

Modélisation de dérive d'objets en mer



Rapport de stage de fin d'études n°990

2005

Stage d'approfondissement réalisé à Météo-France DPREVI/MAR
sous la responsabilité de MM. Pierre DANIEL et Philippe DANDIN

Karine BELLEGUIC
Promotion d'élèves Ingénieurs de l'ENM 2002/2005

Je tiens tout d'abord à sincèrement remercier Pierre Daniel et Philippe Dandin, qui m'ont encadrée pour ce projet d'application en étant toujours disponibles et de bon conseil et tous les membres de l'équipe DPREVI/MAR pour leur accueil chaleureux, l'aide qu'ils ont pu m'apporter sur le plan technique comme Valérie Ulvoas ou Pierre Dandoy et informatique comme Ronan Baron et Patrick Le Lay et leur soutien comme Denis Paradis, Henri Savina, Jean-Charles Pineaud, Laurent Amat, Thierry Ludget, Serguey Varlamov, Jean-Michel Lefèvre...

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes ayant collaboré à mon travail par la fourniture de données comme Jean Nicolau, le personnel des CROSS, de l'IFREMER ou de Mercator-Océan.

Je remercie de plus toutes les personnes qui m'ont prodigué des conseils, Art Allen, Øyvind Breivik avec qui mes échanges furent très intéressants, Christophe Baehr, Laurent Albugues, Olivier Mestre, ainsi que mes lecteurs assidus Laurence et Frédéric et mon voisin de bureau Guillaume qui m'a supportée avec bonne humeur et patience infinie pendant toute la durée du stage.

Résumé court

La Division Marine et Océanographie de Météo-France a développé un modèle de transport de polluants en mer, MOTHY, dont une version permet la modélisation de dérive d'hydrocarbures et une autre celle des objets flottants. Il est composé d'un modèle d'océan à domaine limité, à maille fixe, forcé par des champs de vent et de pression issus d'un modèle atmosphérique global et d'un modèle d'évolution de polluant. Il est utilisé régulièrement dans un but d'assistance aux services de secours en temps réel.

Le modèle de transport d'objet est basé sur un calcul de vitesse issu de l'évaluation des différentes forces s'exerçant sur l'objet. Une autre approche, plus empirique, est utilisée par de nombreux modèles étrangers. Elle consiste à attribuer à l'objet la vitesse du courant de surface ainsi qu'une vitesse due au vent et aux vagues, calculée par application au vent de coefficients d'équations affines issus d'expérimentations.

Une comparaison des deux méthodes, sur le plan théorique et sur des cas réels, permet de mieux cerner les points forts et les faiblesses de MOTHY. Sur des situations archivées d'exercices ou d'accidents est menée une étude des différents paramètres influençant la dérive de l'objet, comme la géométrie et l'orientation de l'objet, la sensibilité du modèle aux conditions de forçage atmosphérique et de courants de grande échelle. Elle conduit à envisager des solutions pour l'amélioration de MOTHY et à en dégager celles réalistes d'un point de vue opérationnel.

Résumé long

La Division Marine et Océanographie de Météo-France a développé un modèle de transport de polluants en mer, MOTHY (Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures), dont une version permet la modélisation de dérive d'hydrocarbures et une autre celle des objets flottants. Il est composé d'un modèle d'océan à domaine limité, à maille fixe, forcé par des champs de vent et de pression issus d'un modèle atmosphérique global et d'un modèle d'évolution de polluant. Il est parfois utile, en Méditerranée par exemple, d'ajouter au courant du modèle d'océan un courant de grande échelle généré par un modèle océanique opérationnel comme le français MERCATOR, l'italien MFS ou le britannique FOAM. Il permet de simuler les dérives d'hydrocarbures et les dérives d'objets. Il est régulièrement utilisé lors d'opérations en temps réel, dans la version hydrocarbures lors d'accidents de pétroliers (l'Erika en 1999, le Prestige en 2002) et dans la version objet lors de pertes de conteneurs par des navires, de pertes de voiliers ou encore d'hommes à la mer. La modélisation de dérive d'objets en mer est fortement liée à la sécurité en mer.

Les objets flottants dérivent sous la double influence du vent et du courant. Il existe deux approches pour modéliser ce phénomène. La première, utilisée dans MOTHY, consiste à appliquer à l'objet des forces, fonctions du vent, du courant et des surfaces qui leur sont exposées, à en déduire sa vitesse puis sa trajectoire. L'objet est représenté par un ensemble de neuf conteneurs dont les taux d'immersion varient de 10% à 90% et la zone de recherche est une ligne constituée par les positions de ces neuf conteneurs. La seconde, développée par les gardes-côtes américains, est la méthode du *leeway*. Elle décompose la dérive de l'objet en une composante égale au courant de surface et en une autre, le *leeway*, liée à l'effet du vent et des vagues et pouvant s'exprimer sous la forme d'une fonction affine du vent dont les coefficients ont été déterminés grâce à l'expérimentation. L'objet est souvent représenté par un ensemble de particules pour lesquelles on perturbe de manière aléatoire les coefficients de la fonction affine.

Dans un premier temps, nous dressons un bilan du comportement de MOTHY grâce à l'étude de plusieurs situations de dérives réelles dont les données proviennent d'exercices ou d'accidents. Elle permet de comparer les résultats de MOTHY aux trajectoires ou aux positions finales réelles observées. Les dérives simulées sont correctes dans l'ensemble mais quelques inconvénients majeurs se dégagent. Le premier est lié au fait que la zone de recherche est uniquement une ligne. Les objets qui la forment sont identifiés à des conteneurs et les taux d'immersion qui leur sont attribués sont parfois irréalistes : ceux immergés à 10% et 20% ne sont jamais les plus proches de la position finale réelle et ont trop de prise au vent. Le second est le fait de négliger la force de portance dans le bilan des forces s'appliquant à l'objet. Elle cause un mouvement perpendiculaire à la direction du vent et peut être forte pour certains types d'objets, notamment ceux qui ont une longueur importante. Le dernier est la sensibilité aux conditions de forçage atmosphérique et océanique. Il semble judicieux de mieux l'étudier et de tenter de prendre en compte dans le modèle les incertitudes qui y sont liées.

Puis, une étude de l'influence des variations des forçages de vent et de courant sur les résultats de MOTHY est donc menée sur plusieurs cas réels de dérive. D'une part, il est possible d'apprécier l'apport de perturbations arbitraires gaussiennes appliquées au vent ainsi que de l'utilisation des champs du run non perturbé et des dix runs perturbés de la Prévision d'Ensemble à courte échéance d'ARPEGE (PEARP) sur deux situations récentes en Méditerranée. Pour une journée particulière, les prévisions de force et surtout de direction de vent issues de la PEARP, extrêmement variables, génèrent des trajectoires très dispersées dont une seule se rapproche de la trajectoire réelle. L'intérêt de l'introduction de perturbations arbitraires sur le vent semble limité, d'autant que cette méthode est moins rigoureuse que l'utilisation de la PEARP pour tenir compte de la variabilité des phénomènes atmosphériques. D'autre part, sur la dérive d'un flotteur près de Chypre, des simulations ont été lancées pour cinquante-sept journées avec trois forçages de courants de grande échelle : des moyennes mensuelles sur trois ans des courants de MERCATOR, des valeurs quotidiennes de MERCATOR et de FOAM. Si on considère les simulations basées sur les différentes sources de courants séparément, le taux d'échec de MOTHY est de près de 70% alors que si on décompte les cas où un des trois forçages au moins engendre une bonne prévision, le taux d'échec est réduit à 35%. L'amélioration de la modélisation liée à l'introduction de plusieurs forçages océaniques et la nécessité de la mise en place d'une procédure le permettant pour l'utilisation opérationnelle de MOTHY sont ainsi démontrées. La principale difficulté liée à la prise en compte de multiples sources de forçages atmosphériques et océaniques reste le temps de calcul qui augmente proportionnellement au nombre de sources.

Enfin, après une comparaison des vitesses de dérive engendrées par MOTHY et par les équations du *leeway*, une nouvelle version de MOTHY est implémentée : MOTHY-L. Le modèle de polluant a été entièrement modifié pour calculer la trajectoire de l'objet par addition du courant de surface (à un mètre de profondeur) et du *leeway*, déplacement ayant une composante parallèle au vent (DWL) et une autre perpendiculaire (CWL). DWL et CWL y sont calculés pour huit cents objets grâce à des fonctions affines les liant au vent à dix mètres, dont on perturbe les coefficients de manière gaussienne. La confrontation des résultats de MOTHY-L et de MOTHY sur des cas de dérive réels permet de dégager plusieurs atouts de MOTHY-L par rapport à MOTHY. Le fait d'avoir un nuage de positions prévues permet d'abord d'avoir une meilleure définition de la zone de recherche. De plus, MOTHY-L tient implicitement compte de la force de portance génératrice du CWL. Malgré tout, des faiblesses sont décelables. En effet, le *leeway* repose entièrement sur des valeurs issues de l'expérimentation et la liste des objets pour lesquels on peut le calculer est actuellement limitée à soixante-trois classes. Le conteneur, par exemple, représentant pourtant un grand danger pour la sécurité en mer, n'en fait pas partie.

Ce travail a abouti à une nouvelle version du modèle de dérive d'objets flottant en mer, MOTHY-L, qui permet d'atténuer quelques faiblesses de MOTHY. Il paraît judicieux d'utiliser les deux versions dans le cadre opérationnel, surtout pour les dérives d'objets pour lesquels les coefficients du *leeway* sont mal ou ne sont pas connus. Il conviendrait ensuite d'y intégrer des perturbations sur le vent et le courant et de contribuer à l'extension de la connaissance des coefficients du *leeway* par l'organisation d'expérimentations.

Sommaire

Glossaire	9
Introduction	11
1 Données	13
1.1 Situations	13
1.2 Forçages	15
2 MOTHY	17
2.1 Description du modèle	17
2.2 Limites de MOTHY	24
2.3 Évaluation de MOTHY	26
3 Sensibilité du modèle d'objet aux forçages	37
3.1 Sensibilité au forçage atmosphérique	37
3.2 Impact du courant de grande échelle	47
3.3 Bilan	51
4 Leeway	53
4.1 Description des modèles basés sur le <i>leeway</i>	53
4.2 Comparaison des vitesses de dérive	56
4.3 Implémentation d'un nouveau modèle MOTHY-L	58
4.4 Comparaison des résultats de MOTHY et MOTHY-L	60
4.5 Bilan	64
Conclusion	65
Références	67
Documentation papier	67
Documentation électronique	68
MODÉLISATION DE DÉRIVE D'OBJETS EN MER	7

SOMMAIRE

Annexes	71
A Coefficients de traînée	73
B Classes d'objets	75
C Vitesses de dérive	79
D Liste des simulations	87
E Modèle de nappe d'hydrocarbures	91

Glossaire

AOG :

Analyse en Ordres de Grandeur.

ARPEGE :

Modèle atmosphérique opérationnel de Météo-France.

BSHM :

Bâtiment de Soutien de Haute Mer.

CEDRE :

Centre de Documentation de Recherche et d'Expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux, cf. [20].

CEP :

Centre Européen de Prévision.

CROSS :

Centre Régional Opérationnel de Surveillance et de Secours, cf. [21].

CWL :

CrossWind Leeway component, composante de la dérive due au vent normale à la direction du vent.

DWL :

DownWind Leeway component, composante de la dérive due au vent parallèle à la direction du vent.

FOAM :

Forecasting Ocean Assimilation Model, modèle océanique britannique, cf. [34].

HIRLAM :

High Resolution Limited Area Model, modèle atmosphérique opérationnel norvégien.

IFREMER :

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, cf. [23].

IFS/CEP :

Integrated Forecasting System, modèle atmosphérique opérationnel du CEP.

LIM-UPC :

Laboratoire d'Ingénierie Maritime de l'Université Polytechnique de Catalogne, cf. [26].

LKP :

Last Known Position, dernière position connue pour l'objet recherché.

MERCATOR :

Modèle océanique français, cf. [27].

MFS :

Mediterranean Forecasting System, modèle océanique italien sur le domaine de la Méditerranée, cf. [25], dont il existe plusieurs versions de modèles imbriqués, cf. [35].

GLOSSAIRE

MOTHY :

Modèle Océanique de Transport d'HYdrocarbures.

Meteorologisk Institutt :

Service météorologique norvégien, cf. [28].

NOGAPS :

Navy Operational Global Atmospheric Prediction System, modèle global atmosphérique de l'armée américaine, cf. [36].

NWMED :

Version imbriquée du modèle MFS, incluse dans une zone au nord d'un ligne Baléares-Corse, cf. [29].

PEARP :

Prévision d'Ensemble à courte échéance issue d'ARPEGE, cf. [22].

PFD :

Principe Fondamental de la Dynamique.

SAR :

Search And Rescue, Recherche et Sauvetage.

SASEMAR :

Sociedad de Salvamento y Seguridad Maritima, cf. [33].

Introduction

La division Marine et Océanographie de Météo-France a développé un modèle de transport de polluant, **MOTHY**¹. Forcé par des données issues de modèles atmosphériques et parfois océaniques, il permet de simuler les dérives d'hydrocarbures et les dérives d'objets. Il est régulièrement utilisé lors d'opérations en temps réel, dans la version hydrocarbures lors d'accidents de pétroliers (l'Erika en 1999, le Prestige en 2002, cf. [31]) et dans la version objet lors de pertes de conteneurs par des navires, de pertes de voiliers ou encore d'hommes à la mer. La modélisation de dérive d'objets flottants en mer est donc fortement liée à la sécurité en mer et notamment au **SAR**.

Lorsqu'une alerte est lancée, les services de sécurité doivent réagir et planifier leurs tâches au plus vite. A partir du **LKP**, les calculs de trajectoires sont lancés et les recherches organisées. Suivant les nations, l'organisation des secours peut être différente. Les services de gardes-côtes américains et canadiens disposent d'outils complets alliant calcul de dérive et planification de recherches. En Grande-Bretagne ou en Suède, des moyens plus sommaires sont disponibles. En France, les **CROSS**, chargés des tâches de sauvetage et de secours en mer, utilisent le logiciel SARCROSS (dont le module de calcul de dérive est relativement simple) et font appel à MOTHY.

Les objets flottant en mer dérivent sous la double influence du vent et du courant. Dans la version objet de MOTHY, neuf dérives sont modélisées, chacune avec un taux d'immersion différent pour l'objet. Pour chaque objet, une vitesse de déplacement puis une trajectoire sont calculées grâce à l'application de forces fonctions du vent et du courant.

Une autre manière de modéliser les dérives d'objets consiste à décomposer le mouvement de l'objet : une partie est liée au courant de surface, une autre, appelée *leeway*, à l'effet combiné du vent et des vagues. Le *leeway* a été étudié en détails par de nombreux services de recherche en SAR et plus particulièrement par les gardes-côtes américains. Il peut être calculé par application au vent à dix mètres de fonctions affines.

Le travail de ce stage d'approfondissement est basé sur de nombreuses simulations réalisées à partir de situations d'exercices ou d'accidents réels. Il est réalisé grâce à la collaboration des services de recherche américain, norvégien et catalan, du **CEDRE** et de l'**IFREMER**.

Le premier objectif, après avoir étudié le fonctionnement de MOTHY et exploré les limites liées à sa conception, est de dresser un bilan de son comportement sur différentes situations de dérive.

Ensuite, il s'agit de mesurer et d'intégrer l'impact des erreurs de MOTHY dues aux forçages de vent et de courant par l'utilisation de multiples modèles atmosphériques (parmi lesquels notamment la **PEARP**) et océaniques.

Enfin, le concept du *leeway* est abordé. Un fois le principe étudié, il convient de comparer cette approche et celle de MOTHY, tant pour les vitesses de dérive engendrées que pour des simulations sur des cas réels. Ceci n'est possible que grâce à l'implémentation d'un nouveau modèle, MOTHY-L, adoptant le *leeway*.

¹Les termes en caractères gras sont explicités dans le glossaire.

1 Données

1.1 Situations

Ce travail a pour base de nombreuses simulations de MOTHY réalisées à partir de plusieurs exercices et situations réelles. Les cas les plus anciens sont des exercices de dérive de conteneurs organisés par l'IFREMER et le CEDRE en 1991 et 1992. D'autres exercices ont été réalisés par les services de sécurité maritime norvégien en 2003 et 2004 sur des dérives de canots de sauvetage et espagnol en 2004 sur la trajectoire d'une bouée. De plus, les données de l'accident du navire MSC Martina en 2000 ont été exploitées. Enfin, une longue et récente situation de dérive d'un flotteur en Méditerranée a pu être utilisée.

Les types d'objets flottants varient suivant les situations : conteneurs, bouées, radeaux.

La nature des forçages atmosphériques comme des courants de grande échelle disponibles diffère également en raison des périodes et des zones géographiques concernées.

1.1.1 Dourvac'h 1991

Une étude théorique et expérimentale en laboratoire a été réalisée au cours de l'année 1990 par l'IFREMER, pour le CEDRE, afin de déterminer la faisabilité d'un "outil d'aide à la décision en cas de chute à la mer de colis contenant des matières nuisibles à l'environnement" (cf. [3]). Par la suite, une étude expérimentale en conditions réelles s'impose pour permettre de mieux observer et de quantifier l'influence de l'environnement de surface sur la dérive d'un conteneur flottant, à savoir le vent, la houle et le courant généré par le vent. Des essais concernant la dérive de conteneurs sont donc organisés en avril 1991.

Un conteneur instrumenté a été lâché en mer et sa trajectoire étudiée. La zone de travail a été fixée par la Marine Nationale au nord des couloirs de navigation au large d'Ouessant. Le conteneur était immergé à 70% environ.

L'expérimentation comporte trois phases de dérive dont deux seulement sont exploitables pour les simulations de MOTHY. La première s'est déroulée le 9 avril 1991 de 9 UTC à 17 UTC. Le conteneur étant sorti de la zone autorisée, il a ensuite été remorqué. La seconde phase a alors eu lieu du 9 avril 1991 à 20 UTC au 10 avril à 7 UTC.

Durant cette période, le vent souffle du secteur sud avec une force de dix à quinze nœuds.

Les données de position de l'objet et de vent mesuré sont issues de l'étude "Mesure de la dérive d'un conteneur à la mer" (cf. [4]).

1.1.2 Dourvac'h 1992

Une seconde expérimentation, toujours menée par l'IFREMER en collaboration avec le CEDRE, fait suite à celle de 1991, avec les mêmes objectifs de mesure et la même instrumentation. Le conteneur est immergé à 70% environ.

1. DONNÉES

Elle est organisée du 25 au 28 mai 1992. Deux phases de dérive ont eu lieu : la première du 25 mai à 18 UTC au 26 mai à 16 UTC et la seconde du 27 mai à 6 UTC au 28 mai à 18 UTC. Les périodes de dérive sont de 22 heures et 36 heures, ce qui est plus important que pour l'expérimentation de 1991 pour laquelle elles étaient de 8 heures et 11 heures.

Durant cette période, le vent souffle du secteur est pendant la première phase et du secteur sud-ouest pendant la seconde, avec une force de cinq à quinze nœuds.

Les données de position de l'objet et de vent mesuré sont issues de l'étude "Observation de la dérive d'un conteneur à la mer" (cf. [5]).

1.1.3 Navire MSC Martina

Le 19 octobre 2000, le navire "MSC Martina" a perdu un certain nombre de conteneurs. Certains d'entre eux sont repérés dérivant en mer d'Iroise. Le danger pour la navigation était réel. Le 20, le **BSHM** "l'Ailette" a récupéré deux conteneurs de quarante pieds dont la dérive a été suivie depuis la veille. Les positions du premier conteneur, immergé à 50%, ont été notées toutes les demi-heures. En ce qui concerne le second, immergé à 70%, seules les positions de départ et de repêchage sont disponibles. Ces données de positions sont issues d'un compte-rendu rédigé juste après l'incident par Fanc'h Cabioc'h du CEDRE.

1.1.4 Mer de Norvège 2003

Cet exercice s'est déroulé en mer de Norvège les 6 et 7 février 2003. Il a été organisé en collaboration par les centres de sauvetage norvégiens, islandais et ceux des îles Féroé. Un canot de sauvetage a été lâché le 6 février à 11 UTC et sa position a été repérée heure par heure jusqu'au 7 février à 11 UTC. Ces données de positions et les prévisions de dérive du modèle norvégien nous ont été fournies par le **Meteorologisk Institutt**.

Durant cette période, le vent souffle du sud-ouest à une force moyenne de dix à quinze nœuds.

1.1.5 Mer de Norvège 2004

Cet exercice s'est déroulé en mer de Norvège les 3 et 4 mai 2004. Il a été organisé en collaboration par les centres de sauvetage norvégiens, islandais et ceux des îles Féroé. Un canot de sauvetage a été lâché le 3 mai à 22 UTC et sa position a été repérée le 4 mai à 14 UTC. Ces données de position et les prévisions de dérive du modèle norvégien nous ont été fournies par le Meteorologisk Institutt.

Durant cette période, le vent souffle du secteur nord avec une force voisine de vingt-cinq à trente nœuds.

1.1.6 Méditerranée 2004

Cet exercice a été organisé par **SASEMAR**. Une bouée, supposée se comporter comme une nappe de pétrole, a été suivie en Méditerranée du 14 décembre 2004 à 8 UTC au 26 décembre 2004 à 14 UTC. Sa position a été relevée plusieurs fois par jour à intervalles non réguliers. La dérive commence au nord de Majorque et se termine près de Minorque. Les données de positions nous ont été fournies par le **LIM-UPC**.

1.1.7 Méditerranée 2005

Un flotteur-profileur océanique de type "provor" (cf. [24]) est tombé en panne au large de Chypre en janvier 2005. Cet appareil, en fonctionnement normal, plonge et effectue des mesures de température de l'eau de mer. Ainsi, le flotteur étant incapable de plonger pour effectuer ses mesures, il a dérivé sous l'influence du vent et surtout du courant jusqu'en mars 2005. Sa position était toujours signalée plusieurs fois par jour. Nous disposons de la trajectoire de ce flotteur du 15 janvier au 15 mars 2005, fournie par l'IFREMER.

1.2 Forçages

Suivant les périodes et les zones géographiques étudiées, les forçages atmosphériques comme océaniques issus des modèles opérationnels sont variés.

1.2.1 Forçages atmosphériques

Pour les situations anciennes (Dourvac'h 1991 et 1992) seules les analyses et prévisions du modèle **IFS/CEP** à résolution spatiale de 0,5 degré et temporelle de 6 heures sont disponibles.

Plus tard, les analyses et prévisions issues d'**ARPEGE** peuvent être utilisées. Le pas temporel est de 6 heures et la résolution spatiale est de 0,5 degré pour les deux situations en mer de Norvège et de 0,25 degré pour les autres (MSC Martina, Méditerranée 2004 et 2005).

De plus, des simulations ont été réalisées avec les analyses du modèle américain **NOGAPS**, par pas de 6 heures et avec une résolution de 1 degré, pour les deux cas de dérive norvégiens.

Enfin, le run non perturbé et les dix runs perturbés de la prévision d'ensemble à courte échéance d'**ARPEGE** (PEARP), avec une fréquence temporelle de 3 heures et une résolution spatiale de 0,5 degré ont servi pour les deux situations récentes en Méditerranée.

1.2.2 Forçages océaniques

Des courants de grande échelle ont été ajoutés à ceux calculés par **MOTHY** pour plusieurs des cas étudiés. Ceux de **FOAM** (résolution spatiale initiale 0,125 degré) et **MERCATOR** (résolution spatiale initiale 0,083 degré) ont été utilisés pour la situation en mer de Norvège de 2004 mais les courants étaient de faible amplitude.

En revanche, il est indispensable d'introduire des courants supplémentaires pour les situations en Méditerranée. En plus des données de **FOAM** et **MERCATOR** (utilisées pour 2004 et 2005), celles du modèle **MFS** (résolution spatiale initiale 0,0625 degré) et de sa version imbriquée **NWMED** (résolution spatiale initiale 0,027 degré) ont pu servir de base aux modélisations de dérive de décembre 2004. Quel que soit le modèle, le pas temporel était d'une journée et les données de courant ont été projetées sur une grille de résolution identique à celle de la bathymétrie, soit 0,083 degré.

2 MOTHY

La modélisation de dérive d'objets peut être étudiée suivant plusieurs approches. Celle de MOTHY, basée sur une méthode de modélisation de dérives d'icebergs (cf. [17] et [18]), consiste à calculer les différentes forces s'appliquant sur l'objet et à en déduire ensuite sa vitesse puis sa trajectoire.

La prise en compte des forces à appliquer implique des simplifications qui peuvent être à l'origine d'erreurs dans le calcul de dérive. Après avoir décrit le fonctionnement du modèle, nous étudions ici les limites imposées par sa conception. Ensuite, nous dressons un premier bilan du comportement du modèle sur des situations sélectionnées décrites en 1.1.

2.1 Description du modèle

Le modèle MOTHY est, au départ, un Modèle Océanique de Transports d'HYdrocarbures (cf. [8] et schéma d'ensemble FIG. 2.1). Il est constitué d'un modèle d'océan, forcé par le vent à dix mètres et la pression atmosphérique issus d'un modèle atmosphérique et pouvant prendre en compte la marée, et d'un modèle de polluant dans lequel le polluant dérive sous l'action du vent et celle du courant. Le modèle permettant la dérive d'hydrocarbures a été modifié de manière à pouvoir simuler les dérives d'objets en mer (cf. [9]).

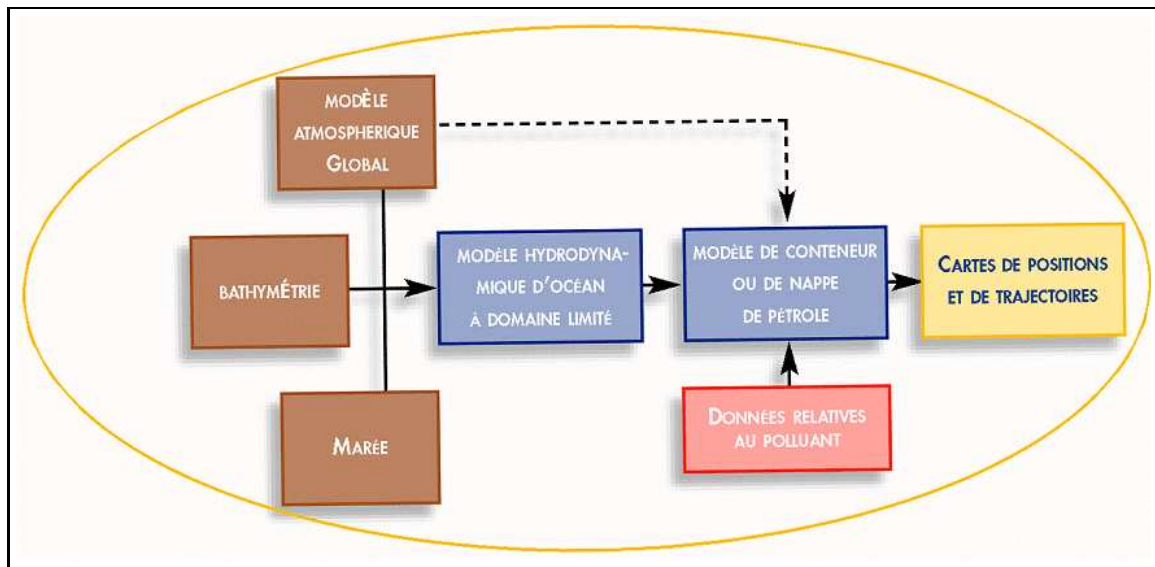


FIG. 2.1 – Schéma d'ensemble de MOTHY.

2. MOTHY

2.1.1 Modèle d'océan

Le courant est modélisé grâce au couplage d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel à domaine océanique limité et d'un modèle analytique unidimensionnel de viscosité turbulente.

Le premier est un modèle barotrope qui calcule une grille de courants intégrés sur la profondeur (courants moyens de la colonne d'eau). Les calculs sont réalisés à partir d'un forçage atmosphérique de vent à dix mètres et de pression au niveau de la mer fourni par les analyses ou prévisions de modèles globaux comme ARPEGE ou CEP. Un courant de marée peut également être introduit : il est calculé à partir de données de marégraphes dont le nombre varie en fonction du domaine de calcul.

Le courant moyen de la colonne d'eau étant connu, on peut ensuite appliquer le modèle unidimensionnel de viscosité turbulente forcé par les courants intégrés sur la profondeur, la tension du vent en surface et le frottement au fond. Ceci permet de déterminer le courant proche de la surface qui agit sur le mouvement de l'objet.

