Le PolarPod. (b) Dérive du PolarPod autour de l'Antarctique selon différentes hypothèses sur sa latitude de départ (ligne rouge) et son immersion.

Conclusion

Le système Mothy a su prouver sa fiabilité et sa pertinence dans des situations variées, comme en témoignent les exemples évoqués précédemment. On pourrait également mentionner d'autres cas emblématiques, tels que la dérive de

graines de betterave maritime, les mines flottantes, les drones, les granulés plastiques industriels ou encore les pollutions chimiques, qui complètent le vaste éventail d'applications de ce système.

Le système Mothy bénéficie d'améliorations continues, notamment grâce au programme d'intercomparaison des

modèles de dérive piloté par le Cedre. Ce programme offre l'opportunité de tester le modèle face à des scénarios de dérives réelles et de le comparer aux prévisions d'autres modèles. Ces exercices annuels contribuent à affiner les performances de Mothy et à renforcer sa fiabilité dans des situations opérationnelles variées.

Bibliographie

- [1] Daniel P., 1996. Operational forecasting of oil spill drift at Météo-France. *Spill Science & Technology Bulletin*, 3, 1/2, 53-64.
- [2] Daniel P., 1997. Modélisation de la dérive des nappes d'hydrocarbures en mer. *La Météorologie*, 19, 6-17. doi: 10.4267/2042/47021
- [3] Daniel P., Jan G., Cabioch F., Landau Y., Loiseau E., 2002. Drift modeling of cargo containers. *Spill Science & Technology Bulletin*, 7, 5/6, 279-288.
- [4] Daniel P., Josse P., Dandin P., Gouriou V., Marchand M., Tiercelin C., 2001. Forecasting the Erika oil spills. *Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference*, American Petroleum Institute, Washington D.C., 649-655.
- [5] Daniel P., Josse P., Dandin P., Lefevre J.-M., Lery G., Cabioch F., Gouriou V., 2004. Forecasting the Prestige Oil Spills. *Proceedings of the Interspill 2004 conference*, Trondheim, Norvège.
- [6] Daniel P., Paradis D., Gouriou V., Le Roux A., Garreau P., Le Roux J.-F., Louazel S., 2021. Forecast of oil slick drift from Ulysse/CSL Virginia and Grande America accidents. *Proceedings of the International Oil Spill Conference*, vol 2021 (1).
- [7] Étude comparative des modèles de prévision de dérive et de comportements des polluants hydrocarbures en mer, 2020. Rapport n° R.20.40.C/3409 du Cedre, 76 p.
- [8] Daniel P., Virasami R., 2021. Oil spill management and salvage in the Indian Ocean. *WMO Bulletin*, 70, 109-110.
- [9] Allen A., Plourde J., 1999. Review of Leeway: Field Experiments and Implementation. US Coast Guard tech report CG-D-08-99, 352 p.
- [10] Drévil M., Greiner E., Paradis D. *et al.*, 2013. A strategy for producing refined currents in the Equatorial Atlantic in the context of the search of the AF447 wreckage. *Ocean Dynamics*, 63, 63-82. doi: 10.1007/s10236-012-0580-2
- [11] Peltier H., Dabin W., Daniel P., Van Canneyt O., Dorémus G., Huon M., Ridoux V., 2012. The significance of stranding data as indicators of cetacean populations at sea: Modelling the drift of cetacean carcasses. *Ecological Indicators*, 18, 278-290. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.11.014
- [12] Deslias C., Daniel P., López A., Martínez-Cedeira J., Ridoux V., Peltier H., 2024. Predicting the drift of small cetaceans stranded along the Atlantic coast of the Iberian Peninsula: Parametrization of the Mothy drift model. *Plos One*, 19(12), e0315593. doi: 10.1371/journal.pone.0315593