2.1.1.1 Équations du modèle de courant barotrope

Le modèle bidimensionnel de courant barotrope utilise les équations de Saint-Venant :

$$\frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \vec{q} \cdot \nabla \vec{q} + f \cdot \vec{k} \wedge \vec{q} = -g \cdot \vec{\nabla} \eta - \frac{1}{\rho} \cdot \vec{\nabla} P_a + \frac{1}{\rho \cdot H} \cdot (\vec{\tau}_s - \vec{\tau}_b) + A \cdot \nabla^2 \vec{q} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla(H \cdot \vec{q}) = 0 \quad (2.2)$$

avec	t	: temps,
	$\vec{q}$	: courant intégré sur la profondeur,
	η	: élévation de la surface libre,
	H	: hauteur d'eau totale,
	f	: paramètre de Coriolis,
	$\vec{k}$	: vecteur unité vertical,
	P_a	: pression atmosphérique en surface,
	τ_s	: stress dû au vent,
	τ_b	: frottement au fond,
	ρ	: masse volumique de l'eau ($\rho = 1026 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
g	: accélération de la pesanteur ($g = 9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$),	
A	: coefficient de diffusion horizontale ($A = 2000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).	

La tension du vent en surface est modélisée en utilisant la loi quadratique :

$$\begin{cases} \tau_{sx} = \rho_a \cdot C_d \cdot |\vec{V}_a| \cdot V_{ax} \\ \tau_{sy} = \rho_a \cdot C_d \cdot |\vec{V}_a| \cdot V_{ay} \end{cases} \quad (2.3)$$

avec	$ \vec{V}_a $	: module du vent à dix mètres,
	V_{ax}, V_{ay}	: composantes horizontales du vent à dix mètres,
	ρ_a	: masse volumique de l'air ($\rho_a = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
	C_d	: coefficient de frottement air/eau, sans dimension.

C_d est donné par l'expression (Wu, 1982) :

$$C_d = (0.8 + 0.065 \cdot |\vec{V}_a|) \cdot 10^{-3} \quad (2.4)$$

Le frottement au fond est modélisé par une loi quadratique de type Chezy :

$$\begin{cases} \tau_{bx} = \rho_w \cdot C_b \cdot |\vec{q}| \cdot q_x \\ \tau_{by} = \rho_w \cdot C_b \cdot |\vec{q}| \cdot q_y \end{cases} \quad (2.5)$$

avec $\left| \begin{array}{ll} |\vec{q}| & : \text{ module du courant,} \\ q_x, q_y & : \text{ composantes horizontales du courant,} \\ \rho_w & : \text{ masse volumique de l'eau,} \\ C_b & : \text{ coefficient de frottement au fond } (C_b = 0,002). \end{array} \right.$

À la côte, la composante normale du courant est nulle.

Aux limites ouvertes du modèle, on utilise une condition de radiation des ondes de gravité pour le courant.

Ces équations, écrites en coordonnées sphériques, sont intégrées sur une grille C d'Arakawa en utilisant un schéma numérique fractionné.

2.1.1.2 Modélisation de la structure verticale du courant

La modélisation de la structure verticale du courant est réalisée par un modèle unidimensionnel inspiré du modèle de Madsen (cf. [13]). Il prend en compte le courant intégré sur la profondeur (dans le but d'apporter au modèle unidimensionnel un meilleur comportement près des côtes ou en bassins peu profonds), la tension du vent en surface et le frottement au fond. Il conduit à un profil continu de courant en rotation avec la profondeur.

L'équation du mouvement horizontal s'écrit, en utilisant la notation complexe :

$$i \cdot f \cdot U^* = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \cdot \frac{\partial U^*}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

avec $\left| \begin{array}{ll} U^* = u + i \cdot v & : \text{ vitesse horizontale du courant,} \\ \nu_t & : \text{ viscosité de l'eau,} \\ \frac{\partial}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial x} + i \cdot \frac{\partial}{\partial y} & \end{array} \right.$

Le profil de viscosité dépend de la profondeur suivant un modèle bilinéaire proposé par Madsen.

On a :

$$\begin{cases} \nu_t = -\kappa \cdot u_{*s} \cdot z & \text{si } -z_m < z \leq 0, \\ \nu_t = \kappa \cdot u_{*b} \cdot (z + h) & \text{si } -h \leq z \leq -z_m. \end{cases} \quad (2.7)$$

avec $\left| \begin{array}{ll} h & : \text{ profondeur de l'océan,} \\ \kappa & : \text{ constante de Von Karman } (\kappa = 0,4), \\ u_{*s} & : \text{ vitesse de cisaillement en surface,} \\ u_{*b} & : \text{ vitesse de cisaillement au fond,} \\ z_m = \frac{h \cdot u_{*s}}{u_{*s} + u_{*b}} & \end{array} \right.$

2. MOTHY

2.1.1.3 Courants de grande échelle

De plus, dans des zones où les courants de grande échelle sont relativement forts, on peut ajouter au courant de MOTHY un courant issu d'un modèle océanique opérationnel comme FOAM, MERCATOR ou MFS. Ces modèles prennent en effet en compte la circulation thermo-haline (importante en Méditerranée) et l'effet du vent à long terme sur de grandes étendues d'eau (important dans l'océan Atlantique).

Le niveau du courant rajouté doit être sélectionné sous la couche de mélange océanique (dont l'épaisseur est inférieure à cent mètres), afin de ne prendre en compte qu'une seule fois l'effet du vent sur le courant de surface. C'est souvent un niveau proche de cent mètres de profondeur qui est choisi.

Cet ajout de courant n'est encore pas systématique pour l'utilisation de MOTHY en mode opérationnel.

2.1.2 Modèle d'objet

2.1.2.1 Forces s'appliquant sur l'objet

L'objet considéré dans le modèle est un conteneur.

L'équation régissant le mouvement d'un objet à la dérive est obtenue en lui appliquant le **PFD** dans le référentiel terrestre.

$$m \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + m \cdot f \cdot \vec{k} \wedge \vec{V} = \vec{F}_a + \vec{F}_w + \vec{F}_r \quad (2.8)$$

avec	m : masse de l'objet à la dérive, t : temps, $\vec{V}$: vitesse de l'objet à la dérive, f : paramètre de Coriolis, $\vec{k}$: vecteur unitaire vertical, $\vec{F}_a$: force de résistance due au vent, $\vec{F}_w$: force de résistance due au courant, $\vec{F}_r$: force de dérive due aux vagues.
------	--

Les forces de résistance dues au vent et au courant s'écrivent respectivement :

$$\vec{F}_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot S_a \cdot |\vec{V}_a - \vec{V}| \cdot (\vec{V}_a - \vec{V}) \quad (2.9)$$

$$\vec{F}_w = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot C_w \cdot S_w \cdot |\vec{V}_w - \vec{V}| \cdot (\vec{V}_w - \vec{V}) \quad (2.10)$$

avec	ρ_a et ρ_w : masses volumiques de l'air et de l'eau de mer, C_a et C_w : coefficients de traînée dans l'air et dans l'eau, $\vec{V}_a$ et $\vec{V}_w$: vitesses du vent et du courant, S_a et S_w : surfaces de l'objet exposées au vent relatif $(\vec{V}_a - \vec{V})$ et au courant relatif $(\vec{V}_w - \vec{V})$.
------	--

La force de radiation due aux vagues s'écrit pour un conteneur :

$$\vec{F}_r = \frac{1}{4} \cdot \rho_a \cdot g \cdot a^2 \cdot L \cdot \vec{h} \quad (2.11)$$

avec

- g : accélération de la pesanteur,
- a : amplitude de la vague (moitié de la hauteur mesurée entre sa base et sa crête),
- L : longueur ou dimension principale de l'objet,
- $\vec{h}$: vecteur unitaire ayant la direction du train de vagues.

Une **AOG** des différents termes peut être faite, avec :

- $m \sim 100 \text{ kg}$,
- $|\partial \vec{V}| \sim 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- $S \sim 10 \text{ m}^2$,
- $|\vec{V}_a| \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- $|\vec{V}| \sim |\vec{V}_w| \sim 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- $g \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,
- $a \sim 1 \text{ m}$,
- $\frac{L}{4} \sim 1 \text{ m}$ (si l'objet a une taille inférieure à 30 m),
- $C_a \sim C_w \sim 1$.

L'AOG donnerait alors :

- $|m \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}| \sim 100 \cdot \frac{10^{-4}}{1} = 10^{-2}$
- $|m \cdot f \cdot \vec{k} \wedge \vec{V}| \sim 100 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-1} = 10^{-4}$
- $|\vec{F}_a| \sim 1 \cdot 1 \cdot 10 \cdot (10)^2 = 10^3$
- $|\vec{F}_w| \sim 10^3 \cdot 1 \cdot 10 \cdot (10^{-1})^2 = 10^2$
- $|\vec{F}_r| \sim 1 \cdot 10 \cdot 1^2 \cdot 1 = 10$

Les termes prédominants sont $\vec{F}_a$ et $\vec{F}_w$. Nous pouvons alors négliger les autres forces.

2.1.2.2 Expression de la vitesse de dérive

L'équation du mouvement peut donc s'écrire :

$$\vec{F}_a + \vec{F}_w = \vec{0} \quad (2.12)$$

soit :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot S_a \cdot |\vec{V}_a - \vec{V}| \cdot (\vec{V}_a - \vec{V}) + \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot C_w \cdot S_w \cdot |\vec{V}_w - \vec{V}| \cdot (\vec{V}_w - \vec{V}) = \vec{0} \\ \Rightarrow & \rho_a \cdot C_a \cdot S_a \cdot |\vec{V}_a - \vec{V}|^2 = \rho_w \cdot C_w \cdot S_w \cdot |\vec{V}_w - \vec{V}|^2 \\ \Rightarrow & |\vec{V}_a - \vec{V}| = \sqrt{\frac{\rho_w \cdot C_w \cdot S_w}{\rho_a \cdot C_a \cdot S_a}} \cdot |\vec{V}_w - \vec{V}| \\ \Rightarrow & |\vec{V}_a - \vec{V}| = \frac{b}{a} \cdot |\vec{V}_w - \vec{V}|, \text{ avec : } a = \sqrt{\rho_a \cdot C_a \cdot S_a} \text{ et } b = \sqrt{\rho_w \cdot C_w \cdot S_w} \end{aligned}$$

2. MOTHY

d'où :

$$\begin{aligned}
 a^2 \cdot \frac{b}{a} \cdot |\vec{V}_w - \vec{V}| \cdot (\vec{V}_a - \vec{V}) + b^2 \cdot |\vec{V}_w - \vec{V}| \cdot (\vec{V}_w - \vec{V}) &= \vec{0} \\
 \Leftrightarrow a \cdot (\vec{V}_a - \vec{V}) + b \cdot (\vec{V}_w - \vec{V}) &= \vec{0} \\
 \Leftrightarrow \vec{V} &= \frac{a \cdot \vec{V}_a + b \cdot \vec{V}_w}{a + b}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Les coefficients C_a et C_w sont de l'ordre de grandeur de 1 pour les objets considérés (cf. [18] et [7]) et sont donc pris égaux à 1 de manière arbitraire.

Les surfaces immergées et émergées (S_w et S_a) sont calculées en fonction de la hauteur de l'objet et du taux d'immersion qu'on lui applique, les largeurs des surfaces immergées et émergées étant supposées identiques. Ce taux d'immersion est fixé pour chaque objet et est considéré constant tout au long de la simulation. Neuf objets sont considérés pour faire varier le taux d'immersion de 10% à 90% par pas de 10%. Les conteneurs les moins immergés ont une dérive rapide sous l'emprise du vent et les plus immergés une trajectoire beaucoup plus lente. La zone de recherche définie par les positions des neuf conteneurs est donc une ligne.

2.1.3 Lancement du modèle

Les paramètres d'entrée du modèle sont :

- les coordonnées de la dernière position connue (latitude, longitude),
- la date et l'heure correspondante,
- la hauteur de l'objet,
- la durée de simulation désirée.

Les résultats sont fournis, dans l'utilisation courante du modèle, sous forme de cartes valides pour une échéance donnée (cf. exemple FIG. 2.2) sur lesquelles sont représentées :

- la position du point de départ de la simulation par une étoile rouge,
- les positions des conteneurs, pour l'échéance, par des chiffres correspondant à leur taux d'immersion,
- les trajectoires des conteneurs depuis le point de départ par des filaments gris.

Pour des raisons de lisibilité, certaines de ces conventions sont parfois modifiées dans la suite de ce rapport.

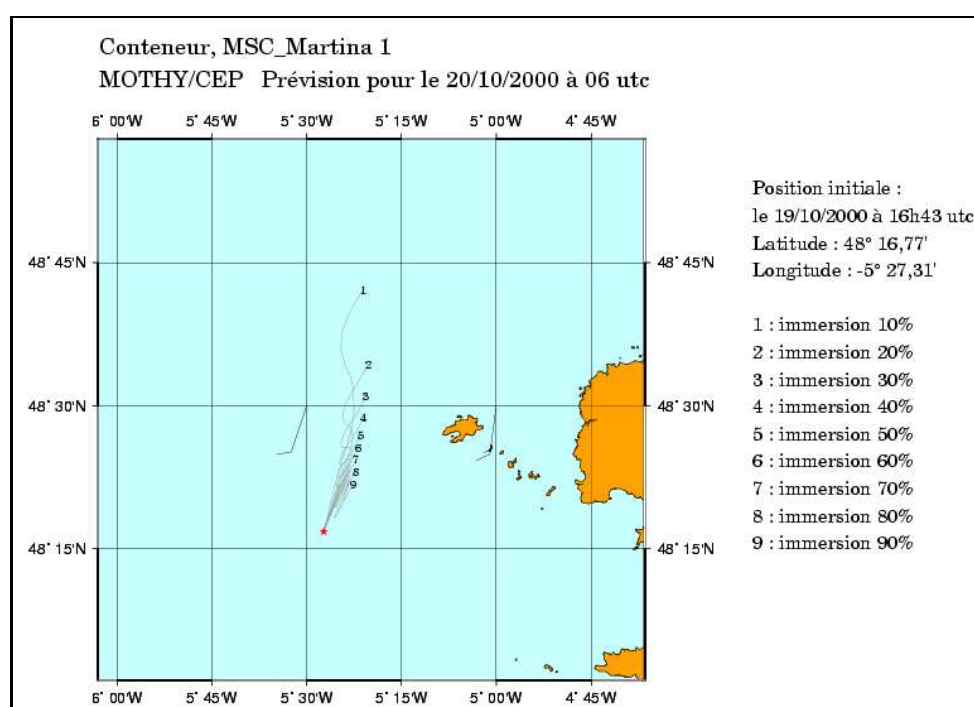


FIG. 2.2 – Exemple de carte issue de MOTHY.

2.2 Limites de MOTHY

Le mouvement de l'objet dérivant dans MOTHY est défini par l'équation simplifiée obtenue après application du PFD à l'objet (cf. équation (2.12) : $\vec{F}_a + \vec{F}_w = \vec{0}$). Les simplifications réalisées, en particulier le fait de considérer l'objet quel qu'il soit comme un conteneur, empêchent de prendre en compte certains phénomènes.

D'une part, seules les forces de traînée sont conservées et leur expression est simplifiée grâce au choix de la valeur 1 pour coefficient de traînée dans l'air et dans l'eau (cf. 2.1.2). Le fait de ne pas disposer de valeurs plus précises influe sur la vitesse de dérive.

D'autre part, les forces de portance, normales à la direction du vent, sont négligées alors qu'elles interviennent dans le mouvement de l'objet.

2.2.1 Force de traînée

L'expression des forces de traînée liées au vent et au courant est grandement simplifiée puisque les coefficients de traînée dans l'air et dans l'eau sont pris égaux à 1 au lieu d'être choisis en fonction du profil de l'objet. Des valeurs de ces coefficients de traînée peuvent être calculées pour différents types d'objets, par exemple :

- des formes géométriques courantes en deux ou trois dimensions (cf. [12]),
- des corps humains (cf. [12]),
- des objets flottants, en particulier les gros bateaux (cf. [12] et [16]).

Les coefficients des formes géométriques simples sont listés en annexe A. Ils sont en effet de l'ordre de grandeur de 1 et fluctuent entre 0,3 et 2. Cependant, ils sont valables pour un objet plongé entièrement dans le fluide et ne peuvent en théorie pas être appliqués pour des objets entre deux fluides. Il faudrait en effet un coefficient pour la partie émergée et un autre pour la partie immergée puisque les profils de ces deux parties sont rarement strictement identiques. Si nous utilisons ces coefficients définis pour des formes simples, c'est la même valeur qui sera affectée à C_a et à C_w puisque les nombres de Reynolds pour le mouvement dans l'air et dans l'eau sont du même ordre de grandeur. Alors l'expression de la vitesse de dérive selon le vent et le courant se simplifie et devient indépendante de ce coefficient (cf. équation 2.13).

De manière générale, il paraît difficile d'obtenir des valeurs précises pour les paramètres utilisés dans le modèle d'objet de MOTHY (coefficients de traînée dans l'air et dans l'eau, surfaces sur lesquelles s'appliquent les forces) pour tous les types d'objets susceptibles de dériver en mer et toutes les configurations possibles.

2.2.2 Force de portance

La force de portance, normale à la direction du flux, devrait également être considérée. Richardson (cf. [14]) considère cette force comme génératrice de la composante de dérive normale au vent. Son expression est similaire à celle de la force de traînée : elle est également fonction de la masse volumique du fluide, de la surface exposée et de la vitesse relative du fluide. Elle est significative pour les longs objets et dépend fortement, par l'intermédiaire du coefficient de portance, de la géométrie de l'objet et de son orientation par rapport à la direction du vent.

Les scientifiques américains (cf. [2]) ont contourné le problème de l'expression de cette force par l'utilisation d'équations utilisant le *leeway* qui prend en compte un mouvement dans la direction du vent et un mouvement qui lui est perpendiculaire.

2.2.3 Bilan

Pour pouvoir appliquer de façon rigoureuse les équations de la mécanique dans le modèle d'objet, il faudrait connaître parfaitement pour chaque type d'objet les coefficients de traînée et de portance dans l'air et dans l'eau de mer, ceci dans des configurations multiples, ce qui représente un travail considérable. Celui-ci pourrait être réalisé à partir de maquettes dans des bassins (qui permettent les simulations d'écoulement de deux fluides) ou bien en situation réelle mais il est difficile d'imaginer toutes les positions possibles pour un objet. De tels coefficients ont toutefois été mesurés pour des conteneurs dans plusieurs positions (cf. [3]). Cependant, il arrive fréquemment que les conteneurs à la dérive soient dans des positions d'équilibre très particulières (cf. FIG. 2.3).

Il serait également possible, à partir des données utilisées par ALLEN (cf. [2]) et en fixant les valeurs des surfaces immergées et émergées de l'objet, de recalculer des valeurs pour les rapports de coefficients de traînée ($\frac{C_w}{C_a}$) et de coefficients de portance. L'intérêt en est limité et il conviendrait alors mieux d'adopter strictement la méthode décrite dans "Review of Leeway" (cf. [2]).

Ne disposant pas de tables de valeurs précises, il convient pour le moment de conserver la valeur 1 pour les coefficients de traînée dans l'air et dans l'eau et de négliger la dérive normale au vent due à la force de portance afin de chiffrer l'importance des autres paramètres intervenant dans le calcul de la dérive.



FIG. 2.3 – Conteneur repêché dans une position d'équilibre pour laquelle l'objet est penché.

2. MOTHY

2.3 Évaluation de MOTHY

Une évaluation de la version objet de MOTHY s'impose. Elle peut être faite grâce à l'étude détaillée de situations décrites en 1.1. Les cas étudiés sont les deux exercices du Dourvac'h, l'accident du MSC Martina, les deux exercices en mer de Norvège et l'exercice en Méditerranée de décembre 2004.

2.3.1 Dourvac'h 1991

Des simulations ont été réalisées avec marée et avec comme forçages atmosphériques les analyses et prévisions de CEP ainsi que les valeurs de vent mesurées pendant l'expérience (cf. FIG. 2.4 et 2.5).

2.3.1.1 Première phase de dérive

Les simulations offrent des résultats satisfaisants puisque les trajectoires modélisées sont très proches de la trajectoire réelle. Celles ayant pour forçage CEP (analyses et prévisions) sont un peu trop à l'ouest de la réalité alors que celles issues des vents réels sont un peu trop à l'est. Dans l'ensemble, la modélisation de dérive est correcte même si la durée de l'expérimentation est relativement courte.

Quel que soit le forçage atmosphérique utilisé, c'est le comportement du conteneur immergé à 30% qui se rapproche le plus de la réalité alors que le conteneur de l'exercice est immergé à 70%. Ceci est probablement dû à une sous-estimation de l'effet du vent sur le conteneur lié au forçage atmosphérique ou à l'orientation du conteneur qui pourrait modifier les coefficients de traînée réels.

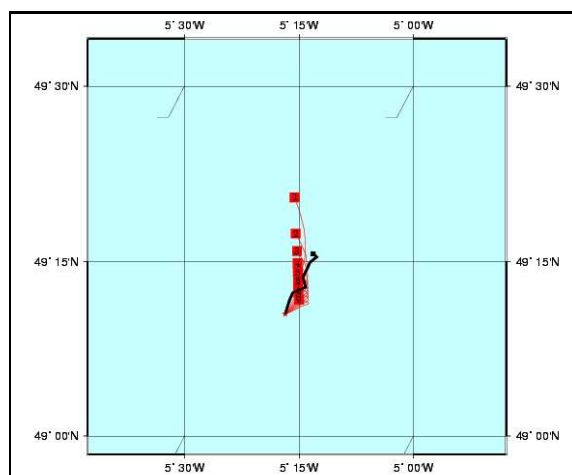


FIG. 2.4 – Dérive de MOTHY pour l'exercice Dourvac'h du 9 avril 1991, phase 1, forçage analyse CEP, échéance finale (en noir la trajectoire réelle, en rouge les trajectoires issues de MOTHY).

2.3.1.2 Seconde phase de dérive

Les simulations offrent des résultats satisfaisants puisque les trajectoires modélisées sont très proches de la trajectoire réelle. Celles issues des analyses CEP sont presque superposées avec la réalité (cf. FIG. 2.5(a)) et c'est le conteneur immergé à 60% qui s'en rapproche le plus (ce qui est conforme au taux réel d'immersion). Les trajectoires réalisées à partir des vents réels et des prévisions CEP sont un peu trop à l'est mais la position finale du conteneur est correcte si on considère les conteneurs immergés à 40% et 50% pour l'utilisation du vent réel (cf. FIG. 2.5(b)) et ceux immergés à 60% pour les prévisions CEP. Avec ce dernier forçage, on se rapproche donc de la réalité où l'immersion du conteneur est voisine de 70%.

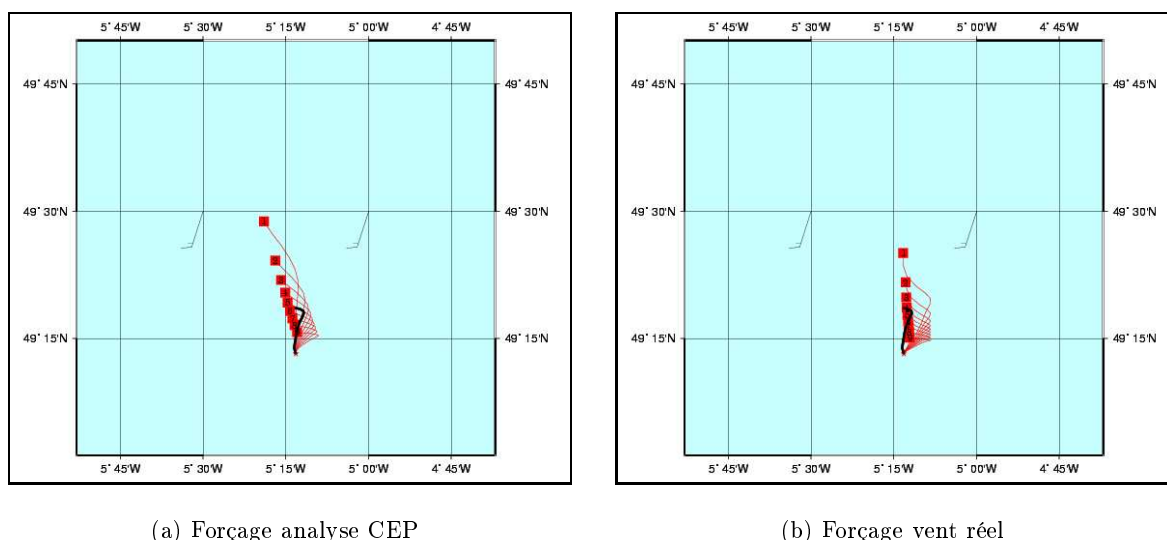


FIG. 2.5 – Dérive de MOTHY pour l'exercice Dourvac'h du 9 au 10 avril 1991, phase 2, échéance finale (en noir la trajectoire réelle, en rouge les trajectoires issues de MOTHY).

2.3.2 Dourvac'h 1992

Des simulations de MOTHY avec marée et avec des forçages atmosphériques issus des analyses et prévisions de CEP et du vent réel mesuré pendant l'expérimentation ont été réalisées (cf. FIG. 2.6 et 2.7).

2.3.2.1 Première phase de dérive

Les simulations offrent des résultats satisfaisants. Celles issues des analyses (cf. FIG. 2.6(a)) et des prévisions CEP sont presque superposées avec la réalité, surtout pour le conteneur immergé à 60%, alors que celles générées à partir du vent réel (cf. FIG. 2.6(b)) sont décalées vers le sud (la trajectoire a une direction identique à celle du vent soufflant pendant cette période). C'est le conteneur immergé à 60% qui est le plus proche de la position réelle, ce qui est conforme au taux d'immersion réel du conteneur, voisin de 70%.

Les variations de direction du vent ont une influence forte sur les trajectoires. Les variations de force de vent ont un certain impact sur les conteneurs les moins immergés (qui correspondent le plus souvent aux situations les moins réalistes) et semblent peu faire varier les trajectoires des conteneurs les plus immergés (au-dessus d'un taux d'immersion de 40%).

2.3.2.2 Deuxième phase de dérive

Les simulations offrent des résultats satisfaisants. Celles issues des vents réels sont presque superposées à la réalité, avec un léger décalage vers l'ouest (cf. FIG. 2.7(b)), alors que celles réalisées à partir des analyses CEP sont décalées de façon plus importante dans la même direction (cf. FIG. 2.7(a)).

2. MOTHY

Ceci peut s'expliquer par le décalage en direction du vent de CEP par rapport au vent mesuré (environ 60 degrés en début de période).

Même si le conteneur le plus proche de la position finale réelle semble être celui immergé à 30%, la distance qu'a parcourue le vrai conteneur est semblable à celle du conteneur de MOTHY immergé à 60%, ce qui est une valeur proche de l'immersion réelle de l'objet. La vitesse de dérive simulée par MOTHY semble alors conforme à la réalité.

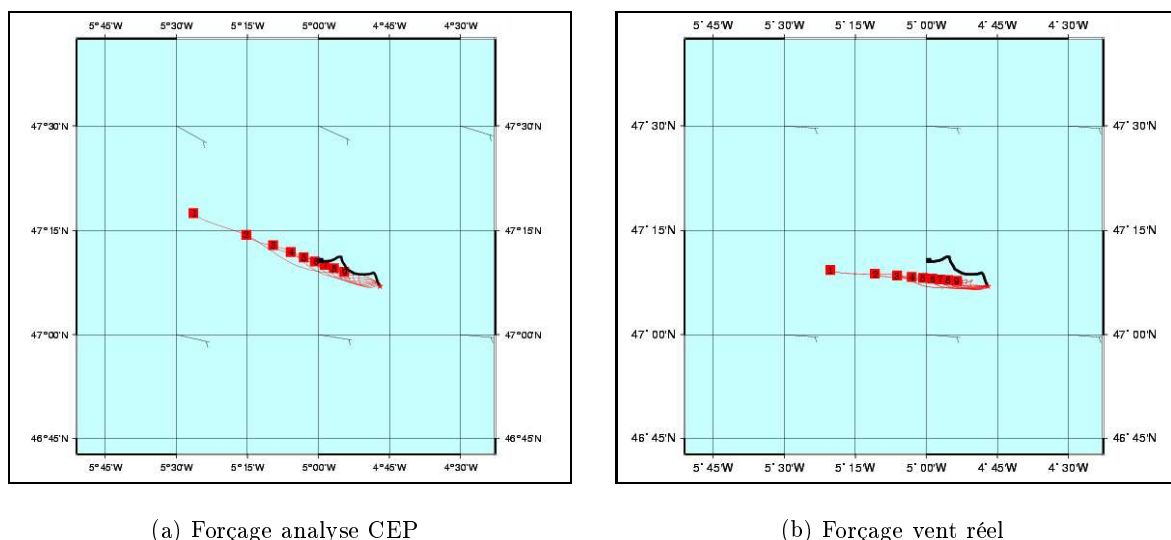


FIG. 2.6 – Dérive de MOTHY pour l'exercice Dourvac'h du 25 au 29 mai 1992, phase 1, échéance finale (en noir la trajectoire réelle, en rouge les trajectoires issues de MOTHY).

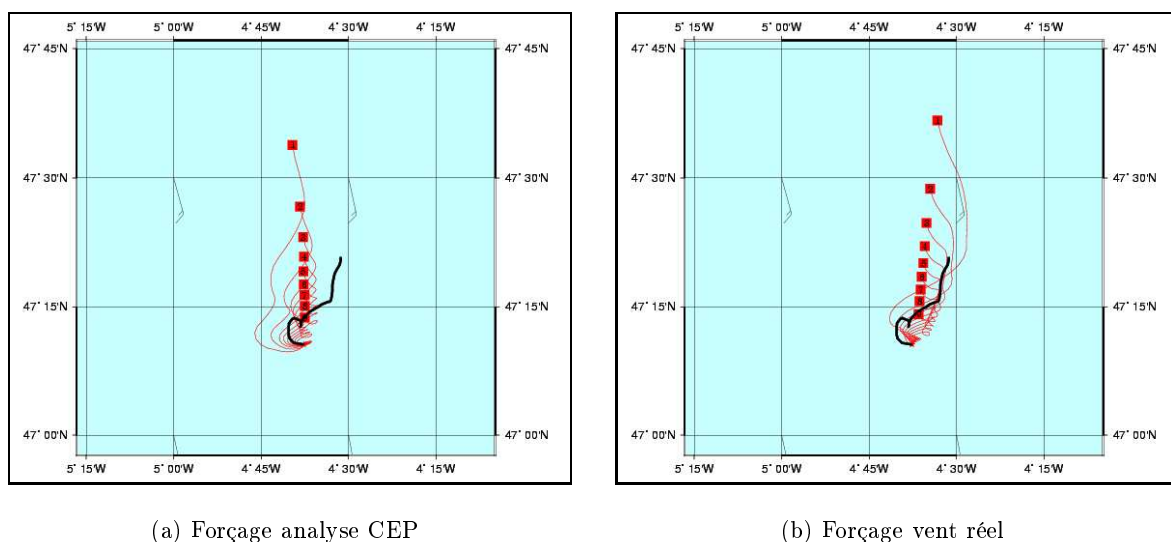


FIG. 2.7 – Dérive de MOTHY pour l'exercice Dourvac'h du 25 au 29 mai 1992, phase 2, échéance finale (en noir la trajectoire réelle, en rouge les trajectoires issues de MOTHY).

2.3.3 Navire MSC Martina

Des simulations sont réalisées avec marée et avec pour forçage atmosphérique les données d'analyse et de prévision d'ARPEGE et de CEP.

Les trajectoires modélisées pour les deux conteneurs sont toutes très proches des trajectoires réelles, les meilleures étant obtenues à l'aide du forçage issu des analyses ARPEGE (cf. FIG. 2.8). Les positions finales optimales sont presque confondues avec celles des conteneurs de MOTHY immergés à 50% pour le premier et 70% pour le second. La durée de la dérive est relativement courte pour les deux conteneurs (treize heures environ).

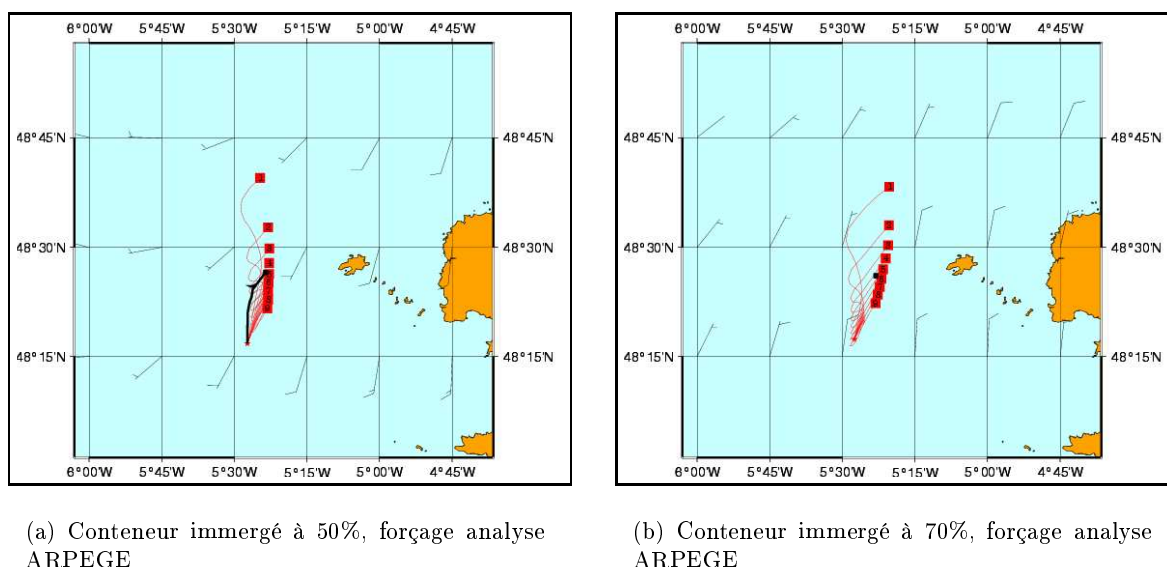


FIG. 2.8 – Dérive de MOTHY pour les conteneurs de l'accident du MSC Martina du 19 au 20 octobre 2000, échéance finale (en noir la trajectoire réelle, en rouge les trajectoires issues de MOTHY).

2.3.4 Mer de Norvège 2003

Des simulations sont réalisées sans marée, négligeable dans cette zone, et avec pour forçages atmosphériques les analyses et prévisions d'ARPEGE et CEP et les prévisions de NOGAPS. Les résultats du modèle norvégien LEEWAY (avec *LIFERAFT-DB20* comme type d'objet, forcé par les vents et les courants des modèles norvégiens) peuvent y être superposés (cf. FIG. 2.9).

Ce sont les conteneurs à forts taux d'immersion (de 70% à 90%) qui sont les plus proches de la position réelle de l'objet. Les moins immergés s'éloignent beaucoup trop rapidement sous l'emprise du vent.

Lors des toutes premières heures de simulation, MOTHY (quel que soit le forçage) et LEEWAY offrent des résultats similaires et proches de la réalité. Après cinq heures de simulation, la trajectoire réelle du canot amorce un mouvement très orienté vers l'est que les deux modèles (et en particulier MOTHY) semblent mal reproduire. Ceci est probablement lié à une variation du vent d'une durée inférieure à la résolution temporelle du forçage atmosphérique (6 heures pour MOTHY).

2. MOTHY

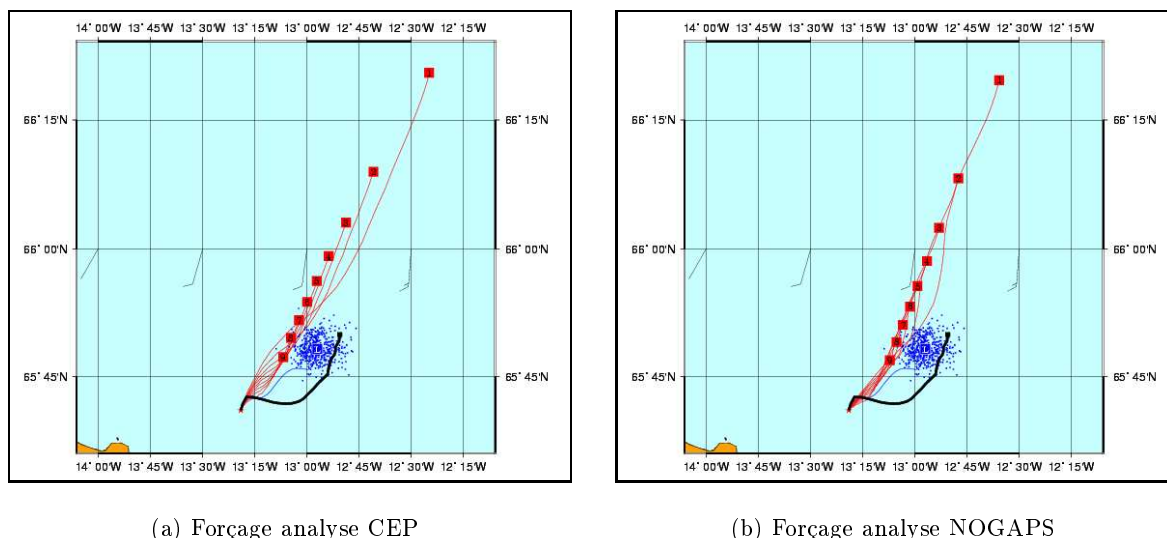


FIG. 2.9 – Comparaison des dérives de MOTHY et de LEEWAY pour l'exercice 2003 en mer de Norvège, échéance finale (en bleu, le nuage de positions prévues par LEEWAY, en noir la position réelle, en rouge celles modélisées par MOTHY).

2.3.5 Mer de Norvège 2004

Des simulations sont réalisées sans marée, elle est négligeable dans cette zone, et avec pour forçages atmosphériques les analyses et prévisions d'ARPEGE et CEP et les prévisions de NOGAPS et pour forçage océanique les courants de grande échelle de FOAM et MERCATOR. Les résultats du modèle norvégien LEEWAY (avec LIFERAFT-DB10 comme type d'objet, forcé par les vents et les courants des modèles norvégiens) peuvent y être superposés (cf. FIG. 2.10).

MOTHY et LEEWAY modélisent des dérives relativement proches.

La modélisation de LEEWAY semble parfaite sur ce cas puisque la position de repêchage du canot correspond exactement avec la moyenne de l'ensemble des positions calculées.

En ce qui concerne MOTHY, le forçage le plus adapté semble sur cette situation celui du modèle américain NOGAPS (cf. FIG. 2.10(a)). Les analyses de CEP et ARPEGE offrent des résultats satisfaisants mais légèrement plus éloignés du point de repêchage réel. La direction quasi constante du vent sur la durée de la simulation explique certainement en partie ces résultats similaires.

Les conteneurs les plus immergés (surtout ceux à 60% et 70%) semblent se rapprocher le plus de la modélisation de LEEWAY comme de la réalité. Les moins immergés s'éloignent beaucoup trop rapidement sous l'emprise du vent, qui pour cette période est assez fort (15 nœuds en tout début de période puis 25 à 30 nœuds ensuite).

Les courants de grande échelle semblent avoir peu d'influence ici sur la modélisation de la dérive par MOTHY (cf. 2.10(b).)

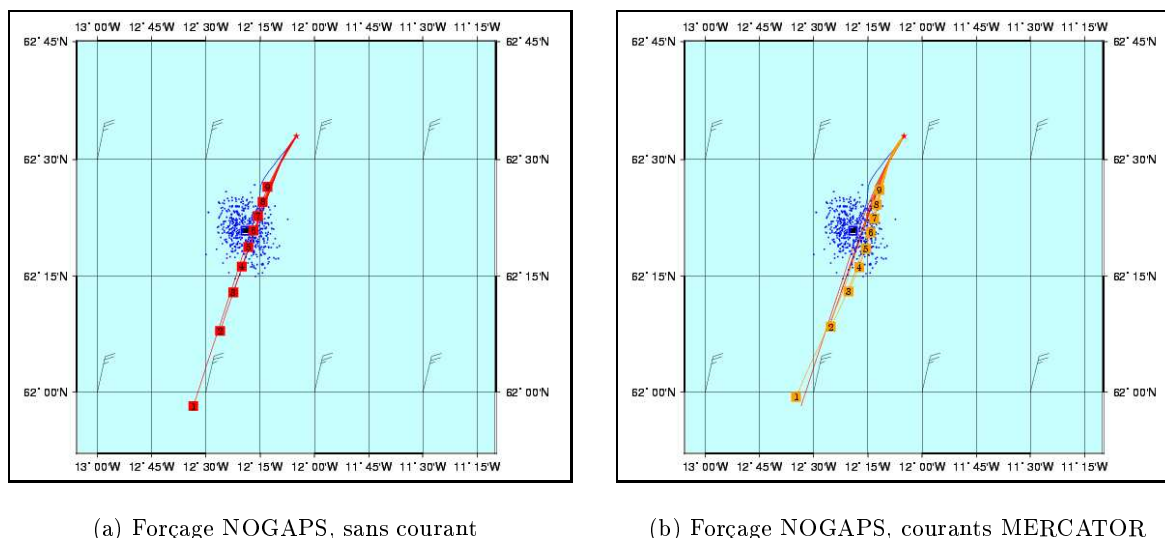


FIG. 2.10 – Comparaison des dérives de MOTHY et de LEEWAY pour l'exercice 2004 en mer de Norvège, échéance finale (en bleu, le nuage de positions prévues par LEEWAY, en noir la position réelle, en rouge les trajectoires issues de MOTHY sans courant et en orangé celles avec courant).

2.3.6 Méditerranée 2004

Cet exercice peut donner lieu à des simulations de MOTHY avec des courants permanents forts, sans marée (elle est négligeable en Méditerranée). La bouée dérivante est supposée se comporter comme une nappe de pétrole. MOTHY a donc été lancé dans sa version hydrocarbures (fuel lourd, masse volumique 930 kg.m^{-3}) et dans sa version objet avec pour forçage atmosphérique les analyses d'ARPEGE et de CEP. Le fonctionnement du modèle de nappe est présenté en annexe E. Les courants de grande échelle utilisés sont les moyennes sur trois mois de décembre des courants issus de MERCATOR.

Une seule simulation longue ne serait pas suffisante pour étudier correctement ce cas puisque des erreurs s'accumulent tout au long des calculs. Il paraît donc utile de réaliser des simulations avec des points de départ à trois jours d'intervalle :

- le 14/12/2004 à 08h38 UTC ($40^{\circ}39'N$, $2^{\circ}33'E$),
- le 17/12/2004 à 02h14 UTC ($40^{\circ}34'N$, $1^{\circ}39'E$),
- le 20/12/2004 à 01h36 UTC ($40^{\circ}12'N$, $2^{\circ}21'E$),
- le 23/12/2004 à 02h44 UTC ($40^{\circ}08'N$, $2^{\circ}47'E$).

Dans la légende des cartes illustrant cette situation, deux échéances sont précisées : pour la première le temps est décompté à partir de la date de départ de la simulation et pour la seconde, entre parenthèses, à partir du 14 décembre.

2. MOTHY

2.3.6.1 Simulation du 14 décembre

La trajectoire modélisée par MOTHY est mauvaise presque dès le début de la simulation, quel que soit le forçage atmosphérique utilisé. Une divergence entre la trajectoire réelle (vers le nord-ouest) et la trajectoire modélisée (vers le sud-ouest) apparaît vers l'échéance 30-36h (cf. FIG. 2.11(a)).

Le décalage par rapport à la réalité est très important et engendre une mauvaise modélisation pour toutes les échéances suivantes (cf. FIG. 2.11(b)). Seuls les conteneurs les plus immergés (80% et 90%) n'échouent pas à Majorque et continuent à dériver.

De plus, la nappe simulée par la version hydrocarbures de MOTHY semble avoir une vitesse de dérive proche de celle du conteneur immergé à 80% et est très en retard sur la réalité.

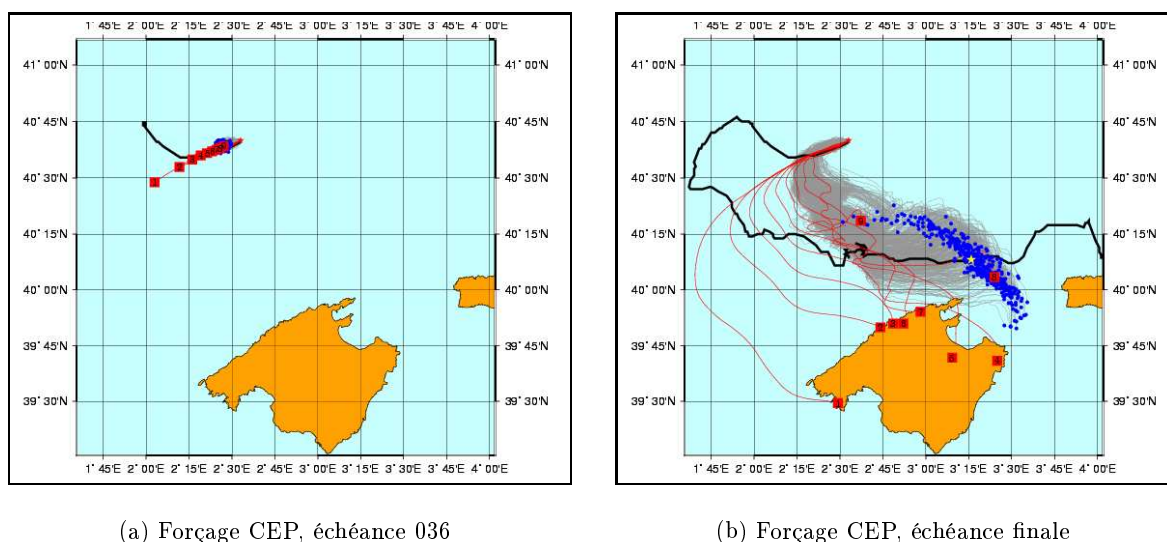


FIG. 2.11 – Dérive de MOTHY pour l'exercice en Méditerranée du 14 au 26 décembre 2004, point de départ le 14 décembre (en noir la trajectoire réelle, en rouge les trajectoires et les positions des conteneurs issus de MOTHY version OBJET, en bleu les positions des gouttelettes d'hydrocarbures, en gris les trajectoires de ces gouttes et en jaune le barycentre de la nappe).

2.3.6.2 Simulation du 17 décembre

La trajectoire modélisée par MOTHY prend une direction trop rapide vers le sud-est dès le début de la simulation, quel que soit le forçage atmosphérique utilisé (cf. FIG. 2.12(a)). Le décalage subi par rapport à la réalité induit une mauvaise modélisation pour toutes les échéances suivantes (cf. FIG. 2.12(b)). Seuls les conteneurs les plus immergés (70%, 80% et 90%) n'échouent pas à Majorque. Ici encore, la nappe simulée par la version hydrocarbures de MOTHY semble avoir une vitesse de dérive proche de celle du conteneur immergé à 80% et est très en retard sur la réalité.

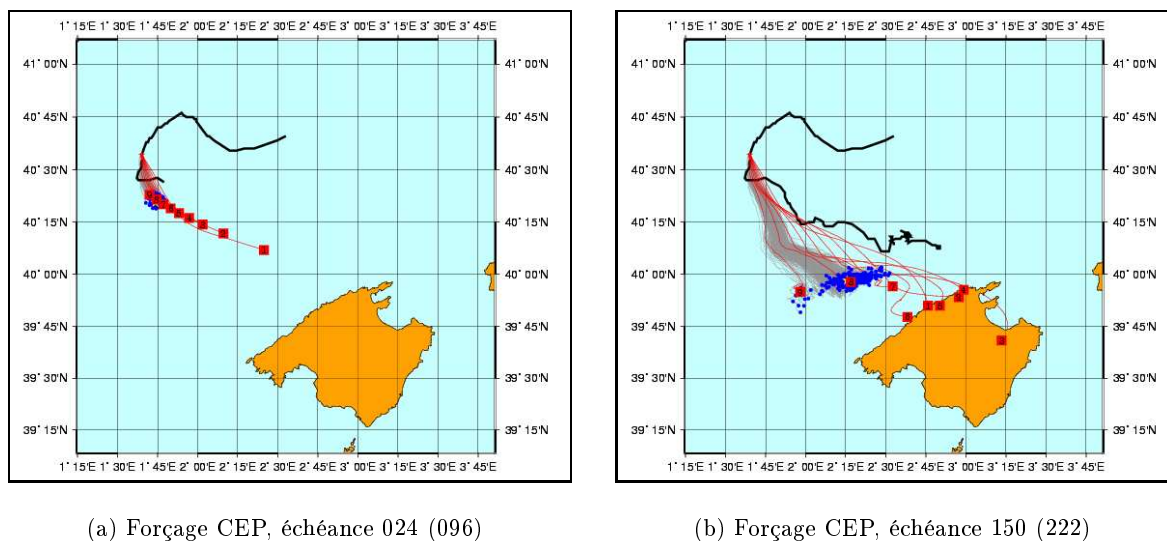


FIG. 2.12 – Dérive de *MOTHY* pour l'exercice en Méditerranée du 14 au 26 décembre 2004, point de départ le 17 décembre (même légende que pour la Fig. 2.11).

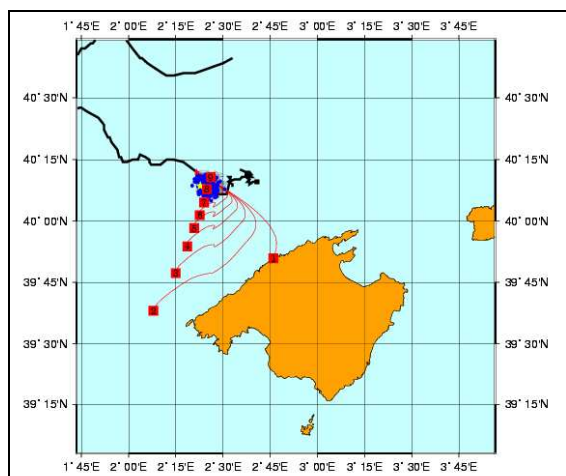
2.3.6.3 Simulation du 20 décembre

La bouée effectue des mouvements de faible amplitude sur place pendant une trentaine d'heures, ce qui est mal modélisé par *MOTHY* pour les conteneurs les moins immergés qui dérivent rapidement vers Majorque sous l'emprise du vent. Les conteneurs encore à l'eau se dirigent alors vers le sud-ouest alors que la trajectoire réelle est lente et vers l'est (cf. FIG. 2.13(a)). Leur mouvement vire ensuite à l'est mais le décalage avec la réalité est ici aussi trop important pour que la modélisation soit correcte aux échéances ultérieures (cf. FIG. 2.13(b)).

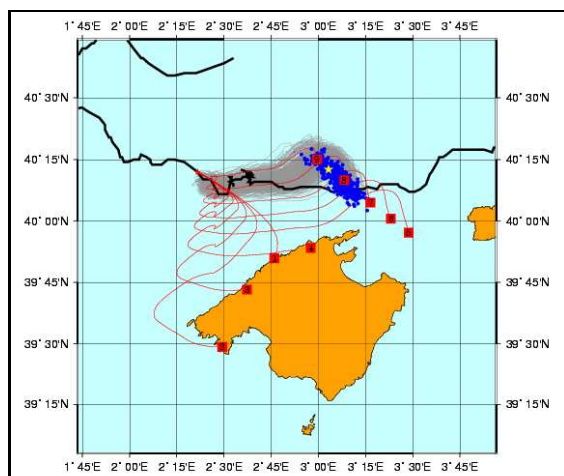
2.3.6.4 Simulation du 23 décembre

La trajectoire modélisée est ici correcte mais il s'agit de la période pendant laquelle la trajectoire réelle est la plus constante. C'est le comportement du conteneur immergé à 40% qui semble se rapprocher au mieux de celui de la bouée, la nappe d'hydrocarbures marquant un retard non négligeable (cf. FIG. 2.14).

2. MOTHY



(a) Forçage CEP, échéance 066 (210)



(b) Forçage CEP, échéance 150 (294)

FIG. 2.13 – Dérive de MOTHY pour l'exercice en Méditerranée du 14 au 26 décembre 2004, point de départ le 20 décembre (même légende que pour la Fig. 2.11).

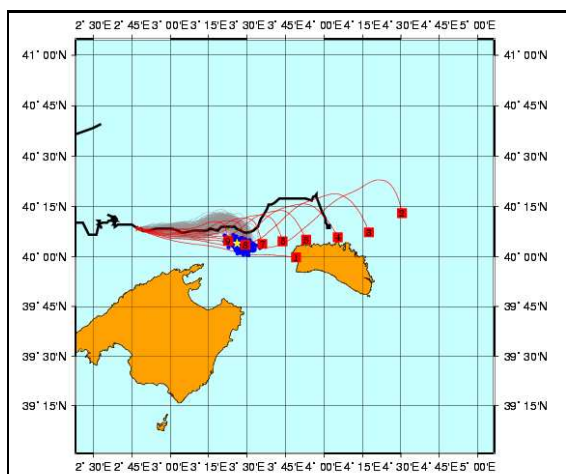


FIG. 2.14 – Dérive de MOTHY pour l'exercice en Méditerranée du 14 au 26 décembre 2004, point de départ le 23 décembre, forçage CEP, échéance 078 (294), (même légende que pour la Fig. 2.11).

2.3.6.5 Bilan

Cette bouée a beaucoup plus de prise au vent qu'une nappe d'hydrocarbures et se déplace plus rapidement, à une vitesse proche de celle modélisée dans MOTHY pour un conteneur immergé à 40%. Cette situation est de longue durée et la trajectoire réelle de la bouée est complexe, ce qui rend la comparaison des modélisations à la réalité très difficile, puisqu'un décalage subi à un moment ne peut être corrigé.

Les courants de grande échelle sont de forte intensité en Méditerranée et le fait d'utiliser des moyennes de courant gomme des effets locaux importants.

2.3.7 Bilan

Il ressort tout d'abord de ces études que MOTHY peut simuler correctement les dérives d'objets à la mer.

Ensuite, le fait de n'avoir pour catégorie d'objet que le conteneur et d'utiliser le taux d'immersion pour différencier les objets entre eux pose problème. D'une part, les caractéristiques propres, liées à la géométrie, de chaque objet ne peuvent être prises en compte correctement. D'autre part, la zone de recherche définie par MOTHY est une ligne constituée des positions de neuf objets dont certains ont des taux d'immersion peu réalistes (les conteneurs de taux d'immersion 10% et 20% ne sont jamais au plus près des positions observées et semblent avoir trop de prise au vent). La ligne n'est pas une zone idéale pour l'organisation de recherches efficaces.

De plus, la force de portance génératrice de la divergence de l'objet par rapport à la direction du vent est ignorée alors que pour certains types d'objets elle est loin d'être négligeable.

Enfin, la sensibilité de MOTHY aux conditions de forçage, atmosphérique comme océanique, semble revêtir une certaine importance et il conviendrait de l'étudier plus en profondeur afin mieux prendre en compte les incertitudes qui y sont attachées.

3 Sensibilité du modèle d'objet aux forçages

Le mouvement de l'objet est calculé à partir du vent, du courant calculé par MOTHY (incluant la marée si elle est prise en compte) et du courant permanent issu d'un modèle océanique opérationnel (FOAM, MERCATOR, MFS).

Le vent et le courant permanent sont entachés d'une incertitude. Celle-ci peut être faible si on travaille avec des analyses en forçage mais pourrait prendre des valeurs non négligeables dans le cas de l'utilisation de prévisions, ce qui est le cas lors de l'utilisation opérationnelle de MOTHY. Nous pouvons tenter d'évaluer la sensibilité du modèle à ces paramètres et d'introduire des modifications pour la prendre en compte.

3.1 Sensibilité au forçage atmosphérique

Une manière d'introduire une incertitude sur le vent est d'appliquer dans le modèle d'objet une correction arbitraire en direction et en module au vecteur vent qui s'applique au conteneur.

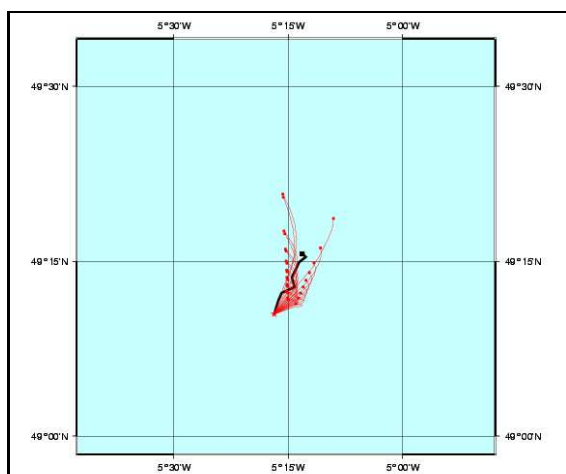
Cependant, la façon la plus rigoureuse de prendre en compte les erreurs possibles dans le forçage de vent est d'utiliser soit plusieurs modèles (ARPEGE, CEP, NOGAPS, etc.), soit la PEARP. Pour celle-ci, un problème se pose puisque ses données ne sont disponibles que sur un domaine limité et une période relativement récente. Elles ne sont en effet archivées quotidiennement que depuis septembre 2004. Cette méthode peut tout de même être testée sur les situations récentes de dérives en Méditerranée.

3.1.1 Approche multi-modèles

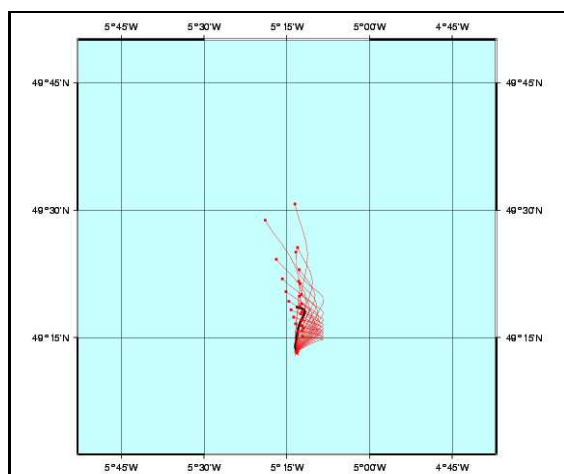
Des simulations ont été réalisées en utilisant des forçages différents : analyses et prévisions de CEP, d'ARPEGE (quand il était disponible) et analyses de NOGAPS. De manière générale, les analyses des trois modèles sont très proches les unes des autres mais les prévisions s'en éloignent un peu. On peut représenter sur une même carte les simulations basées sur tous les modèles (cf. FIG. 3.1). Remarquons tout de même que dans un cadre opérationnel, seules les prévisions sont disponibles.

Dans l'ensemble, la zone des positions possibles est assez large, même pour les simulations de courte durée. Elle ne contient pas toujours la position finale réelle de l'objet. Cette représentation permet cependant d'avoir une meilleure idée de la zone de recherche que lorsqu'on n'utilise qu'un seul modèle de forçage.

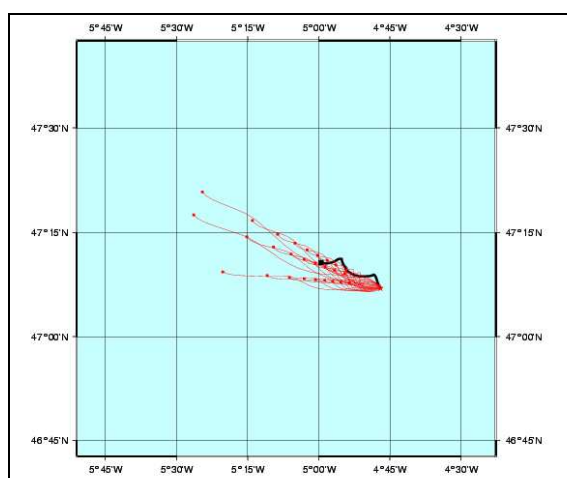
3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES



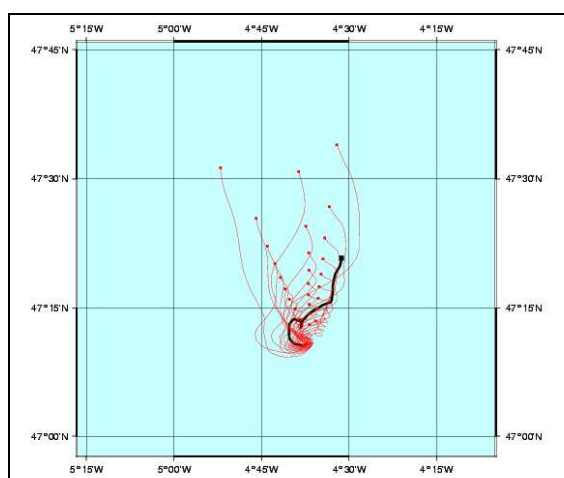
(a) Dourvac'h 1991, phase 1



(b) Dourvac'h 1991, phase 2



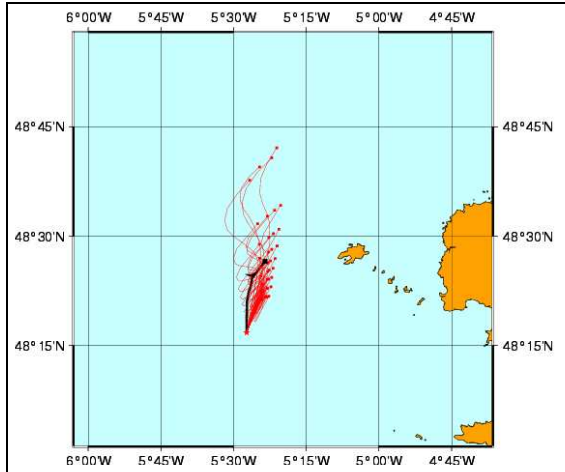
(c) Dourvac'h 1992, phase 1



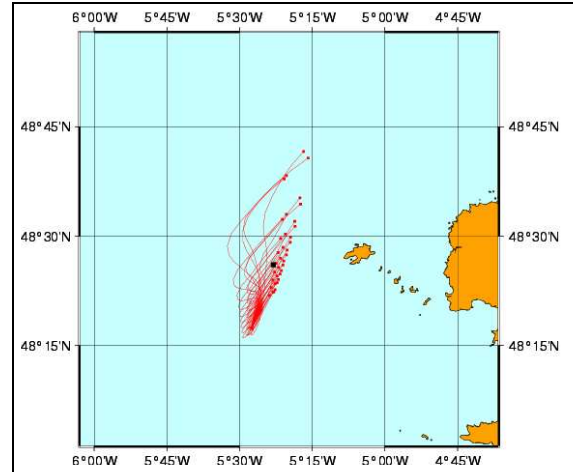
(d) Dourvac'h 1992, phase 2

FIG. 3.1 – Dispersion des positions pour différents forçages atmosphériques, partie 1 (en noir la trajectoire et la position réelles, en rouge les modélisations de MOTHY basées sur l'analyse et la prévision de CEP).

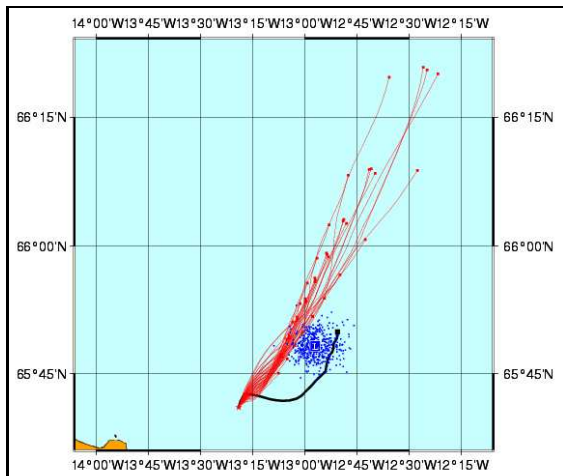
3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES



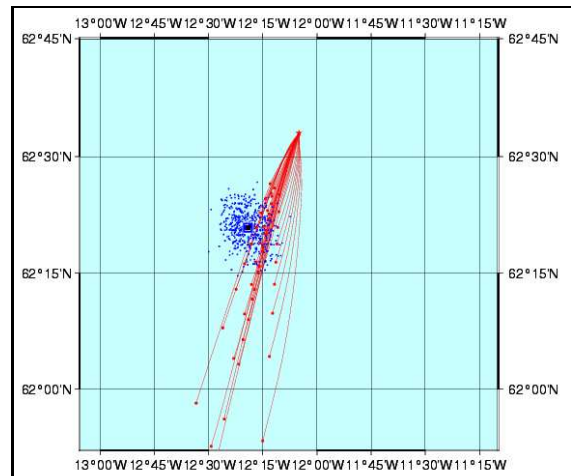
(e) MSC Martina, conteneur immergé à 50%



(f) MSC Martina, conteneur immergé à 70%



(g) Mer de Norvège 2003



(h) Mer de Norvège 2004

FIG. 3.1 – Dispersion des positions pour différents forçages atmosphériques, partie 2 (en noir la trajectoire et la position réelles, en rouge les modélisations de MOTHY basées sur les analyses et les prévisions de CEP, ARPEGE pour tous les cas et l'analyse de NOGAPS pour les exercices en mer de Norvège).

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES

3.1.2 Correction arbitraire

Pour un taux d'immersion donné, on peut appliquer au conteneur le vent issu du forçage atmosphérique ou bien un vent auquel on aurait arbitrairement appliqué une perturbation. Plusieurs modes de perturbation existent mais un seul est ici testé. Le module et la direction du vent sont chacun corrigés de manière gaussienne. On pourrait aussi perturber directement les composantes u et v du vent.

Il reste à fixer l'ordre de grandeur de la perturbation ainsi qu'à savoir si elle doit rester constante tout au long de la simulation ou bien varier à chaque nouveau calcul de position (toutes les cinq minutes par défaut). Les perturbations introduites dans le modèle norvégien varient à chaque pas de temps mais celui-ci est d'une heure.

Pour chiffrer l'ordre de grandeur des corrections que nous voulons appliquer, il est utile de comparer pour certaines des situations étudiées, sur toute la longueur de la dérive, les valeurs de force et de direction de vent des forçages disponibles, qui proviennent des analyses comme des prévisions. Ces comparaisons ont été réalisées en choisissant la valeur du vent au point de grille le plus proche de la dernière observation de l'objet. Les durées de simulation sont différentes et généralement inférieures à 48 h.

Il ressort de toutes ces comparaisons que :

- la direction du vent varie dans une plage de valeurs d'amplitude maximale de 60 degrés,
- la force du vent issue des modèles est souvent lissée par rapport au vent mesuré (lorsqu'il est disponible) et l'amplitude des plages de valeurs est voisine de 30% de la valeur maximale modélisée.

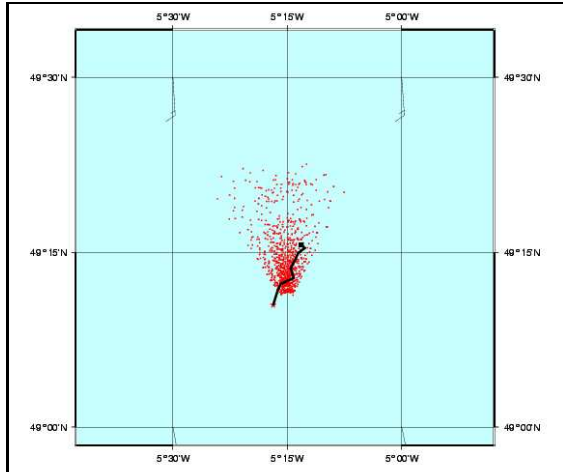
Nous choisissons de plus de garder la perturbation constante tout au long de la simulation. Alors, afin de ne pas avoir un arc de trajectoire trop large, les premières corrections choisies ne balayent pas la totalité de ces plages :

- le vecteur de celles appliquées au module est un vecteur gaussien de facteurs correctifs multiplicatifs de moyenne 1 et d'écart-type 0.10 (de dimension 100),
- le vecteur de celles liées à la direction est un vecteur gaussien de moyenne 0 et d'écart-type 15 degrés (de dimension 100).

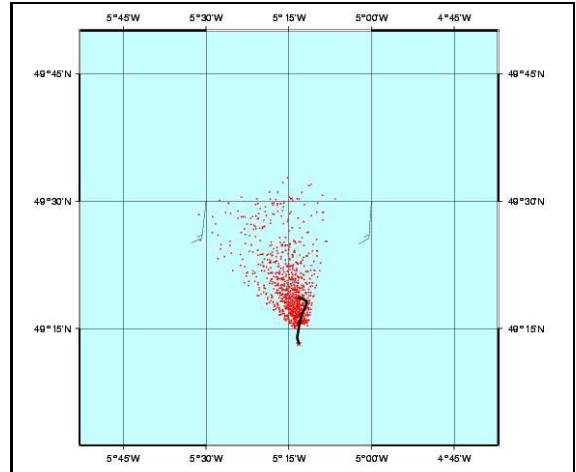
Pour chaque simulation nous disposons donc de 900 objets : 9 taux d'immersion pour chacun desquels il existe 100 perturbations du vent. Ces corrections ont dans un premier temps été appliquées sur les cas en mer de Norvège, ceux du Dourvac'h et celui du navire MSC Martina.

Sans ces corrections, nous disposons de neuf trajectoires, toutes selon des axes très proches et qui ne diffèrent que par la distance de la position modélisée à celle du point de départ. En appliquant ces corrections, les positions possibles définies par le modèle sont réparties sur une surface qui permettrait de définir une zone de recherche (cf. FIG. 3.2). Dans tous les cas, cette zone étant plus large, la modélisation inclut la position réelle (cf. TAB. 3.1). Cependant, l'étendue spatiale couverte par les particules est souvent très importante et un ciblage plus précis des taux d'immersion en fonction de l'objet considéré permettrait certainement de réduire de manière optimale la zone de recherche. De plus, les valeurs d'écarts-types de vecteurs de correction ont été fixées arbitrairement et il apparaît indispensable d'en tester plusieurs autres, notamment pour les corrections angulaires qui jouent sur la largeur de la zone décrite par les positions possibles.

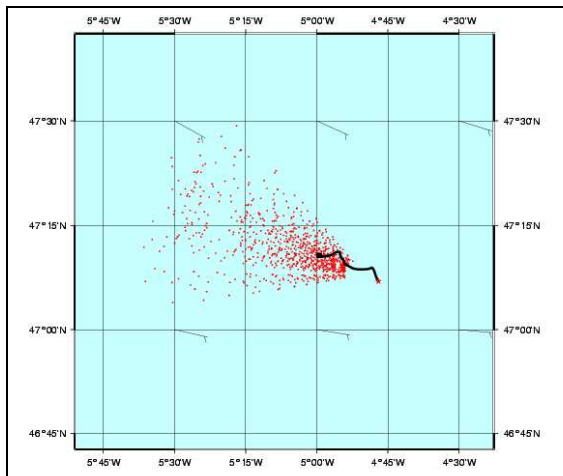
3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES



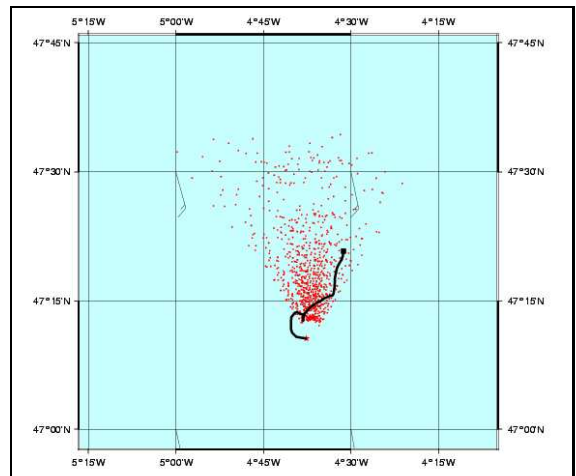
(a) Dourvac'h 1991, phase 1, analyse CEP



(b) Dourvac'h 1991, phase 2, analyse CEP



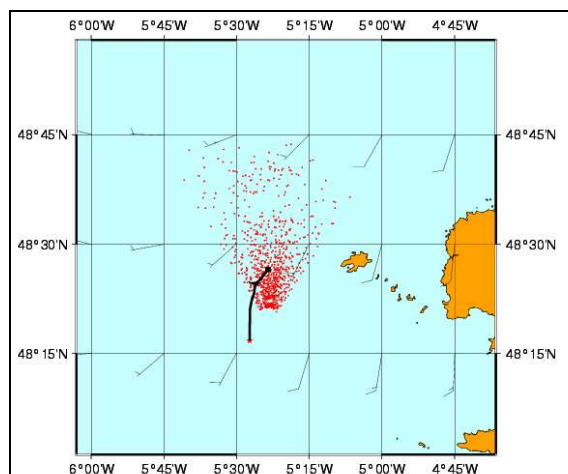
(c) Dourvac'h 1992, phase 1, analyse CEP



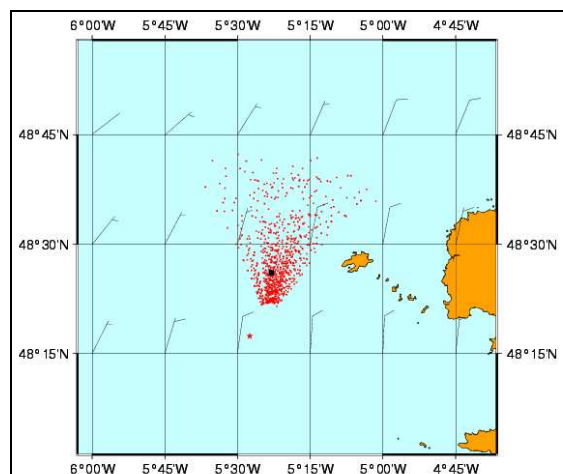
(d) Dourvac'h 1992, phase 2, analyse CEP

FIG. 3.2 – Influence de corrections arbitraires gaussiennes en module et direction sur le forçage de vent pour différentes situations, partie 1 (en noir la trajectoire et la position réelles, en rouge les modélisations de MOTHY).

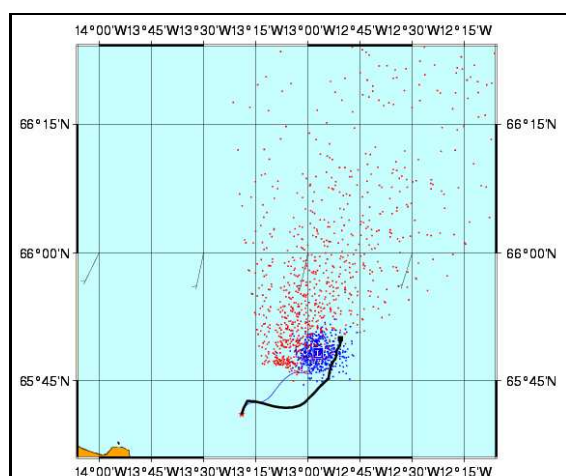
3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES



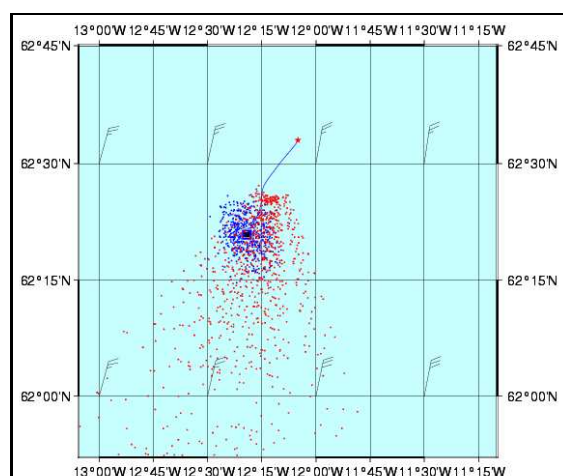
(e) MSC Martina, conteneur immergé à 50%, analyse ARPEGE



(f) MSC Martina, conteneur immergé à 70%, analyse ARPEGE



(g) Mer de Norvège 2003, analyse CEP



(h) Mer de Norvège 2004, analyse CEP

FIG. 3.2 – Influence de corrections arbitraires gaussiennes en module et direction sur le forçage de vent pour différentes situations, partie 2 (en noir la trajectoire et la position réelles, en rouge les modélisations de MOTHY).

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES

Situation	Forçage	Ech.	Sans cor.		Avec cor.				
			Imm.	Dist.	Imm.	Dist.	Angle	Facteur	Zone
Dourvac'h 1991	1 CEP	008 (017)	30%	1,393	30%	0,234	-18	1,01	OUI
Dourvac'h 1991	2 CEP	010 (030)	50%	0,178	50%	0,054	1	0,97	OUI
Dourvac'h 1992	1 CEP	022 (040)	70%	0,842	70%	0,101	-3	1,14	OUI
Dourvac'h 1992	2 CEP	036 (088)	30%	3,853	30%	0,485	-18	1,01	OUI
Met,no 2003	CEP	024 (035)	70%	5,073	60%	0,069	-28	0,90	OUI
Met,no 2003	ARPEGE	024 (035)	70%	4,908	60%	0,130	-28	0,90	OUI
Met,no 2004	CEP	016 (038)	70%	2,039	70%	0,139	-12	1,07	OUI
Met,no 2004	ARPEGE	016 (038)	70%	2,297	60%	0,177	-16	0,83	OUI
MSC Martina	1 CEP	014 (030)	50%	1,425	50%	0,149	9	0,95	OUI
MSC Martina	1 ARPEGE	014 (030)	50%	0,512	50%	0,127	3	1,04	OUI
MSC Martina	2 CEP	014 (032)	70%	1,345	60%	0,133	13	0,95	OUI
MSC Martina	2 ARPEGE	014 (032)	60%	0,812	50%	0,102	8	0,90	OUI

TAB. 3.1 – *Comparaison des distances du conteneur le plus proche au point d'arrivée et caractéristiques des conteneurs concernés avec et sans correction appliquée au vent (Ech. = échéance finale par rapport au point de départ de la modélisation et, entre parenthèses, par rapport à l'origine temporelle du forçage atmosphérique, Cor. = correction, Imm. = immersion, Dist. = distance en milles nautiques, Angle = angle par rapport à la direction du vent en degrés, Zone = point de repêchage inclus dans la zone définie par MOTHY).*

3.1.3 Utilisation de la PEARP

Des simulations utilisant les prévisions de la PEARP ont été réalisées pour les situations en Méditerranée du 14 au 25 décembre 2004 concernant la bouée et entre le 15 janvier et le 15 mars 2005 pour le flotteur-profileur.

Pour ces périodes, les données de pression atmosphérique et de vent à dix mètres ont été extraites par pas de trois heures de 0 à 54 heures (l'analyse est celle de 18 heures) sur une grille de 0,5 degré, pour le run non perturbé (PA18) et les dix runs perturbés.

Pour chaque journée du 14 au 25 décembre, et du 15 janvier au 13 mars, onze simulations ont donc été lancées, avec pour point de départ la donnée de position la plus proche de 18 heures.

De toutes les méthodes pour perturber le vent dans MOTHY, la plus rigoureuse semble l'utilisation de la PEARP puisque ses perturbations sont liées à la météorologie et ne sont pas fixées de façon arbitraire. Cependant, elle présente pour le moment un inconvénient majeur dans le cadre d'une utilisation opérationnelle. En effet, il faut lancer une simulation par run de modèle disponible, ce qui multiplie par onze le temps de calcul nécessaire à l'obtention des résultats. Il paraît donc intéressant d'étudier plusieurs valeurs d'écarts-types pour les perturbations évoquées en 3.1.2 et de comparer visuellement les modélisations obtenues à celles issues de la PEARP. Ainsi, pour chacune de ces journées, des simulations avec la version de MOTHY incluant une perturbation du vent ont été lancées. Le forçage atmosphérique était celui de la PA18. Les perturbations du module du vent sont celles décrites en 3.1.2. Celles concernant sa direction sont similaires mais l'écart-type est de 5, 10 ou 15 degrés.

Le fait d'être en Méditerranée impose d'ajouter aux courants de MOTHY des courants de grande échelle.

3.1.3.1 Méditerranée 2004

Pour cette situation, seuls les forçages de courant issus des moyennes de MERCATOR ont été utilisés.

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES

Dans huit cas sur douze, la modélisation à 54 h est correcte.

De plus, dans tous les cas, la dispersion des positions prévues par la PEARP est bien moindre que lorsqu'on applique une perturbation gaussienne au vent de la PA18. En effet, toutes les modélisations de la PEARP sont incluses dans la zone définie par la version générant une perturbation sur le vent pour :

- sept cas sur douze lorsque l'écart-type pour la correction de la direction est de 5 degrés,
- huit cas sur douze lorsque l'écart-type pour la correction de la direction est de 10 degrés,
- tous les cas lorsque l'écart-type pour la correction de la direction est de 15 degrés.

3.1.3.2 Méditerranée 2005

Pour cette situation, des simulations ont été réalisées avec les forçages océaniques issus des moyennes mensuelles de MERCATOR sur trois années, de MERCATOR et de FOAM.

Le flotteur semble avoir peu de prise au vent et sa vitesse de dérive est comparable à celle du conteneur immergé à 90%.

Quel que soit le forçage de grande échelle utilisé, les résultats des prévisions à 54 h sont le plus souvent très éloignés de la réalité. La modélisation est considérée mauvaise dans :

- 67% des cas pour le forçage océanique des moyennes MERCATOR,
- 70% des cas pour le forçage océanique de MERCATOR,
- 70% des cas pour le forçage océanique de FOAM.

Ce mauvais résultat est probablement dû à une mauvaise prise en compte de courants locaux par les modèles.

Tous forçages de courants confondus, les modélisations de la PEARP sont incluses dans la zone définie par la version générant une perturbation sur le vent pour :

- environ 70% des cas lorsque l'écart-type pour la correction de la direction est de 5 degrés,
- environ 80% des cas lorsque l'écart-type pour la correction de la direction est de 10 degrés,
- environ 85% des cas lorsque l'écart-type pour la correction de la direction est de 15 degrés.

Dans 15% des cas environ, les perturbations générées aléatoirement ne suffisent pas à reproduire celles induites par la PEARP.

L'exemple de la figure 3.3 illustre clairement ce fait. En effet, pour cette journée du 9 février 2005, la modélisation basée sur le run non perturbé est mauvaise mais une autre basée sur un des runs perturbés se rapproche un peu plus de la réalité. La journée du lendemain offre une situation similaire.

Si on examine les prévisions des différents runs de la PEARP du 9 février à 18 h, on remarque systématiquement le creusement d'une zone dépressionnaire entre 0 et 48 h là où nous simulons les dérives (cf. FIG 3.5). Les différences entre les prévisions résident dans la valeur minimale de la dépression, la position de ce minimum et l'existence d'un ou deux minimums. Ceci engendre pour la position de départ de notre simulation (34°43'N 30°44'E) des vents de forces et surtout de directions très différentes les uns des autres pour les différents runs (cf. FIG. 3.4).

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES

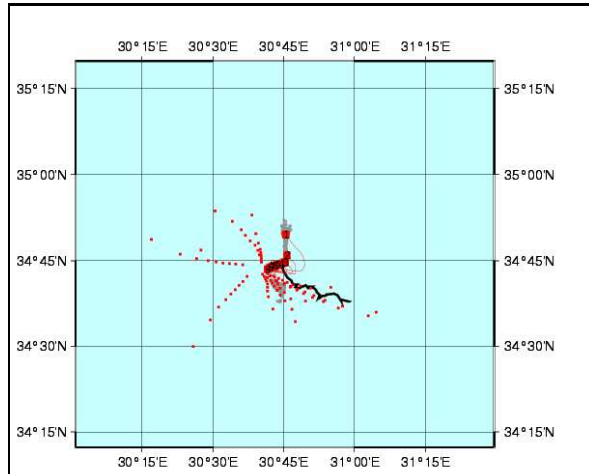


FIG. 3.3 – Simulations issues de la PEARP et de la version de MOTHY incluant une perturbation sur le vent avec un écart-type de 5 degrés pour la direction, pour la journée du 9 février 2005, échéance 54 h (en noir la position réelle du flotteur, les carrés rouges numérotés sont les positions issues du run non perturbé, les points rouges celles issues des runs perturbés, les points gris celles issues de la version de MOTHY perturbant le vent).

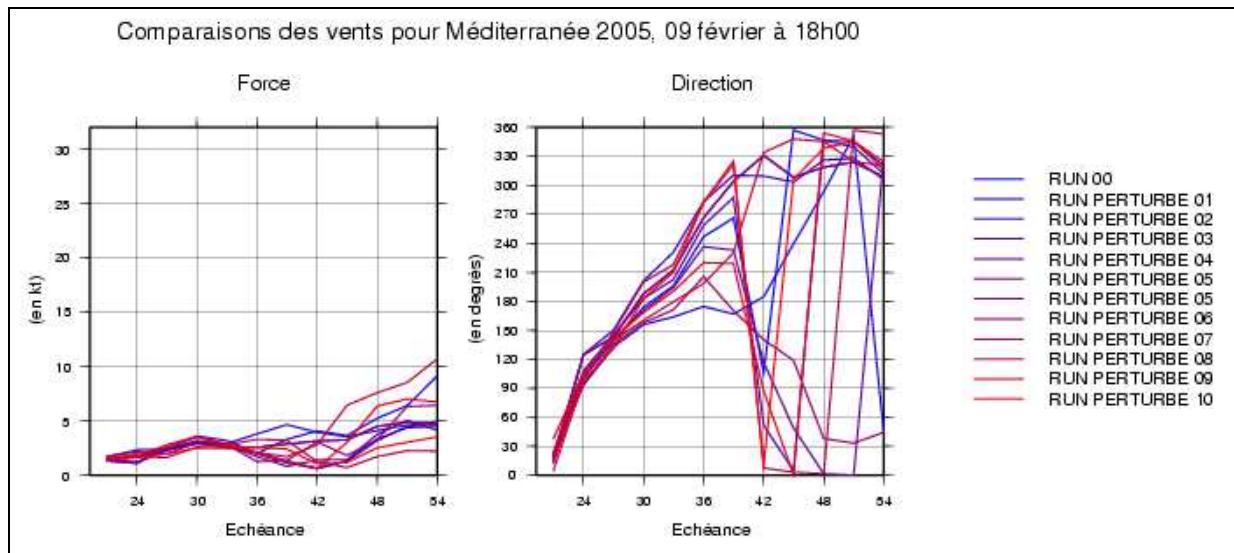


FIG. 3.4 – Valeurs de force et direction du vent prévues par les runs de la PEARP du 9 février 2005 à 18 h au point de départ de la simulation de dérive ($34^{\circ}43'N$ $30^{\circ}44'E$).

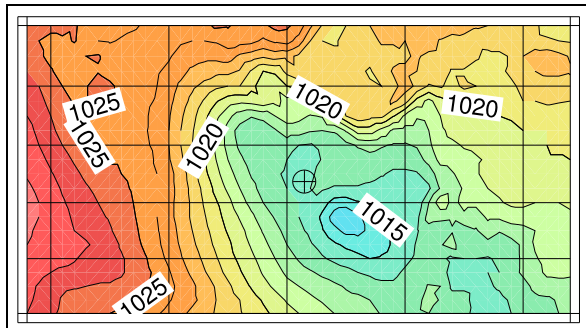
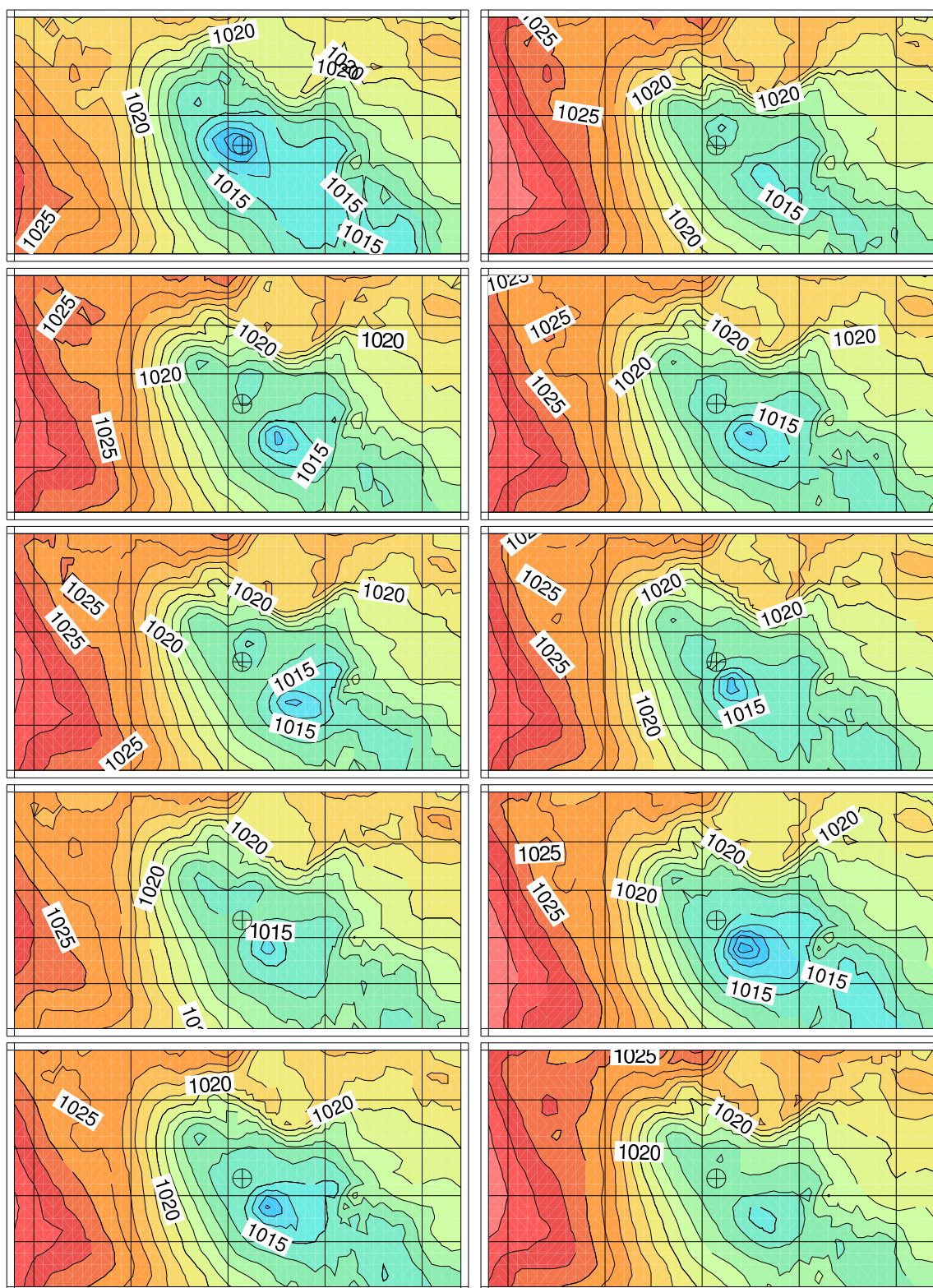


FIG. 3.5 – Prévision à 48 h de pression au niveau de la mer en hPa pour les runs de la PEARP du 9 février 2005 à 18 h, partie 1 (la position du point de départ de la simulation est une croix encerclée).

(a) Run non perturbé

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES



(b) Les 10 runs perturbés

FIG. 3.5 – Prédiction à 48 h de pression au niveau de la mer en hPa pour les runs de la PEARP du 9 février 2005 à 18 h, partie 2 (la position du point de départ de la simulation est une croix encerclée).

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES

3.1.4 Bilan

Il ressort de l'étude de toutes ces simulations l'importance cruciale de la qualité du forçage atmosphérique dans MOTHY. Une méthode de perturbation arbitraire du vent a été testée et permet dans de nombreux cas de simuler la variabilité du vent. Cependant, dans de plus rares circonstances, elle est mise en échec et la dispersion des solutions est telle qu'un seul des forçages issus de la PEARP induit une bonne modélisation de dérive.

Ainsi, l'utilisation systématique des forçages atmosphériques issus de la PEARP semble être la voie à suivre dans l'exploitation opérationnelle de MOTHY pour offrir à l'utilisateur une modélisation de dérive tenant compte au mieux de la variabilité du vent. La difficulté liée à l'utilisation de la PEARP réside dans le temps de calcul, fortement rallongé. Une optimisation des scripts de lancement du modèle permettrait certainement de réduire ce temps.

3.2 Impact du courant de grande échelle

Sur les deux situations de dérive en Méditerranée, des simulations peuvent être effectuées avec des forçages de courants de grande échelle différents.

3.2.1 Méditerranée 2004

Les courants issus des moyennes mensuelles de MERCATOR sur trois années, de MERCATOR, FOAM, MFS et NWMED, avec les analyses d'ARPEGE ou de CEP comme forçage atmosphérique peuvent ici être utilisés dans des simulations avec pour point de départ les 14, 17, 20 et 23 décembre. Le niveau 100 mètres semble convenir pour le courant de grande échelle, les différents modèles ayant une profondeur de couche de mélange océanique inférieure à 100 mètres dans la zone considérée (cf. FIG.3.6).

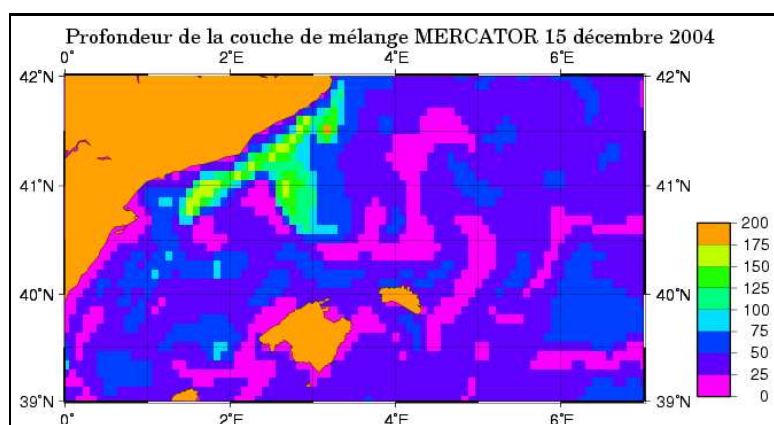


FIG. 3.6 – Épaisseur de la couche de mélange, modélisée par MERCATOR, pour le 15 décembre 2004.

Les différents courants ne semblent dans l'ensemble pas générer de trajectoires très distinctes les unes des autres. Il est nécessaire de s'intéresser aux cas où les dérives sont mal modélisées.

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES

3.2.1.1 Mauvaise modélisation du 21 décembre

Le mouvement de faible amplitude de la bouée les 20 et 21 décembre (cf. FIG. 3.7) est, quels que soient les forçages océaniques et atmosphériques, systématiquement mal modélisé. Pour cette journée, le vent comme le courant sont relativement faibles mais pas suffisamment pour que MOTHY simule correctement le mouvement "sur place" de la bouée.

Nous pouvons de plus remarquer, dans les variations de position, l'influence prédominante des forçages océaniques par rapport aux forçages atmosphériques.

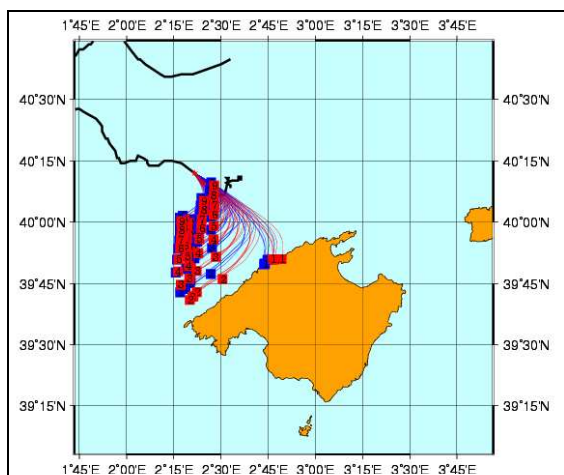


FIG. 3.7 – Dérive de MOTHY pour l'exercice en Méditerranée du 14 au 26 décembre 2004, point de départ le 20 décembre, échéance 36, multiples forçages de courants (en noir la trajectoire réelle, en bleu les trajectoires et les positions des conteneurs issus des forçages de CEP, en rouge ceux issus des forçages d'ARPEGE).

3.2.1.2 Mauvaise modélisation du 15 décembre

Aucun des courants de grande échelle ne permet de modéliser correctement le changement brutal de trajectoire qui a lieu vers l'échéance 30-36h (cf. FIG. 3.8).

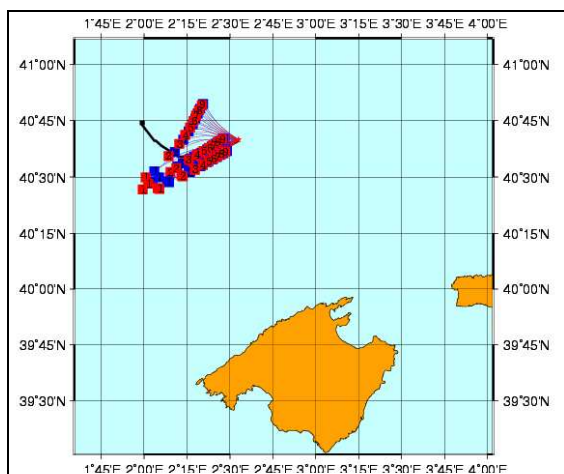


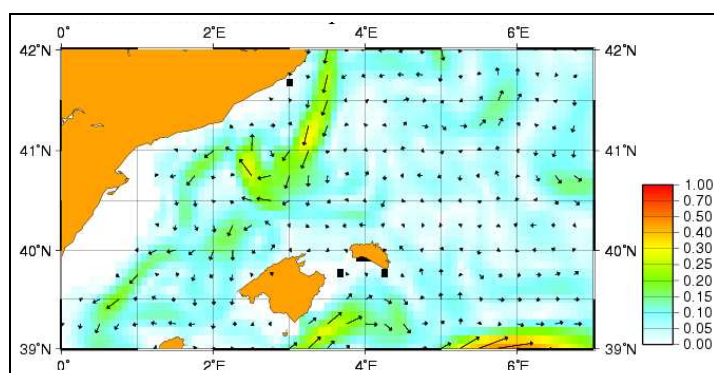
FIG. 3.8 – Dérive de MOTHY pour l'exercice en Méditerranée du 14 au 26 décembre 2004, point de départ le 14 décembre, échéance 36, multiples forçages de courants (en noir la trajectoire réelle, en bleu les trajectoires et les positions des conteneurs issus des forçages de CEP, en rouge ceux issus des forçages d'ARPEGE).

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES

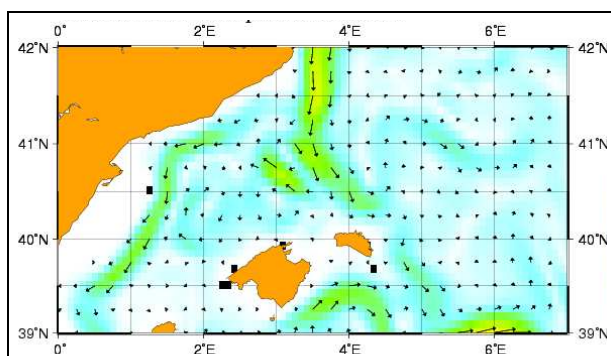
Cependant, à proximité de la position de l'objet les 14 et 15 ($40^{\circ}35'N$, $2^{\circ}15'E$) se trouve un tourbillon générant une zone de fort courant de sud-est modélisée à des positions légèrement différentes par les modèles MERCATOR ($40^{\circ}45'N$, $2^{\circ}30'E$, cf. FIG. 3.9(a)), MFS ($40^{\circ}45'N$, $3^{\circ}00'E$, cf. FIG. 3.9(b)) et sa version imbriquée NWMED (même position que pour MFS, cf. FIG. 3.9(c)).

Notons que le tourbillon n'apparaît ni dans les moyennes de MERCATOR (cf. FIG. 3.9(d)) ni dans les données de FOAM (cf. FIG. 3.9(e)). Ce courant a la même direction que la trajectoire de notre bouée et pourrait expliquer la variation brutale de la dérive.

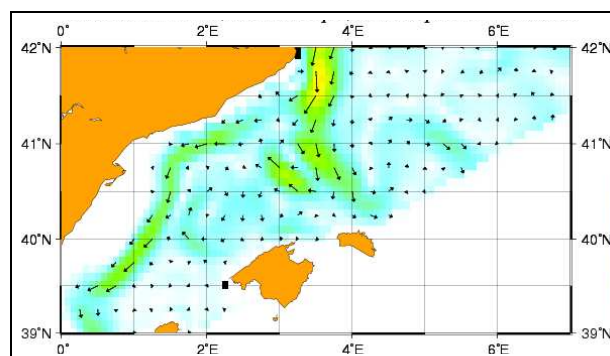
La superposition des modélisations réalisées à partir des cinq forçages de courant laisse apparaître des divergences très significatives. Le mouvement dû au courant de grande échelle semble ici avoir beaucoup plus d'importance dans le mouvement de l'objet que ceux dus à l'effet du vent et au courant calculé grâce au modèle d'océan de MOTHY : les légères différences dans les forçages atmosphériques semblent négligeables.



(a) Courants MERCATOR à 102m



(b) Courants MFS à 102m



(c) Courant NWMED (MFS Imbriqué) à 100m

FIG. 3.9 – Courants (en $m \cdot s^{-1}$) issus des modèles océaniques opérationnels pour la journée du 15 décembre 2004, partie 1.

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES

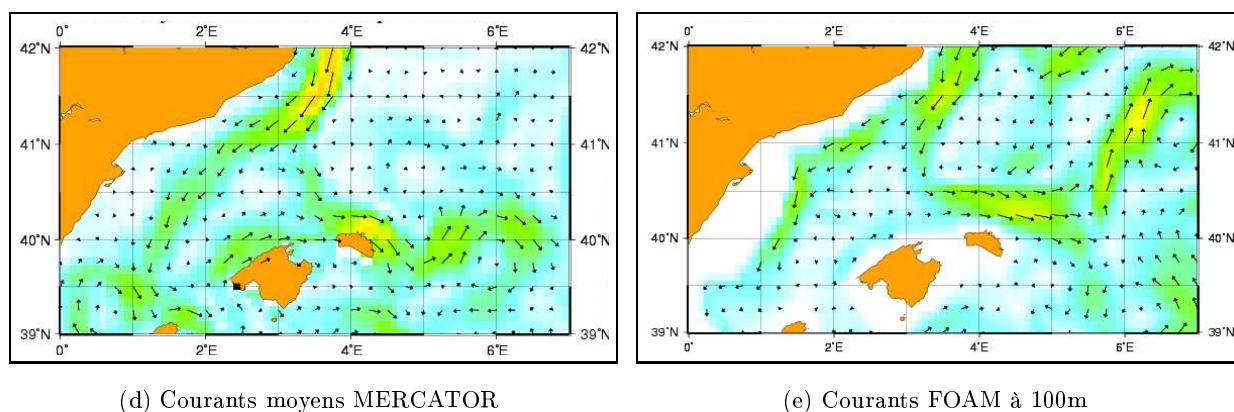


FIG. 3.9 – Courants (en $m \cdot s^{-1}$) issus des modèles océaniques opérationnels pour la journée du 15 décembre 2004, partie 2.

3.2.2 Méditerranée 2005

Pour cette situation, des simulations ont été lancées pour cinquante-sept points de départ, avec les forçages atmosphériques de la PEARP et les forçages océaniques issus des moyennes mensuelles de MERCATOR sur trois années, de MERCATOR et de FOAM. Les résultats ont été analysés et pour chaque point de départ, la qualité de la modélisation a été jugée à l'échéance 54 h.

Les modélisations ont été séparées en trois classes :

- bonne lorsqu'une position modélisée coïncide avec la position réelle de l'objet,
- acceptable lorsqu'une position modélisée est dans un voisinage très proche de l'objet,
- mauvaise dans tous les autres cas.

La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 3.2. Dans l'ensemble les modélisations sont plutôt mauvaises (environ 70%) si on considère les trois forçages océaniques séparément et leurs performances sont similaires. Cependant, les journées pour lesquelles FOAM génère des modélisations correctes ne sont pas systématiquement les mêmes que celles pour MERCATOR. Alors, si on s'attache à l'ensemble des modélisations disponibles pour un même point de départ, et qu'on comptabilise le nombre de journées où au moins un modèle amène à une bonne modélisation, les scores sont bien meilleurs puisqu'on n'observe plus que 35% de mauvaises simulations. Ceci vient confirmer l'importance de l'introduction de courants de grande échelle en Méditerranée et l'intérêt certain de disposer de forçages de différentes sources.

Forçage océanique	Nombre de modélisations					
	bonnes		acceptables		mauvaises	
Moyennes MERCATOR	12	21%	8	14%	38	67%
MERCATOR	8	14%	11	19%	40	70%
FOAM	9	16%	10	18%	40	70%
Tous modèles	19	33%	18	32%	20	35%

TAB. 3.2 – Synthèse des résultats des 57 simulations basées sur la PEARP et les courants des moyennes de MERCATOR, de MERCATOR et de FOAM pour la situation en Méditerranée de 2005.

3. SENSIBILITÉ DU MODÈLE D'OBJET AUX FORÇAGES

3.2.3 Bilan

Tout comme pour le forçage atmosphérique, une incertitude concernant les valeurs des courants de grande échelle pourrait être introduite dans MOTHY. Malheureusement, les structures océaniques sont bien souvent d'échelle inférieure à celle des structures majeures atmosphériques et il paraît difficile de reproduire la variabilité liée à des phénomènes tels que le tourbillon évoqué en 3.2.1.2 avec une méthode introduisant des perturbations arbitraires. L'intégration des différents forçages océaniques disponibles en temps réel apporte une amélioration certaine à la modélisation et semble de plus être la méthode la plus rigoureuse.

3.3 Bilan

Les résultats de MOTHY sont sensibles tant à la qualité du forçage atmosphérique qu'à celle du forçage océanique lorsqu'il est introduit. Le fait d'utiliser toutes les données de vent et de courant disponibles améliore grandement la précision des modélisations de dérive.

L'intégration dans MOTHY des forçages issus de la PEARP pour les modèles atmosphériques et des différents modèles océaniques opérationnels pour le courant constituerait un progrès certain, le principal obstacle à cette amélioration étant le temps de calcul grandissant difficilement compatible avec une utilisation opérationnelle dans le cadre du SAR.

4 Leeway

La seconde méthode de modélisation de dérive d'objets en mer possède des bases empiriques. Elle consiste à considérer la dérive de l'objet comme une composition d'un mouvement dû au courant de surface et d'un autre dû au vent et aux vagues, le *leeway*.

Après avoir décrit le concept du *leeway*, il est possible, dans un premier temps, de comparer les vitesses de dérive qu'il engendre à celles de MOTHY. Puis, afin d'étudier conjointement les modélisations issues des deux approches, il faut implémenter un nouveau modèle, MOTHY-L, utilisant la technique du *leeway*. Ses résultats pourront alors être confrontés à ceux de MOTHY sur des cas concrets.

4.1 Description des modèles basés sur le *leeway*

4.1.1 Principe du *leeway*

Les modèles décrits dans cette partie sont basés sur le même principe : on considère la dérive de l'objet comme une composition du courant de surface et du *leeway*.

La définition du *leeway*, donnée par Fitzgerald et al. (cf. [10]) est la suivante :

"le *leeway* est le vecteur vitesse de l'objet SAR, généré par le vent (à dix mètres) et les vagues, défini par rapport au vent lorsque l'objet se déplace par rapport au courant de surface mesuré entre 30 centimètres et 1 mètre de profondeur".

Le *leeway*, pour chaque objet, peut être décomposée en module (L) et argument (L_α). Cependant, il est plus aisé, notamment pour l'implémentation, de séparer une composante parallèle au vent, **DWL**, et une autre perpendiculaire au vent **CWL** (cf. FIG. 4.1). DWL est toujours positif mais CWL peut indifféremment prendre des valeurs positives ou négatives, selon l'orientation de l'objet au début de la dérive.

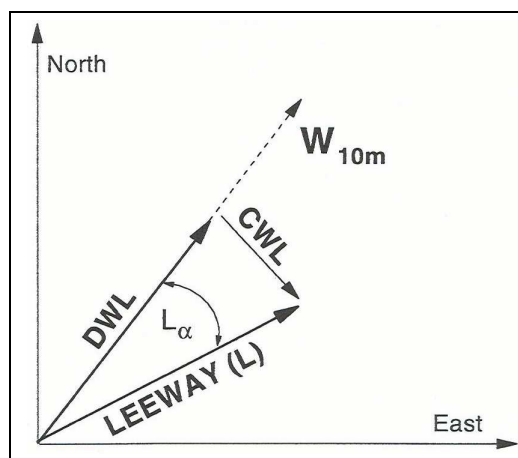


FIG. 4.1 – Décomposition de la dérive due à l'effet du vent et des vagues (*leeway*).

4. LEEWAY

L'expérimentation a montré (cf. [2]) que L et $|L_\alpha|$ et par conséquent CWL et DWL peuvent être considérés comme fonctions affines de la force du vent. Les coefficients de ces fonctions sont différents suivant l'objet considéré.

Les gardes-côtes américains ont étudié soixante-trois classes d'objets (cf. Annexe B).

Ils les ont classifiés selon une norme qu'ils ont définie appelée *leeway taxonomy*.

Pour chacune de ces classes, les coefficients des fonctions affines donnant DWL et CWL à partir du vent à 10 mètres ($\vec{V}_a$) ont été calculés.

Des expérimentations ont été menées pendant lesquelles étaient calculés ou mesurés, pour différents objets :

- la position et la vitesse de l'objet,
- le courant de surface (entre 30 centimètres et 1 mètre de profondeur),
- le vent à dix mètres.

De ces paramètres on peut alors déduire DWL et CWL .

Des régressions linéaires ont ensuite été réalisées entre la force du vent à dix mètres et DWL et CWL , qui peuvent donc s'exprimer sous la forme :

$DWL = a_D \cdot \vec{V}_a + b_D + e_D \cdot \sigma_D$ $CWL = a_C \cdot \vec{V}_a + b_C + e_C \cdot \sigma_C$										
avec	<table style="border: none; width: 100%;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">a_D, b_D, a_C, b_C</td> <td style="padding-right: 10px;">:</td> <td>coefficients issus des régressions appelés coefficients du <i>leeway</i>, respectivement pour DWL et CWL,</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">σ_D, σ_C</td> <td style="padding-right: 10px;">:</td> <td>écarts-types des régressions, respectivement pour DWL et CWL,</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">e_D, e_C</td> <td style="padding-right: 10px;">:</td> <td>perturbations aléatoires.</td> </tr> </table>	a_D, b_D, a_C, b_C	:	coefficients issus des régressions appelés coefficients du <i>leeway</i> , respectivement pour DWL et CWL ,	σ_D, σ_C	:	écarts-types des régressions, respectivement pour DWL et CWL ,	e_D, e_C	:	perturbations aléatoires.
a_D, b_D, a_C, b_C	:	coefficients issus des régressions appelés coefficients du <i>leeway</i> , respectivement pour DWL et CWL ,								
σ_D, σ_C	:	écarts-types des régressions, respectivement pour DWL et CWL ,								
e_D, e_C	:	perturbations aléatoires.								

Notons tout de même que les coefficients sont comparables mais pas strictement identiques pour les CWL positifs et négatifs.

De plus, pour un certain nombre d'objets étudiés, la variance des résidus de la régression réalisée est légèrement fonction de la force du vent (hétéroscédasticité). En effet, elle est plus importante pour les fortes valeurs de force de vent que pour les faibles (cf. FIG. 4.2). Ceci peut conduire à envisager les perturbations aléatoires de différentes manières (cf. 4.3.1.2 et 4.3.1.3).

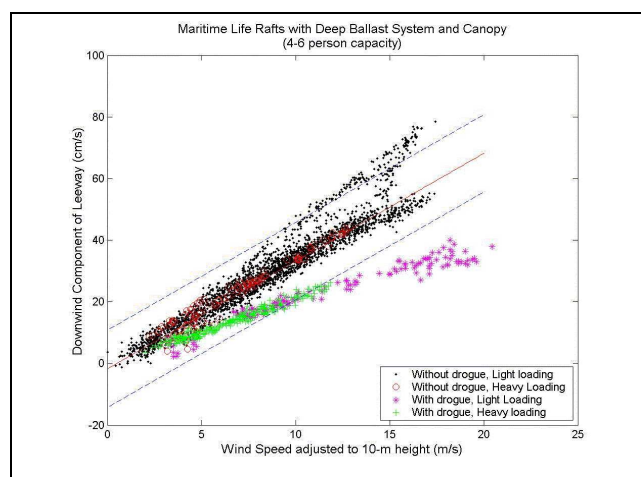


FIG. 4.2 – Données utilisées pour le calcul du DWL pour l'objet *LIFERAFT-DB11* et droite de régression associée.

4.1.2 Modèles utilisant le *leeway*

Les différences entre les modèles basés sur ce principe proviennent des modes d'initialisation de la position de l'objet dérivant, des modes d'utilisation, et principalement de la perturbation, des coefficients du *leeway* et des forçages atmosphériques et océaniques utilisés.

Le principe du *leeway* est utilisé par de nombreux modèles étrangers (cf. exemples TAB. 4.1), dont certains sont intégrés dans des logiciels de planification SAR.

Modèle	Pays	Références bibliographiques
LEEWAY	Norvège	[11], [6], [1]
GDOC AMM	Etats-Unis	[2]
CASP	Etats-Unis	[2]
AP98	Etats-Unis	[2]
CANSARP	Canada	[15], [30], [32]
SARIS II	Grande-Bretagne	[19]

TAB. 4.1 – Quelques modèles étrangers basés sur l'application de coefficients de dérive empiriques.

4.1.3 Modèle norvégien LEEWAY

Le modèle norvégien LEEWAY utilise le principe décrit précédemment. Il comporte un ensemble de 500 particules. A chacune d'entre elle est appliquée l'équation déterminant le leeway avec des coefficients perturbés de manière gaussienne. Pour chacune, une trajectoire légèrement différente des autres est calculée. Les éléments influençant le calcul de dérive (vent à dix mètres, courant de surface, coefficients du *leeway*) sont perturbés de manière gaussienne (technique Monte-Carlo, cf. [1]) et permettent ainsi d'obtenir un nuage de positions prévues pour l'objet recherché.

LEEWAY est forcé par les données issues des modèles norvégiens : **HIRLAM** avec une résolution spatiale voisine de 20 km pour l'atmosphère et le modèle barocline océanique 3D du Meteorologisk Institutt avec une résolution de 4 km pour le courant.

4. LEEWAY

4.2 Comparaison des vitesses de dérive

Afin d'établir une première comparaison entre l'approche de MOTHY et celle du *leeway*, nous pouvons comparer les dérives qu'elles entraînent à courant nul.

À courant nul, nous avons dans MOTHY :

$$\vec{V} = \frac{a}{a+b} \cdot \vec{V}_a \quad (4.1)$$

À courant nul, le coefficient multiplicateur du module du vent à dix mètres, que nous notons coefficient de dérive, est :

$$\begin{aligned} \frac{a}{a+b} &= \frac{\sqrt{\rho_a \cdot C_a \cdot S_a}}{\sqrt{\rho_a \cdot C_a \cdot S_a} + \sqrt{\rho_w \cdot C_w \cdot S_w}} \\ &= \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a} \cdot \frac{I}{1-I}}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

avec $\left| \begin{array}{l} \rho_a = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \\ \rho_w = 1026 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \\ C_a = C_w = 1, \\ I \text{ est le taux d'immersion donc } S_w = I \cdot S \text{ et } S_a = (1-I) \cdot S. \end{array} \right.$

Nous calculons, pour les différents taux d'immersion utilisés dans MOTHY (avec un courant nul), les vitesses de dérive fonctions de la force du vent. Celles-ci peuvent être comparées (cf. exemple FIG. 4.3 et ensemble des calculs FIG. C.1) à celles définies par les coefficients utilisées dans LEEWAY pour les soixante-trois objets SAR, pour DWL et CWL.

L'objet *LIFERAFT-DB20* de la figure 4.3 a donc une vitesse de dérive similaire à celle des conteneurs de MOTHY immergés à 50%, 60% et 70% pour des vitesses de vent supérieures à $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et une faible divergence par rapport à la direction du vent puisque CWL reste inférieur à $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

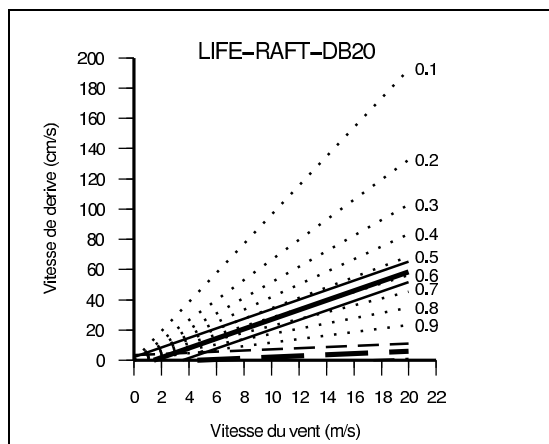


FIG. 4.3 – Comparaison des vitesses de dérive de MOTHY et LEEWAY pour LIFERAFT-DB20 (en pointillés les valeurs pour les différents taux d'immersion dans MOTHY, en traits pleins les plages de valeurs pour DWL et en traits tiretés les plages de valeurs pour la valeur absolue de CLW, le trait le plus gras représentant la valeur centrale de l'intervalle et les traits plus fins l'intervalle à 95% calculé grâce aux paramètres de la régression).

Nous pouvons affirmer, pour des forces de vent supérieures à 2 m.s^{-1} , les points suivants :

- la plupart des objets ont des vitesses de dérive proches de celles calculées par MOTHY pour des taux d’immersion compris entre 40% et 70% et seules les vitesses des objets *SPORT-BOAT* et *SPORT-FISHER* se rapprochent de celles de MOTHY pour des taux de l’ordre de 20% (ce sont des bateaux qui semblent avoir une grande prise au vent) ;
- les objets pour lesquels les plages de valeurs de vitesses sont les plus larges sont les canots de sauvetage les moins lestés (*LIFE-RAFT-NB1* et *LIFE-RAFT-NB2*) ;
- les hommes à la mer (*PIW*) ont une vitesse de dérive proche de celle des conteneurs de MOTHY immergés entre 70% et 90% mais peuvent avoir une composante normale au vent relativement importante (leur trajectoire peut alors diverger significativement de la direction du vent) ;
- plus les canots de sauvetage sont lestés, moins la divergence par rapport à la direction du vent semble importante (le CWL est assez important pour les objets de classes *LIFE-RAFT-NB*, un peu plus faible pour ceux de classes *LIFE-RAFT-SB* et très faible pour ceux de classes *LIFE-RAFT-DB*).

Les vitesses de dérive (à courant nul) simulées par MOTHY sont donc, si on détermine pour chaque objet une plage de taux d’immersion optimal spécifique, du même ordre de grandeur que celles de LEEWAY. La divergence par rapport à la direction du vent n’est cependant pas prise en compte dans MOTHY, puisqu’à courant nul, le vecteur dérive est colinéaire au vecteur vent. Les tables des angles de divergence américaines contiennent cependant des valeurs s’échelonnant de sept à soixante-cinq degrés.

La divergence introduite par l’utilisation du *leeway* ne conduit pas forcément l’ensemble des trajectoires des objets à se détacher de la direction du vent. En effet, le CWL appliqué à l’objet est soit positif, soit négatif et sa valeur est très souvent associée à une perturbation aléatoire. Si on considère un ensemble suffisamment grand d’objets pour lesquels des perturbations ont été introduites sur DWL et CWL, l’ensemble des trajectoires suit alors en moyenne la direction du vent. Pour des objets dont le CWL est important, le fait qu’il soit positif ou négatif conduit parfois à une rupture en deux du nuage de positions possibles. Un des ensembles dérive alors sur la droite du vent et l’autre sur sa gauche.

4. LEEWAY

4.3 Implémentation d'un nouveau modèle MOTHY-L

Les résultats du modèle norvégien LEEWAY n'étant disponibles que pour les deux exercices en mer de Norvège, il s'avère utile de développer un modèle basé sur le même principe, utilisable sur toutes les situations possibles avec les mêmes forçages atmosphériques que ceux de MOTHY. Nous noterons cette version du modèle MOTHY-L. Elle permettra de comparer de façon plus rigoureuse les deux approches de la dérive d'objets sur les situations d'exercices en mer de Norvège et d'étendre cette comparaison à d'autres situations étudiées.

Cette nouvelle version utilise le même principe mais n'est cependant pas identique au modèle norvégien, qui met en œuvre une méthode de perturbation des coefficients plus complexe, et introduit de plus une perturbation sur les champs de vent et de courant.

4.3.1 Modification du modèle d'objet

Pour intégrer le principe du *leeway*, il faut modifier entièrement le modèle d'objet de MOTHY.

4.3.1.1 Principe

On considère dans ce nouveau modèle que la dérive de l'objet est la composition de la dérive due au courant de surface (choisi arbitrairement à un mètre de profondeur) et de la dérive due au vent et aux vagues dont les deux composantes sont DWL et CWL.

Il faut disposer d'un nuage de positions possibles suffisamment large pour tenir compte des incertitudes liées aux conditions de détermination des coefficients permettant de calculer DWL et CWL. Les valeurs de ces paramètres doivent donc être perturbées. Le nombre d'objets est dans un premier temps arbitrairement fixé à 800 et pourrait bien évidemment évoluer par la suite.

4.3.1.2 Équations intégrées au modèle

Les coefficients permettant de calculer DWL et CWL sont issus de l'étude "*Review of Leeway*" (cf. [2]). Un fichier les contenant est intégré au modèle. Nous disposons pour chacune de ces composantes de la dérive :

- de la pente de la régression a_D (pour DWL), a_{Cr} et a_{Cl} (pour CWL à droite et à gauche),
- de l'ordonnée à l'origine de la régression b_D (pour DWL), b_{Cr} et b_{Cl} (pour CWL à droite et à gauche),
- de l'écart-type de la régression σ_D (pour DWL), σ_{Cr} et σ_{Cl} (pour CWL à droite et à gauche).

Nous savons de plus que CWL peut être indifféremment positif ou négatif. Nous appliquons alors l'équation du CWL avec les coefficients pour la droite du vent pour 400 objets et celle avec les coefficients pour la gauche du vent pour les 400 autres.

Enfin, comme dans le modèle norvégien LEEWAY, il paraît utile de perturber DWL et CWL. Les coefficients les déterminant étant issus de régressions, il suffit de déterminer des perturbations gaussiennes e_D et e_C et de les appliquer lors du calcul des deux composantes. Chaque objet se voit donc affecter des coefficients perturbés mais constants tout au long de la simulation, ce qui est réaliste.

Si nous notons $\vec{V}$ la vitesse de l'objet, $\vec{V}_a$ le vent à dix mètres, $\vec{V}_w$ le courant de surface, $\vec{L}$ le vecteur *leeway*, $D\vec{W}L$ et $C\vec{W}L$ ses composantes et a_C , b_C et σ_C les coefficients de l'équation pour CWL indifféremment pour la droite ou la gauche du vent, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned}
 \vec{V} &= \vec{L} + \vec{V}_w \\
 &= D\vec{W}L + C\vec{W}L + \vec{V}_w \\
 &= (a_D \cdot |\vec{V}_a| + b_D + e_D \cdot \sigma_D) \cdot \frac{1}{|\vec{V}_a|} \cdot \begin{pmatrix} u_a \\ v_a \end{pmatrix} \\
 &\quad + (a_C \cdot |\vec{V}_a| + b_C + e_C \cdot \sigma_C) \cdot \frac{1}{|\vec{V}_a|} \cdot \begin{pmatrix} v_a \\ -u_a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_w \\ v_w \end{pmatrix} \\
 &= \frac{1}{|\vec{V}_a|} \cdot \left((a_D \cdot |\vec{V}_a| + b_D + e_D \cdot \sigma_D) \cdot u_a + (a_C \cdot |\vec{V}_a| + b_C + e_C \cdot \sigma_C) \cdot v_a \right) \\
 &\quad + \frac{1}{|\vec{V}_a|} \cdot \left((a_D \cdot |\vec{V}_a| + b_D + e_D \cdot \sigma_D) \cdot v_a - (a_C \cdot |\vec{V}_a| + b_C + e_C \cdot \sigma_C) \cdot u_a \right) \\
 &\quad + \begin{pmatrix} u_w \\ v_w \end{pmatrix} \tag{4.3}
 \end{aligned}$$

4.3.1.3 Différences entre MOTHY-L et LEEWAY

La principale différence entre MOTHY-L et LEEWAY tient dans le mode de perturbation des coefficients permettant de calculer DWL et CWL. En effet, dans MOTHY-L, nous perturbons simplement l'ordonnée à l'origine de la fonction. Or, dans LEEWAY, la pente est également perturbée, de manière à mieux tenir compte de l'hétéroscédasticité des résidus des régressions.

L'équation suivante est ainsi appliquée pour le calcul de DWL (elle est identique pour CWL) :

$$DWL = (a_D + \frac{e_D}{20}) \cdot |\vec{V}_a| + b_D + \frac{e_D}{2} \tag{4.4}$$

Ainsi :

- pour des vents faibles, c'est la perturbation de l'ordonnée à l'origine qui prédomine ;
- pour un vent de $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, les deux perturbations ont des contributions semblables ;
- pour des vents forts c'est la perturbation de la pente qui prend le plus d'importance.

La seconde différence provient du fait que LEEWAY perturbe les champs de vent et de courant en utilisant une perturbation gaussienne (d'écart-type $2,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour le vent et $0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour le courant) variable dans le temps, contrairement à la perturbation des coefficients de calcul de DWL et CWL. Cette perturbation a beaucoup moins d'influence sur le calcul de la dérive que celle appliquée aux coefficients du *leeway* (cf. [1]). Les perturbations de vent dans MOTHY-L ne sont pour le moment pas introduites.

4. LEEWAY

4.3.1.4 Possibilité de comparaison de MOTHY-L et LEEWAY

Malgré quelques différences, les résultats de MOTHY-L et de LEEWAY sont similaires à forçage identique comme le montre la figure 4.4 sur laquelle sont superposées les simulations des deux modèles pour un vent fictif de sud et un courant nul. Les dérives modélisées par MOTHY-L sont tout à fait correctes et peuvent permettre de comparer plus rigoureusement les deux approches de la modélisation de dérive, puisqu'il est désormais possible d'utiliser le même forçage atmosphérique pour chacune d'entre elle.

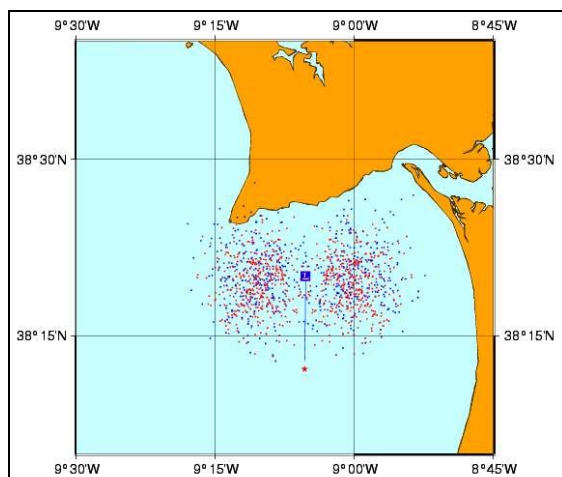


FIG. 4.4 – Dérives de MOTHY-L et LEEWAY pour un vent fictif de sud de $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, échéance 010 (en bleu, le nuage de positions prévues par LEEWAY, en rouge les positions issues de MOTHY-L).

4.4 Comparaison des résultats de MOTHY et MOTHY-L

Ce nouveau modèle produit donc un nuage de positions possibles très comparable à celui issu du modèle norvégien LEEWAY et nous l'utilisons pour comparer les deux approches de la modélisation de dérive d'objets sur des situations réelles d'exercices et d'accidents.

4.4.1 Situations étudiées

Les cas étudiés sont les deux exercices du Dourvac'h en 1991 et 1992, les deux exercices en mer de Norvège en 2003 et 2004 et l'accident du navire MSC Martina.

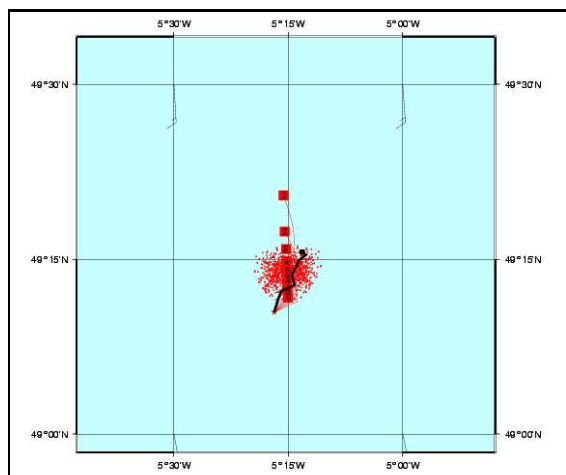
Les types d'objets utilisés sont *BAIT-BOX-1* pour les situations de dérives de conteneurs (Dourvac'h 1991 et 1992, MSC Martina) et respectivement *LIFE-RAFT-DB20* et *LIFE-RAFT-DB10* pour les exercices en mer de Norvège en 2003 et 2004. Les situations en Méditerranée n'ont pu être utilisées pour tester MOTHY-L puisque les objets qui dérivent sont des bouées ou des flotteurs et que ce type d'objet n'est pas décrit dans la liste des classes d'objets.

4.4.2 Résultats

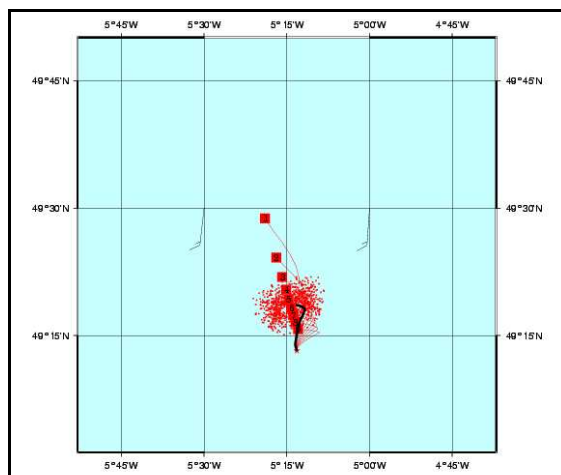
Les cartes issues de ces simulations sont présentes sur la figure 4.5. Des calculs de distance entre le point de MOTHY ou de MOTHY-L le plus proche de la position réelle de l'objet à l'échéance finale ont également pu être menés et leurs résultats sont regroupés dans le tableau 4.2. Il permettent de vérifier si la position réelle de l'objet est à proximité du nuage de points.

Situation		Forçage	Échéance finale	MOTHY		MOTHY-L	
				Immersion	Distance	Distance	Zone
Dourvac'h 1991	1	CEP	008 (017)	30%	1,393	0,098	OUI
Dourvac'h 1991	2	CEP	010 (030)	50%	0,178	0,167	OUI
Dourvac'h 1992	1	CEP	022 (040)	70%	0,842	0,113	OUI
Dourvac'h 1992	2	CEP	036 (088)	30%	3,853	0,403	OUI
Met.no 2003		CEP	024 (035)	70%	5,073	1,590	NON
Met.no 2003		ARPEGE	024 (035)	70%	4,908	1,529	NON
Met.no 2004		CEP	016 (038)	70%	2,039	0,225	OUI
Met.no 2004		ARPEGE	016 (038)	70%	2,297	0,095	OUI
MSC Martina	1	CEP	014 (030)	50%	1,425	0,137	OUI
MSC Martina	1	ARPEGE	014 (030)	50%	0,512	0,391	OUI
MSC Martina	2	CEP	014 (032)	70%	1,345	0,086	OUI
MSC Martina	2	ARPEGE	014 (032)	60%	1,812	0,017	OUI

TAB. 4.2 – Comparaison des distances (en milles nautiques) du point le plus proche du point d'arrivée pour MOTHY et MOTHY-L pour les simulations réalisées avec comme forçages atmosphériques les analyses d'ARPEGE et CEP (Ech. = échéance finale par rapport au point de départ de la modélisation et entre parenthèses par rapport à l'origine temporelle du forçage atmosphérique, Zone = point de repêchage inclus dans la zone définie par MOTHY-L).



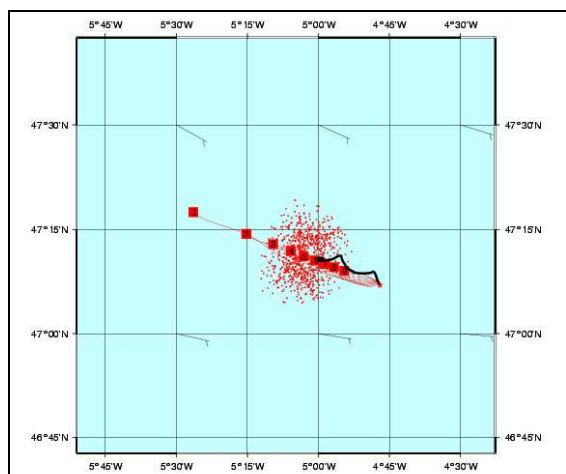
(a) Dourvac'h 1991, phase 1, analyse CEP



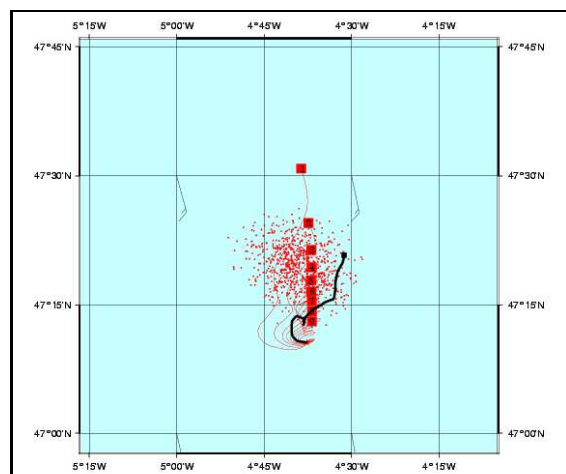
(b) Dourvac'h 1991, phase 2, analyse CEP

FIG. 4.5 – Comparaison des dérives de MOTHY et de MOTHY-L pour différents exercices, partie 1 (en noir la trajectoire réelle, en grands carrés rouges numérotés les positions issues de MOTHY, en petits points rouges celles issues de MOTHY-L).

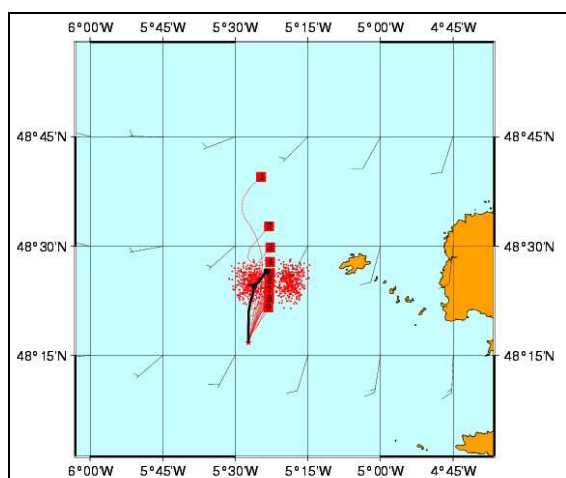
4. LEEWAY



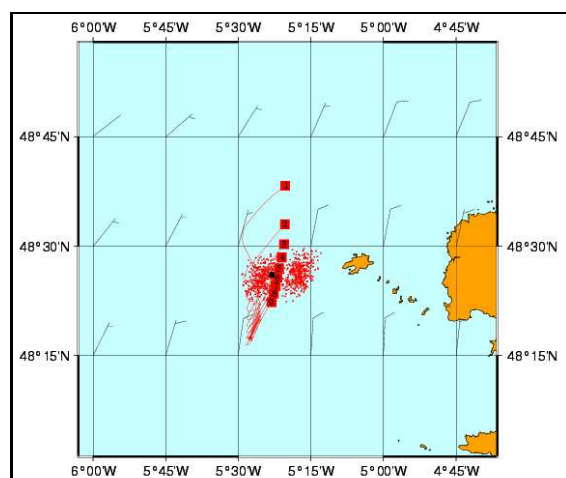
(c) Dourvach 1992, phase 1, analyse CEP



(d) Dourvach 1992, phase 2, analyse CEP

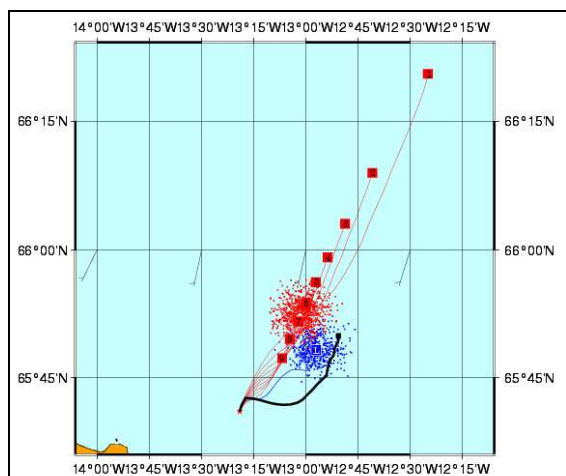


(e) MSC Martina conteneur immergé à 50%, analyse ARPEGE

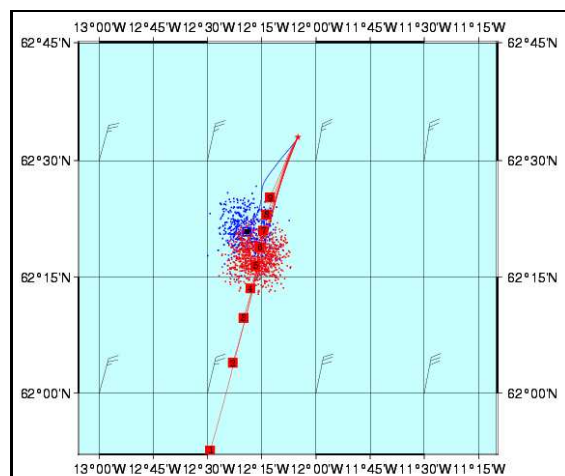


(f) MSC Martina conteneur immergé à 70%, analyse ARPEGE

FIG. 4.5 – Comparaison des dérives de MOTHY et de MOTHY-L pour différents exercices, partie 2 (en noir la trajectoire réelle, en grands carrés rouges numérotés les positions issues de MOTHY, en petits points rouges celles issues de MOTHY-L).



(g) Mer de Norvège 2003, analyse CEP



(h) Mer de Norvège 2004, analyse CEP

FIG. 4.5 – Comparaison des dérives de MOTHY et de MOTHY-L pour différents exercices, partie 3 (en noir la trajectoire réelle, en grands carrés rouges numérotés les positions issues de MOTHY, en petits points rouges celles issues de MOTHY-L et en petits points bleus celles issues de LEEWAY).

4.4.3 Bilan

Pour toutes les situations, MOTHY-L se rapproche plus de la position réelle de l'objet que MOTHY. De plus, dans tous ces cas sauf pour l'exercice en mer de Norvège de 2003, le nuage de positions de MOTHY-L contient la position réelle de l'objet recherché. Le fait d'avoir un nombre d'objets important et de perturber les causes de leur dérive constitue ici un atout certain.

Cependant, pour les situations de dérive de conteneurs, le centre de gravité du nuage de points obtenu par MOTHY-L avec l'objet *BAIT-BOX-1* semble dériver plus lentement que ne le fait le conteneur en réalité. Ce phénomène peut être observé pour la première phase de l'expérimentation du Dourvac'h de 1991, la seconde phase de l'expérimentation du Dourvac'h de 1992 et les deux conteneurs de l'accident du MSC Martina en 2000. Ceci indique que même si l'objet *BAIT-BOX-1* peut constituer un substitut correct pour le conteneur, il n'en n'est pas un et qu'il serait fort utile de calculer des coefficients du *leeway* pour le conteneur.

4. LEEWAY

4.5 Bilan

De manière générale, l'approche du *leeway* permet de tenir compte, de manière implicite, des caractéristiques propres de l'objet et de modéliser sa dérive correctement. Il est ainsi possible de contourner les problèmes de l'évaluation des forces de traînée et de portance ainsi que du ciblage des taux d'immersion qui constituent les limites du modèle MOTHY (cf. 2.2).

Cette méthode a cependant elle aussi ses limites. Les coefficients du *leeway* n'ont en effet pas été calculés pour tous les types d'objets pouvant intéresser les services de SAR. La liste des soixante-trois classes d'objets n'est pas exhaustive et le conteneur, qui représente un danger certain pour la navigation et peut parfois contenir des produits toxiques, n'y est par exemple pas présent. Malgré tout, cette liste n'est pas définitive et c'est par l'expérimentation qu'elle peut être rallongée.

Des campagnes de mesure supplémentaires pourraient également permettre un calcul plus précis des coefficients du *leeway* en réduisant l'écart-type des régressions. Leur organisation étant complexe et leur coût important, il s'agit, avant de se lancer dans ces campagnes, de bien cibler les objets pour lesquels des coefficients du *leeway* ont un intérêt à être calculés ou précisés.

Conclusion

Le but de ce stage d'approfondissement était d'améliorer le modèle de dérive d'objets de Météo-France, MOTHY, par une prise en compte plus complète des caractéristiques propres de l'objet dérivant et des paramètres extérieurs, en particulier le vent et le courant, agissant sur sa dérive.

Dans un premier temps, un bilan du comportement du modèle sur des situations de dérives réelles provenant d'exercices ou d'accidents a été dressé. Il a tout d'abord permis de mettre en évidence les modélisations correctes de MOTHY. Quelques points faibles ont cependant été dégagés. Ainsi, le fait de n'avoir qu'une catégorie d'objet empêche une modélisation correcte des paramètres liés à la géométrie. Ceci implique, pour obtenir des prévisions correctes, de faire varier le taux d'immersion de l'objet, qui prend parfois des valeurs irréalistes, et ne génère qu'une ligne de positions comme zone de recherche. De plus, la force de portance s'appliquant à l'objet est négligée alors qu'elle peut être significative et générer un mouvement perpendiculaire à la direction du vent. La sensibilité de MOTHY au forçage apparaît aussi nettement.

Ensuite, cette sensibilité aux variations de conditions de forçages atmosphériques et océaniques est étudiée plus en détail, avec pour base de nombreuses simulations sur des cas réels. L'importance cruciale de l'utilisation simultanée de multiples sources de données, en particulier la PEARP pour les données atmosphériques, et l'amélioration ainsi apportée à MOTHY sont mises en exergue.

Enfin, l'implémentation de MOTHY-L, version de MOTHY avec un modèle d'objet basé sur les résultats des recherches des gardes-côtes américains, a permis de confronter les deux principales approches de la modélisation de dérive d'objets : celle de MOTHY, fondée sur les lois de la mécanique, et celle du *leeway* disposant de bases plus empiriques et statistiques. Les comparaisons menées montrent de nombreux avantages à MOTHY-L. Ce modèle obtient en effet de bons résultats en produisant un nuage de points pour zone de recherche et en prenant en compte de manière implicite les caractéristiques géométriques de l'objet ainsi que le mouvement lié à la force de portance. Malgré tout, les expérimentations sur lesquelles est basée la méthode du *leeway* ne portent que sur un nombre limité d'objets et certains types très importants pour la sécurité en mer ne font pas partie de la liste. Le lancement en parallèle des deux versions de MOTHY semble alors pour le moment la solution à adopter.

Cette nouvelle version de MOTHY offre de multiples perspectives pour des travaux ou expérimentations futurs. Il paraîtrait judicieux de tester et d'intégrer à MOTHY-L des méthodes de perturbation de vent et de courant et d'œuvrer à l'amélioration de la précision des coefficients du *leeway* par l'organisation d'exercices.

Références

Documentation papier

- [1] ALLEN, A. A. et BREIVIK, Ø.
An Operational Monte Carlo SAR Model, Octobre 2004.
Conférence Technologies for Search, Assistance and Rescue, Brest, France.
- [2] ALLEN, Arthur A. et PLOURDE, Jeffery V.
Review of leeway : Field experiments and implementation.
Rapport Technique CG-D-08-99, US Coast Guard Research and Development Center,
Groton, CT, USA, Avril 1999.
- [3] Aoustin, Y.
*Étude de faisabilité d'un outil d'aide à la décision en cas de chute à la mer de colis
dangereux.*
Rapport Technique DITI/SOM 91-161, IFREMER, Avril 1991.
- [4] Aoustin, Y.
Mesure de la dérive d'un conteneur à la mer.
Rapport Technique DITI/SOM 91-228, IFREMER, Juillet 1991.
- [5] Aoustin, Y.
Observation de la dérive d'un conteneur à la mer.
Rapport Technique DITI/SOM 92-312, IFREMER, Octobre 1992.
- [6] BREIVIK, Ø.
Handbook for the met.no maritime drift models.
Norwegian Meteorological Institute, Janvier 2004.
- [7] CABIOC'H, F. et Aoustin, Y.
*Criteria for Decision Making Regarding Response to Accidentally Spilled Chemicals in
Packaged Form : Hydrodynamics Aspects.*
Spill Science and Technology Bulletin, vol. 4(1) : (1997), 7–15.
- [8] DANIEL, P.
MOTHY : Documentation Technique.
Météo-France, DPREVI/MAR.
- [9] DANIEL, P. et AL.
Container drift modeling at Météo-France.
Spill Science and Technology Bulletin, vol. 7(5-6).
- [10] FITZGERALD, R.B., FINLAYSON, D.J., CROSS, J.F. et ALLEN, A.
Drift of Common Search and Rescue Objects - Phase II.
Rapport Technique TP11673E, Transportation Development Centre, Transport Canada,
Montreal, 1993.
- [11] HACKETT, B., BREIVIK, Ø. et WETTRE, C.
Forecasting the drift of things in the ocean, 2004.

RÉFÉRENCES

- Second Symposium on the Global Ocean Data Assimilation Experiment, St Petersburg ,
Florida.
- [12] HOERNER, S.F.
Résistance à l'avancement dans les fluides.
Gauthier-Villars Paris Editeurs, 1965.
- [13] POON, Y.K. et MADSEN, O.S.
A two layers wind-driven coastal circulation model.
J.G.R., vol. 96 :(1991), 2535–2548.
- [14] RICHARDSON, P.L.
Drifting in the wind : leeway error in shipdrift data.
Deep-Sea Research, vol. 44 :(1997), 1877–1903.
- [15] SECTION DE LA FORMATION EN RECHERCHE ET SAUVETAGE.
Guide sommaire CANSARP.
Collège de la Garde côtière canadienne, Mai 1996.
- [16] SEELIG, W.
Mooring design and inspection criteria.
Rapport Technique TR-6009-OCN, Naval Facilities Engineering Service, Avril 1999.
- [17] SMITH, S.D.
Hindcasting iceberg drift usig current profiles and winds.
Cold Region Science and Technology, vol. 22 :(1993), 33–45.
- [18] SMITH, S.D. et DONALDSON, N.R.
Dynamic modeling of iceberg drift using current profiles.
Rapport Technique 91, Bedford Institute of Oceanography, October 1987.

Documentation électronique

- [19] BRITISH MARITIME TECHNOLOGY.
Saris II, Search and Rescue Information System.
<http://www.bmtcordah.com/services/consultancy.aspx?id=43>.
- [20] CEDRE.
*Centre de Documentation de Recherche et d'Expérimentation sur les pollutions accidentelles
des eaux.*
<http://www.cedre.fr>.
- [21] DIRECTION DES AFFAIRES MARITIMES ET DES GENS DE MER.
Présentation des CROSS.
[http://www.mer.equipement.gouv.fr/securite/03_navigation/02_cross/cdrom%
/Fichiers%20HTML/cross/intro.htm](http://www.mer.equipement.gouv.fr/securite/03_navigation/02_cross/cdrom%/Fichiers%20HTML/cross/intro.htm).
- [22] DP/COMPAS.
Intramet.
<http://memphis.meteo.fr>.
- [23] IFREMER.
Institut Français pour l'Exploitation de la Mer.
<http://www.ifremer.fr>.
- [24] IFREMER.
Provov.
<http://www.ifremer.fr/dtmsi/produits/marvor/provor.htm>.

- [25] ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA.
Mediterranean Forecasting System Toward Environmental Predictions.
<http://www.bo.ingv.it/mfstep/>.
- [26] LIM-UPC.
Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya.
<http://lim-ciirc.upc.es>.
- [27] MERCATOR OCÉAN.
Mercator Océanographie Opérationnelle.
<http://www.mercator-ocean.fr>.
- [28] METEOROLOGISK INSTITUTT.
met.no.
<http://www.met.no>.
- [29] NOVELTIS ET PÔLE D'OCÉANOGRAPHIE CÔTIÈRE.
North West Mediterranean Forecasting.
<http://www.noveltis.net/mfstep-wp9/>.
- [30] PATTERSON, Anthony.
Remote Sensing Application in Search and Rescue.
<http://www.rcc-net.org/rcc/rddocs/remote/remote.htm>.
- [31] PREVI/MAR.
Intramet.
<http://glenan.meteo.fr>.
- [32] RESCUE COORDINATION CENTRE NETWORK.
CANSARP, A Computerized Planning Tool For Search and Rescue.
<http://www.rcc-net.org/rcc/rddocs/cansarp/ccecepap.htm>.
- [33] SASEMAR.
Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima.
<http://www.sasemar.es>.
- [34] UK MET OFFICE.
Forecasting Ocean Assimilation Model.
<http://www.metoffice.com/research/ncof/foam/index.html>.
- [35] UNIVERSITY OF ATHENS OCEAN PHYSICS AND MODELING GROUP.
Forecasting at the regional scale and modeling at the shelf scale, Workpackage 9.
<http://pelagos.oc.phys.uoa.gr/mfstep/index.htm>.
- [36] USGODAE.
Global Ocean Data Assimilation Experiment.
<http://www.usgodae.org>.

Annexes

Annexe A Coefficients de traînée

Ces coefficients valables pour des formes géométriques simples, présents sur la figure A.1 sont issus de l'ouvrage de Hoerner (cf. [12]).

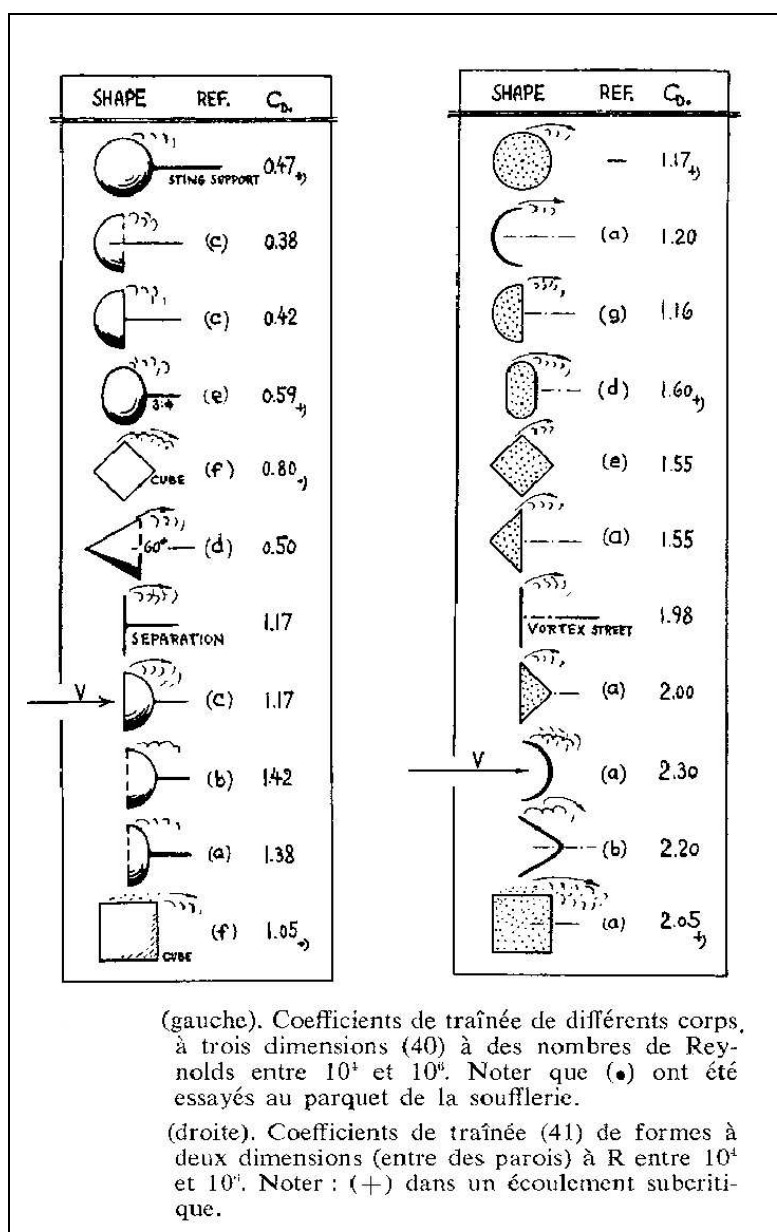


FIG. A.1 – Coefficients de traînée pour différentes formes géométriques en deux et trois dimensions pour des nombres de Reynolds compris entre 10^4 et 10^6 .

Annexe B Classes d'objets

Pour chacune des soixante-trois classes d'objets (cf. TAB. B.1), des coefficients déterminés empiriquement (cf. TAB. B.2 et [2]) sont disponibles pour calculer DWL et CWL dans les modèles de dérive américain, canadien, norvégien ainsi que dans MOTHY-L.

Rappelons les notations pour les coefficients :

a_D	: pente pour le calcul de DWL,
b_D	: ordonnée à l'origine pour le calcul de DWL,
σ_D	: écart-type de la régression pour le calcul de DWL,
a_{Cr}	: pente pour le calcul de CWL si l'objet dérive sur la droite du vent,
b_{Cr}	: ordonnée à l'origine pour le calcul de CWL si l'objet dérive sur la droite du vent,
σ_{Cr}	: écart-type de la régression pour le calcul de CWL si l'objet dérive sur la droite du vent,
a_{Cl}	: pente pour le calcul de CWL si l'objet dérive sur la gauche du vent,
b_{Cl}	: ordonnée à l'origine pour le calcul de CWL si l'objet dérive sur la gauche du vent,
σ_{Cl}	: écart-type de la régression pour le calcul de CWL si l'objet dérive sur la gauche du vent.

DWL et CWL peuvent donc s'exprimer sous la forme :

$$\begin{aligned}
 DWL &= a_D \cdot |\vec{V}_a| + b_D + e_D \cdot \sigma_D \\
 CWL &= a_C \cdot |\vec{V}_a| + b_{Cr} + e_{Cr} \cdot \sigma_{Cr} \\
 \text{ou bien} \\
 CWL &= a_C \cdot |\vec{V}_a| + b_{Cl} + e_{Cl} \cdot \sigma_{Cl}
 \end{aligned}$$

avec e_D , e_{Cr} , e_{Cl} : perturbations aléatoires.

B. CLASSES D'OBJETS

PIW-1	Person-in-water (PIW)	unknown state (mean values)		
PIW-2		vertical		
PIW-3		sitting		
PIW-4		horisontal	survival suit	
PIW-5			scuba suit	
PIW-6			deceased	
LIFE-RAFT-NB1	Life-raft	no ballast (NB) system	general (mean values)	
LIFE-RAFT-NB2			no canopy, no drogue	
LIFE-RAFT-NB3			no canopy, with drogue	
LIFE-RAFT-NB4			with canopy, no drogue	
LIFE-RAFT-NB5			with canopy, with drogue	
LIFE-RAFT-SB6		shallow ballast (SB) system AND canopy	general (mean values)	
LIFE-RAFT-SB7			no drogue	
LIFE-RAFT-SB8			with drogue	
LIFE-RAFT-SB9			capsized	
LIFE-RAFT-DB10		deep ballast (DB) system	general, unknown capacity and loading (mean values)	
LIFE-RAFT-DB11			4-6 person capacity, deep ballast system	general (mean values)
LIFE-RAFT-DB12				no drogue
LIFE-RAFT-DB13		no drogue, light loading		
LIFE-RAFT-DB14		no drogue, heavy loading		
LIFE-RAFT-DB15		with drogue		
LIFE-RAFT-DB16		with drogue, light loading		
LIFE-RAFT-DB17		with drogue, heavy loading		
LIFE-RAFT-DB18		15-25 person capacity, deep ballast system	general (mean values)	
LIFE-RAFT-DB19			no drogue, light loading	
LIFE-RAFT-DB20			with drogue, heavy loading	
LIFE-RAFT-DB21		deep ballast system general (mean values)	capsized	
LIFE-RAFT-DB22			swamped	
LIFE-CAPSULE	Life capsule			
USCG-RESCUE	USCG Sea Rescue Kit			
AVIATION-1	Life-raft, 4-6 person capacity, no ballast, with canopy, no drogue			
AVIATION-2	Evacuation slide with life-raft 4-6 person capacity			
SEA-KAYAK	Sea Kayak with person on aft deck			
SURFBOARD	Surf board with person			
WINDSURFER	Windsurfer with mast and sail in water			
SAILBOAT-1	Mono-hull full keel, deep draft			
SAILBOAT-2	Mono-hull, fin keel, shoal draft			
SKIFF-1	Skiff	flat bottom		
SKIFF-2		V-hull		
SKIFF-3		V-hull, swamped		
SPORT-BOAT	Sport boat, no canvas, modified V-hull			
SPORT-FISHER	Sport fisher, center console, open cockpit			
FISHING-VESSEL-1	Fishing vessel	general (mean values)		
FISHING-VESSEL-2		Hawaiian Sampan		
FISHING-VESSEL-3		Japanese side-stern trawler		
FISHING-VESSEL-4		Japanese Longliner		
FISHING-VESSEL-5		Korean fishing vessel		
FISHING-VESSEL-6		Gill-netter with rear reel		
COASTAL-FREIGHTER	Coastal freighter.			
FV-DEBRIS	Fishing vessel debris			
BAIT-BOX-1	Bait/wharf box	holds a cubic metre of ice	mean values	
BAIT-BOX-2			lightly loaded	
BAIT-BOX-3			full loaded	
REFUGEE-RAFT-1	Immigration vessel	Cuban refugee-raft	no sail	
REFUGEE-RAFT-2			with sail	
SEWAGE	Sewage floatables, tampon applicator			
MED-WASTE-1	Medical waste	mean values		
MED-WASTE-2		vials		
MED-WASTE-3			large	
MED-WASTE-4			small	
MED-WASTE-5		syringes		
MED-WASTE-6			large	
MED-WASTE-7			small	

TAB. B.1 – 63 classes d'objets dérivants, description en anglais.

B. CLASSES D'OBJETS

CATEGORIE	a_D [%]	b_D [cm/s]	σ_D [cm/s]	a_{Cr} [%]	b_{Cr} [cm/s]	σ_{Cr} [cm/s]	a_{Cl} [%]	b_{Cl} [cm/s]	σ_{Cl} [cm/s]
PIW-1	0,96	0,00	12,00	0,54	0,00	9,40	-0,54	0,00	9,40
PIW-2	0,48	0,00	8,30	0,15	0,00	6,70	-0,15	0,00	6,70
PIW-3	1,60	-3,98	2,42	0,13	0,33	2,11	-0,13	-0,33	2,11
PIW-4	1,71	1,12	3,93	1,36	-3,30	1,71	-0,13	-2,65	1,62
PIW-5	0,63	0,00	5,30	0,31	0,00	4,50	-0,31	0,00	4,50
PIW-6	1,30	0,00	8,30	0,74	0,00	6,70	-0,74	0,00	6,70
LIFE-RAFT-NB1	3,70	0,00	12,00	1,98	0,00	9,40	-1,98	0,00	9,40
LIFE-RAFT-NB2	5,34	9,91	9,82	2,26	1,04	9,08	-2,26	-1,04	9,08
LIFE-RAFT-NB3	3,15	-4,47	4,00	1,51	0,00	5,00	-1,51	0,00	5,00
LIFE-RAFT-NB4	3,39	0,00	2,40	1,49	0,00	2,40	-1,49	0,00	2,40
LIFE-RAFT-NB5	2,65	0,00	12,00	1,42	0,00	9,40	-1,42	0,00	9,40
LIFE-RAFT-SB6	2,68	0,00	12,00	1,10	0,00	9,40	-1,10	0,00	9,40
LIFE-RAFT-SB7	2,96	0,00	1,50	1,21	0,00	1,70	-1,21	0,00	1,70
LIFE-RAFT-SB8	2,31	0,00	4,00	0,95	0,00	3,50	-0,95	0,00	3,50
LIFE-RAFT-SB9	1,68	0,00	2,40	0,24	0,00	2,40	-0,24	0,00	2,40
LIFE-RAFT-DB10	3,52	-2,50	6,10	0,62	-3,00	3,50	-0,45	-0,20	3,60
LIFE-RAFT-DB11	3,50	-1,80	6,40	0,78	-3,60	3,60	-0,47	-0,10	3,90
LIFE-RAFT-DB12	3,75	-2,30	4,40	0,78	-3,60	3,60	-0,47	-0,10	3,90
LIFE-RAFT-DB13	3,75	-2,32	4,51	1,00	-5,31	3,91	-0,47	-0,14	3,91
LIFE-RAFT-DB14	3,59	-1,92	2,56	0,48	-0,16	2,17	-0,48	0,16	2,17
LIFE-RAFT-DB15	1,91	0,90	1,60	0,78	-3,60	3,60	-0,47	-0,10	3,90
LIFE-RAFT-DB16	1,95	-0,53	3,59	0,21	1,29	2,15	-0,21	-1,29	2,15
LIFE-RAFT-DB17	2,19	-0,96	1,01	1,39	-7,90	1,46	-1,39	7,90	1,46
LIFE-RAFT-DB18	3,68	-4,96	5,37	0,34	-1,85	2,50	-0,49	1,58	2,63
LIFE-RAFT-DB19	3,93	-3,30	3,01	0,38	-3,33	2,16	-0,59	1,59	2,28
LIFE-RAFT-DB20	3,15	-4,49	3,35	0,39	-1,80	2,50	-0,38	2,98	1,64
LIFE-RAFT-DB21	0,88	0,00	2,50	0,18	0,00	2,40	-0,18	0,00	2,40
LIFE-RAFT-DB22	0,99	0,00	2,40	0,14	0,00	2,30	-0,14	0,00	2,30
LIFE-CAPSULE	3,52	0,00	1,90	1,44	0,00	2,00	-1,44	0,00	2,00
USCG-RESCUE	2,48	0,00	3,80	0,32	0,00	3,40	-0,32	0,00	3,40
AVIATION-1	3,39	0,00	2,40	1,49	0,00	2,40	-1,49	0,00	2,40
AVIATION-2	2,71	0,00	3,80	0,72	0,00	3,40	-0,72	0,00	3,40
SEA-KAYAK	1,16	11,12	4,12	0,41	0,00	4,39	-0,41	0,00	4,39
SURFBOARD	1,93	0,00	8,30	0,51	0,00	6,70	-0,51	0,00	6,70
WINDSURFER	2,25	5,03	2,50	0,69	-1,30	2,96	-0,69	1,30	2,96
SAILBOAT-1	2,00	0,00	8,30	2,23	0,00	6,70	-2,23	0,00	6,70
SAILBOAT-2	2,67	0,00	8,30	2,98	0,00	6,70	-2,98	0,00	6,70
SKIFF-1	3,15	0,00	2,20	1,29	0,00	2,20	-1,29	0,00	2,20
SKIFF-2	2,87	3,98	3,33	0,32	-2,93	2,53	-0,62	1,03	3,05
SKIFF-3	1,65	0,00	3,10	0,39	0,00	2,90	-0,39	0,00	2,90
SPORT-BOAT	6,54	0,00	3,00	2,19	0,00	2,80	-2,19	0,00	2,80
SPORT-FISHER	5,55	0,00	3,30	2,27	0,00	3,00	-2,27	0,00	3,00
FISHING-VESSEL-1	2,47	0,00	12,00	2,76	0,00	9,40	-2,76	0,00	9,40
FISHING-VESSEL-2	2,67	0,00	8,30	2,98	0,00	6,70	-2,98	0,00	6,70
FISHING-VESSEL-3	2,80	0,00	8,30	3,13	0,00	6,70	-3,13	0,00	6,70
FISHING-VESSEL-4	2,47	0,00	8,30	2,76	0,00	6,70	-2,76	0,00	6,70
FISHING-VESSEL-5	1,80	0,00	3,79	2,01	0,00	3,30	-2,01	0,00	3,30
FISHING-VESSEL-6	3,72	-0,87	3,33	1,41	2,00	3,36	-1,41	-2,00	3,36
COASTAL-FREIGHTER	1,87	0,00	8,30	2,09	0,00	6,70	-2,09	0,00	6,70
FV-DEBRIS	1,97	0,00	8,30	0,36	0,00	6,70	-0,36	0,00	6,70
BAIT-BOX-1	0,72	15,18	5,59	1,86	-5,26	4,20	-1,86	5,26	4,20
BAIT-BOX-2	2,53	9,01	3,05	1,09	-2,76	4,14	-1,09	2,76	4,14
BAIT-BOX-3	1,15	7,94	3,17	1,48	-0,32	2,99	-1,48	0,32	2,99
REFUGEE-RAFT-1	1,56	8,30	1,53	0,078	2,70	1,52	-0,078	-2,70	1,52
REFUGEE-RAFT-2	6,43	-3,47	3,63	2,22	0,00	7,12	-2,22	0,00	7,12
SEWAGE	1,79	0,00	3,10	0,16	0,00	2,90	-0,16	0,00	2,90
MED-WASTE-1	2,75	0,00	12,00	0,50	0,00	9,40	-0,50	0,00	9,40
MED-WASTE-2	3,64	0,00	12,00	0,67	0,00	9,40	-0,67	0,00	9,40
MED-WASTE-3	4,34	0,00	3,10	0,74	0,00	2,90	-0,74	0,00	2,90
MED-WASTE-4	2,95	0,00	5,40	0,54	0,00	4,50	-0,54	0,00	4,50
MED-WASTE-5	1,79	0,00	12,00	0,16	0,00	9,40	-0,16	0,00	9,40
MED-WASTE-6	1,79	0,00	3,10	0,16	0,00	2,90	-0,16	0,00	2,90
MED-WASTE-7	1,79	0,00	2,40	0,16	0,00	2,30	-0,16	0,00	2,30

TAB. B.2 – Coefficients empiriques pour les 63 classes d'objets dérivants, pour DWL et CWL (à droite et à gauche).

Annexe C Vitesses de dérive

Nous calculons, pour les différents taux d'immersion utilisés dans MOTHY (avec un courant nul), les modules des vitesses de dérive en fonction de la force du vent.

À courant nul, rappelons que le coefficient multiplicateur du module du vent à dix mètres, que nous notons coefficient de dérive, est (cf. 4.2) :

$$\frac{a}{a+b} = \frac{\sqrt{\rho_a \cdot C_a \cdot S_a}}{\sqrt{\rho_a \cdot C_a \cdot S_a} + \sqrt{\rho_w \cdot C_w \cdot S_w}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a} \cdot \frac{I}{1-I}}} \quad (C.1)$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} \rho_a = 1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \\ \rho_w = 1026 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \\ C_a = C_w = 1, \\ I \text{ est le taux d'immersion donc } S_w = I \cdot S \text{ et } S_a = (1 - I) \cdot S. \end{array} \right.$

Les modules des vitesses de dérive de MOTHY peuvent être comparés (cf. FIG. C.1) à ceux calculés (DWL et CWL) à partir des coefficients du *leeway* pour les soixante-trois objets SAR (cf. Annexe B).

Sur chaque vignette, en plus des courbes en pointillés représentant les vitesses de dérive de MOTHY pour les neuf taux d'immersion, six courbes sont superposées. Les trois courbes en traits pleins représentent les valeurs pour DWL et les trois en pointillés celles pour CWL lorsque l'objet dérive sur la droite du vent (les valeurs lorsque l'objet dérive sur la gauche du vent sont similaires). Pour DWL et CWL, la courbe la plus épaisse représente la valeur moyenne et les deux autres l'intervalle à 95%, à savoir la valeur moyenne transposée de plus ou moins le double de l'écart-type.

C. VITESSES DE DÉRIVE

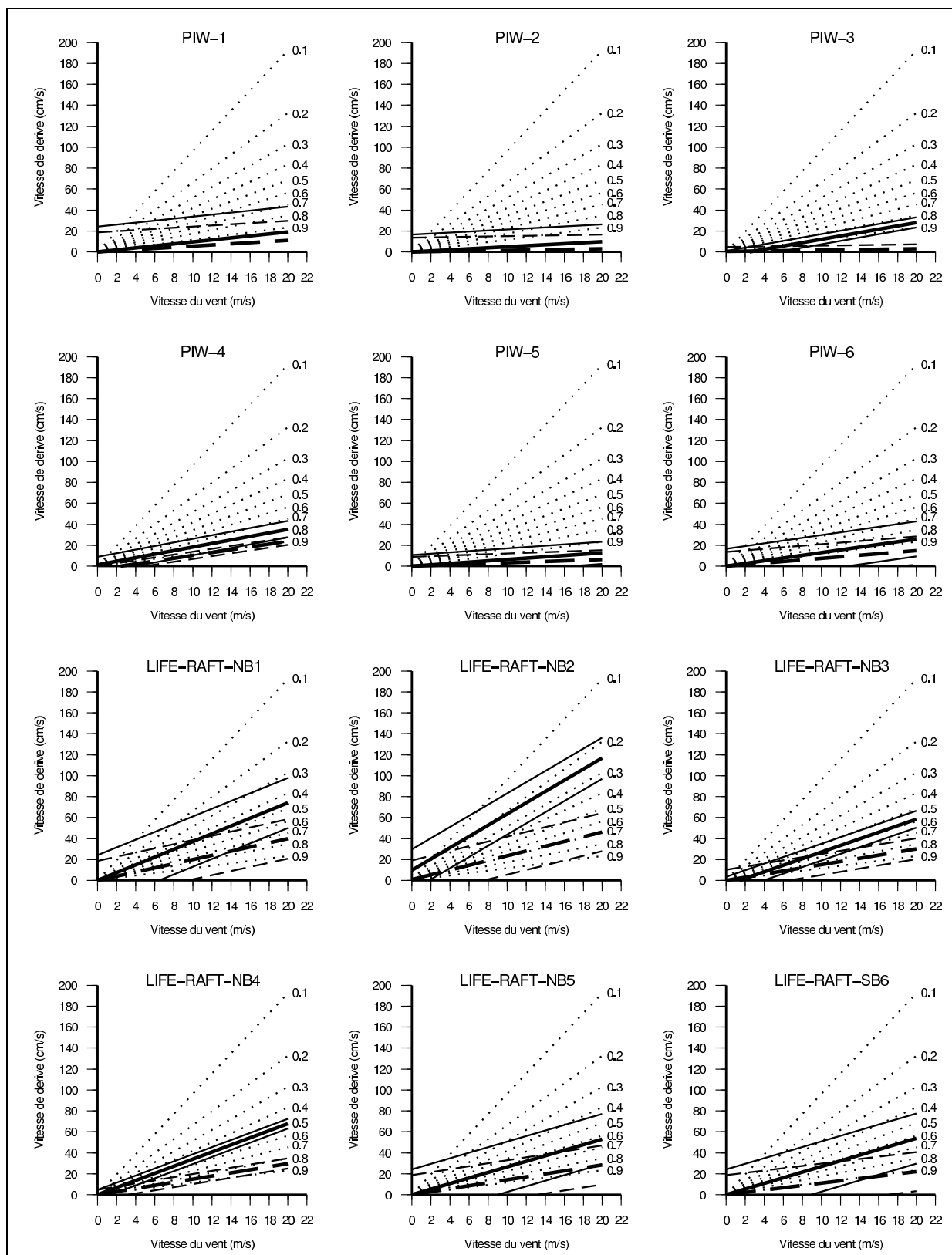


FIG. C.1 – Comparaison des vitesses de dérive de *MOTHY* et *LEEWAY*, partie 1.

C. VITESSES DE DÉRIVE

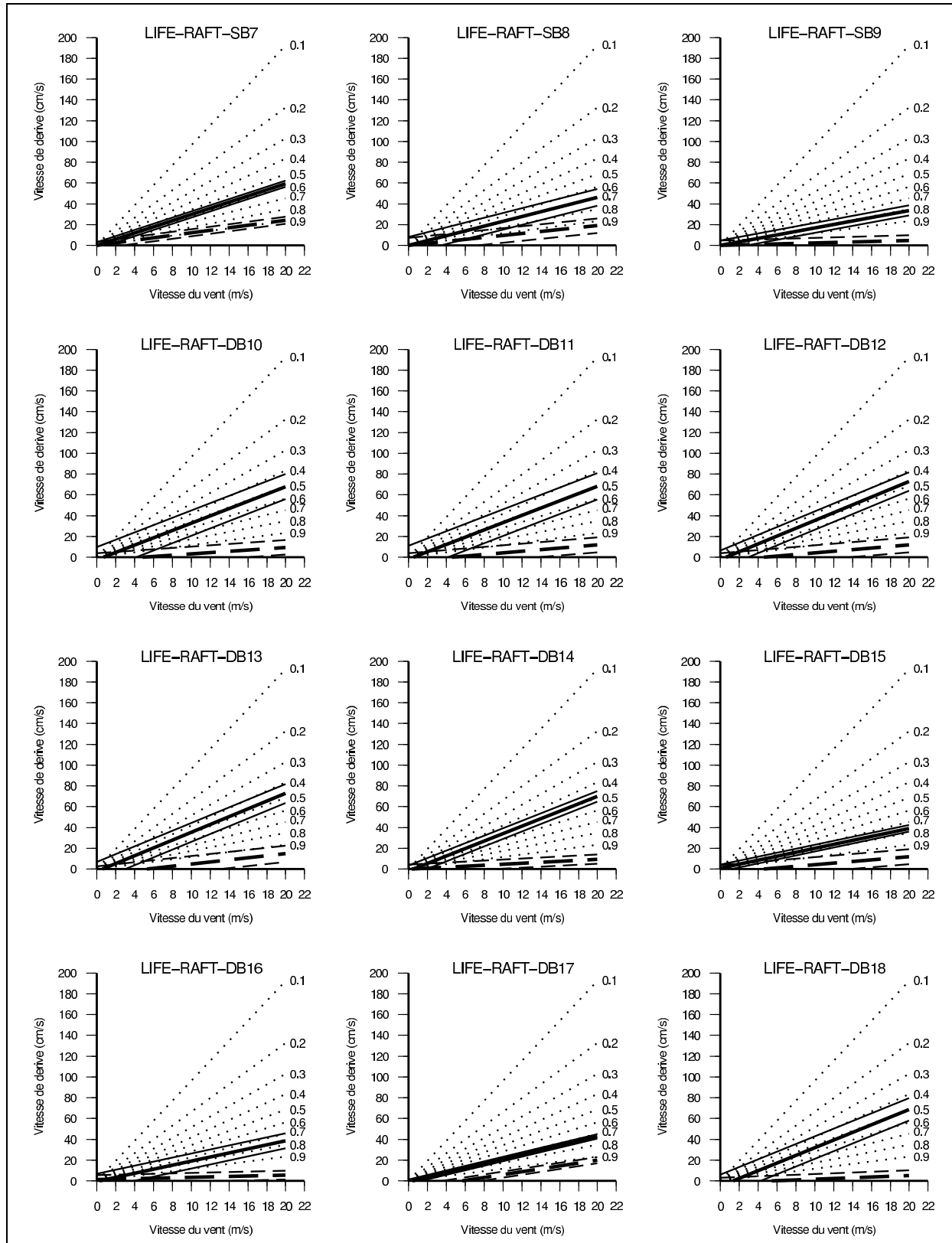


FIG. C.1 – Comparaison des vitesses de dérive de MOthy et LEEWAY, partie 2.

C. VITESSES DE DÉRIVE

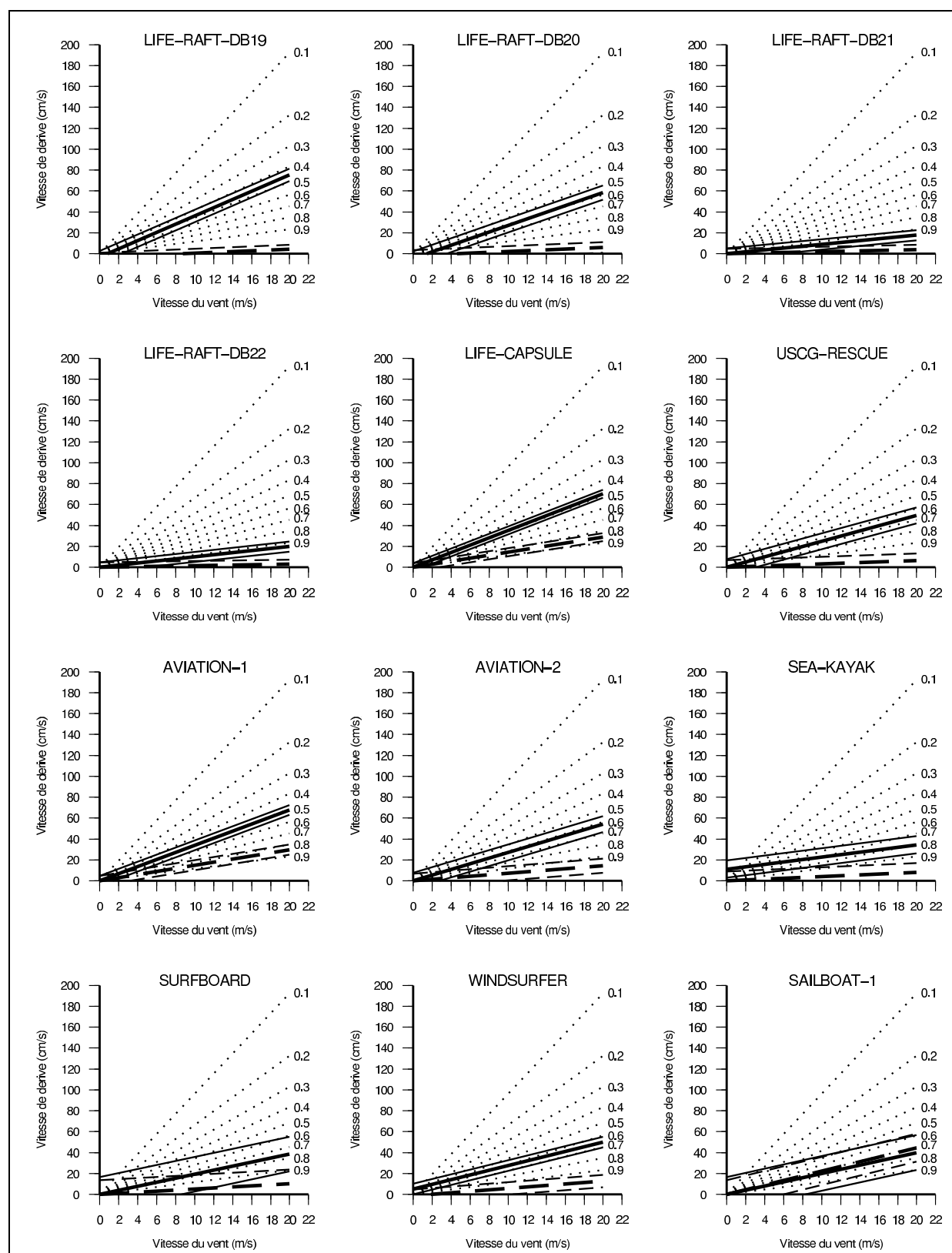


FIG. C.1 – Comparaison des vitesses de dérive de *MOTHY* et *LEEWAY*, partie 3.

C. VITESSES DE DÉRIVE

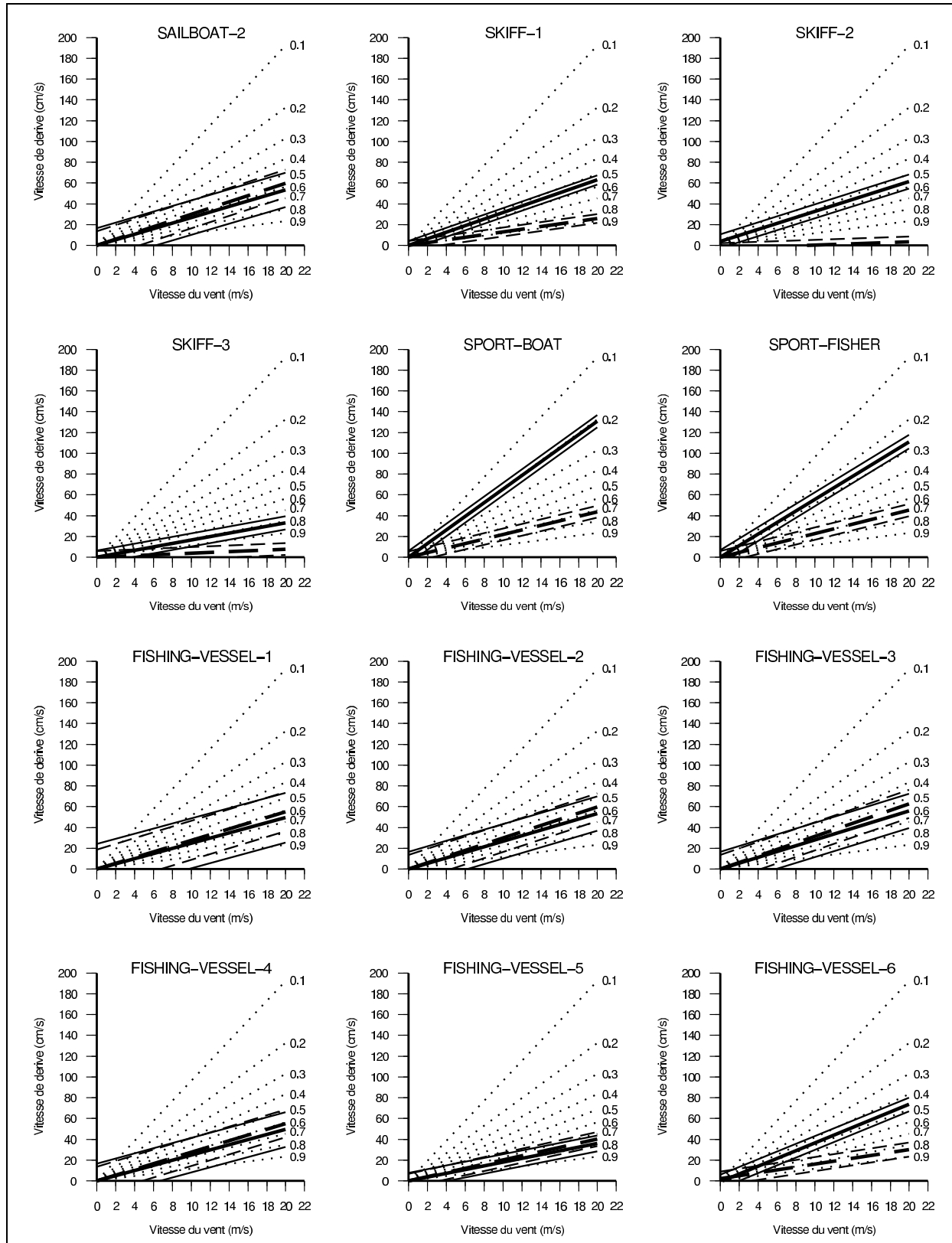


FIG. C.1 – Comparaison des vitesses de dérive de *MOTHY* et *LEEWAY*, partie 4.

C. VITESSES DE DÉRIVE

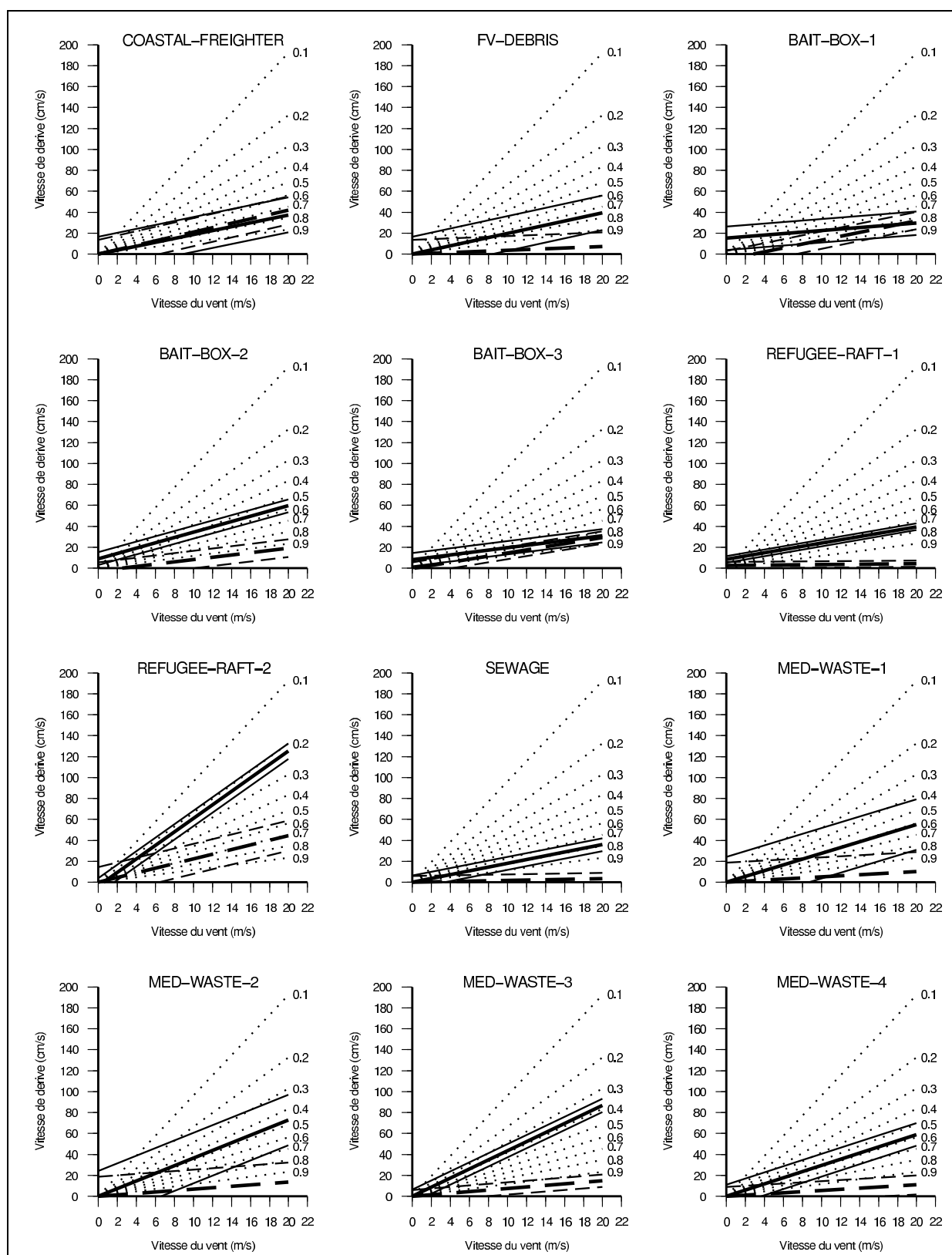


FIG. C.1 – Comparaison des vitesses de dérive de *MOTHY* et *LEEWAY*, partie 5.

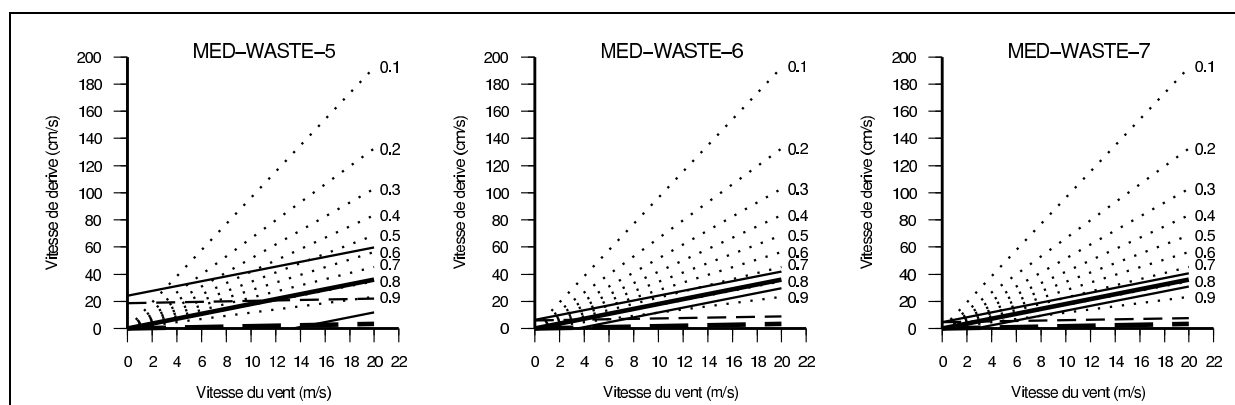


FIG. C.1 – Comparaison des vitesses de dérive de *MOTHY* et *LEEWAY*, partie 6.

Annexe D Liste des simulations

Voici dans les tableaux D.1 à D.7 la liste de toutes les simulations réalisées sur les cas réels décrits en 1.1, avec différentes versions de MOTHY et différents forçages atmosphériques ou océaniques.

Version de MOTHY	Forçage atmosphérique	Forçage océanique	Marée
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
initiale	Vent mesuré	aucun	OUI
initiale	Prévision CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
incertitude sur le vent	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
MOTHY-L, BAIT-BOX-1	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI

TAB. D.1 – Liste des simulations pour les deux premières phases de l'exercice Dourvac'h 1991, jusqu'à l'échéance finale.

Version de MOTHY	Forçage atmosphérique	Forçage océanique	Marée
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
initiale	Vent mesuré	aucun	OUI
initiale	Prévision CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
incertitude sur le vent	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
MOTHY-L, BAIT-BOX-1	Analyses CEP (0,5 degré)	aucun	OUI

TAB. D.2 – Liste des simulations pour les deux phases de l'exercice Dourvac'h 1992, jusqu'à l'échéance finale.

Version de MOTHY	Forçage atmosphérique	Forçage océanique	Marée
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
initiale	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	aucun	OUI
initiale	Prévision CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
initiale	Prévision ARPEGE (0,25 degré)	aucun	OUI
incertitude sur le vent	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
incertitude sur le vent	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	aucun	OUI
MOTHY-L, BAIT-BOX-1	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
MOTHY-L, BAIT-BOX-1	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	aucun	OUI

TAB. D.3 – Liste des simulations de dérives réalisées pour deux conteneurs de l'accident du MSC Martina en 2000, jusqu'à l'échéance finale.

D. LISTE DES SIMULATIONS

Version de MOTHY	Forçage atmosphérique	Forçage océanique	Marée
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	NON
initiale	Analyse ARPEGE (0,5 degré)	aucun	NON
initiale	Analyse NOGAPS (1 degré)	aucun	NON
initiale	Prévision CEP (0,5 degré)	aucun	NON
initiale	Prévision ARPEGE (0,5 degré)	aucun	NON
incertitude sur le vent	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	NON
incertitude sur le vent	Analyse ARPEGE (0,5 degré)	aucun	NON
incertitude sur le vent	Analyse NOGAPS (1 degré)	aucun	NON
MOTHY-L, <i>LIFERAFT-DB20</i>	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
MOTHY-L, <i>LIFERAFT-DB20</i>	Analyse ARPEGE (0,5 degré)	aucun	OUI

TAB. D.4 – Liste des simulations de dérives réalisées pour l'exercice mer de Norvège 2003, jusqu'à l'échéance finale.

Version de MOTHY	Forçage atmosphérique	Forçage océanique	Marée
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	NON
initiale	Analyse ARPEGE (0,5 degré)	aucun	NON
initiale	Analyse NOGAPS (1 degré)	aucun	NON
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	FOAM	NON
initiale	Analyse ARPEGE (0,5 degré)	FOAM	NON
initiale	Analyse NOGAPS (1 degré)	FOAM	NON
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	MERCATOR	NON
initiale	Analyse ARPEGE (0,5 degré)	MERCATOR	NON
initiale	Analyse NOGAPS (1 degré)	MERCATOR	NON
initiale	Prévision CEP (0,5 degré)	aucun	NON
initiale	Prévision ARPEGE (0,5 degré)	aucun	NON
incertitude sur le vent	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	NON
incertitude sur le vent	Analyse ARPEGE (0,5 degré)	aucun	NON
incertitude sur le vent	Analyse NOGAPS (1 degré)	aucun	NON
MOTHY-L, <i>LIFERAFT-DB10</i>	Analyse CEP (0,5 degré)	aucun	OUI
MOTHY-L, <i>LIFERAFT-DB10</i>	Analyse ARPEGE (0,5 degré)	aucun	OUI

TAB. D.5 – Ensemble des simulations de dérives réalisées pour l'exercice mer de Norvège 2004, jusqu'à l'échéance finale.

D. LISTE DES SIMULATIONS

Version de MOTHY	Forçage atmosphérique	Forçage océanique	Marée
Pour les points de départ des 14, 17, 20 et 23 décembre, jusqu'au 25 décembre			
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	moyennes MERCATOR	NON
initiale	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	moyennes MERCATOR	NON
hydrocarbures	Analyse CEP (0,5 degré)	moyennes MERCATOR	NON
hydrocarbures	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	moyennes MERCATOR	NON
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	FOAM	NON
initiale	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	FOAM	NON
hydrocarbures	Analyse CEP (0,5 degré)	FOAM	NON
hydrocarbures	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	FOAM	NON
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	MFS	NON
initiale	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	MFS	NON
hydrocarbures	Analyse CEP (0,5 degré)	MFS	NON
hydrocarbures	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	MFS	NON
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	NWMED (MFS imbriqué)	NON
initiale	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	NWMED (MFS imbriqué)	NON
hydrocarbures	Analyse CEP (0,5 degré)	NWMED (MFS imbriqué)	NON
hydrocarbures	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	NWMED (MFS imbriqué)	NON
initiale	Analyse CEP (0,5 degré)	MERCATOR	NON
initiale	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	MERCATOR	NON
hydrocarbures	Analyse CEP (0,5 degré)	MERCATOR	NON
hydrocarbures	Analyse ARPEGE (0,25 degré)	MERCATOR	NON
Pour un point de départ quotidien, jusqu'à 54 heures			
initiale	PEARP runs 00 à 10 (0,5 degré)	moyennes MERCATOR	NON
incertitude sur le vent	PEARP00=PA18 (0,5 degré)	moyennes MERCATOR	NON

TAB. D.6 – Ensemble des simulations de dérives réalisées pour l'exercice en Méditerranée en décembre 2004.

Version de MOTHY	Forçage atmosphérique	Forçage océanique	Marée
initiale	PEARP runs 00 à 10 (0,5 degré)	moyennes MERCATOR	NON
incertitude sur le vent	PEARP00=PA18 (0,5 degré)	moyennes MERCATOR	NON
initiale	PEARP runs 00 à 10 (0,5 degré)	MERCATOR	NON
incertitude sur le vent	PEARP00=PA18 (0,5 degré)	MERCATOR	NON
initiale	PEARP runs 00 à 10 (0,5 degré)	FOAM	NON
incertitude sur le vent	PEARP00=PA18 (0,5 degré)	FOAM	NON

TAB. D.7 – Ensemble des simulations de dérives réalisées pour la dérive du flotteur-profleur en Méditerranée du 15 janvier au 15 mars 2005, pour un point de départ quotidien jusqu'à 54 heures.

Annexe E Modèle de nappe d'hydrocarbures

Dans le modèle de polluant de MOTHY, version hydrocarbures, la nappe est représentée comme un ensemble de gouttes indépendantes dont les caractéristiques évoluent en fonction du type d'hydrocarbure et de l'environnement. Leur nombre est fixé dans la version opérationnelle du modèle à 480. Leur distribution de taille est linéaire et le diamètre des gouttes varie de 300 à 1200 micromètres.

Le mouvement de chaque goutte est déterminé par :

- le courant qui induit un mouvement horizontal,
- la diffusion turbulente qui induit un mouvement tridimensionnel,
- la flottabilité qui induit un mouvement vertical.

MOTHY peut également fonctionner en modélisant une fuite continue de polluant. Les gouttes sont dans ce cas lâchées par paquets à intervalles de temps réguliers.

Calcul de la diffusion turbulente

La diffusion turbulente est un phénomène tridimensionnel représenté par un processus aléatoire ajusté par un coefficient de diffusion.

La distance D_h parcourue sur l'horizontale pendant un pas de temps Δt est donnée par $D_h = R\sqrt{2K_h\Delta t}$, avec K_h coefficient de diffusion horizontale et R un nombre aléatoire compris entre 0 et 1.

Celle parcourue sur la verticale D_v est donnée par $D_v = (2R - 1)\sqrt{2K_v\Delta t}$, avec K_v coefficient de diffusion verticale.

Calcul de la flottabilité

La force de flottabilité fournit à chaque goutte un mouvement vertical dont la vitesse dépend du diamètre et de la densité des gouttes, de la viscosité et de la densité de l'eau de mer. Ainsi, les grosses gouttes restent en surface et les petites gouttes ont tendance à couler.

La vitesse verticale est donnée par :

$$U_f = g \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot \frac{1}{18\nu} \quad \text{pour les gouttes de diamètre } d \leq d_c$$

$$U_f = \sqrt{\frac{8}{3} \cdot g \cdot d \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)} \quad \text{pour les gouttes de diamètre } d > d_c$$

E. MODÈLE DE NAPPE D'HYDROCARBURES

- le diamètre critique ayant pour valeur $d_c = \frac{9.52 \cdot v^{\frac{2}{3}}}{\sqrt[3]{g \cdot (1 - \frac{\rho_0}{\rho})}}$
- et avec :
 - ρ densité de l'eau de mer,
 - v viscosité de l'eau de mer,
 - ρ_0 masse volumique de la goutte de pétrole,
 - g accélération de la pesanteur.

Paramètres nécessaires au lancement du modèle

Les paramètres nécessaires à l'utilisation du modèle en opérationnel sont :

- la position de l'accident ou de la nappe observée (latitude et longitude),
- la date et l'heure de départ de la simulation,
- le type du polluant qui induit sa masse volumique,
- la durée de lâcher du polluant (dans le cas d'une fuite continue),
- la durée de la simulation (au maximum 120 heures).