IFREMER DEL/AO Jouan. M. Lazure. P. METEO-FRANCE Daniel P. Josse P.

Décembre 2001

METEO FRANCE

Evaluation du potentiel de MARS3D pour la prévision de dérive d'hydrocarbures et comparaison avec MOTHY dans le cas de l'*Erika*



Rapport Liteau

SOMMAIRE

1	Int	roduction : Prévoir les dérives	2
	1.1	La prévision numérique opérationnelle	2
	1.2	Les dérives de l'Erika	2
	1.3	Evaluation de MARS3D	4
2	Eta	t de l'art des techniques de modélisation de dérive de nappes	5
	2.1	Comportement des hydrocarbures dans le milieu marin	5
	2.2	Transport des hydrocarbures	7
	2.2.	Les différents types de modèle hydrodynamique	8
	2.2.2	2 Modélisation du transport et de la diffusion des hydrocarbures	8
3	MC	OTHY : Modèle Océanique de Transport d'HYdrocarbures	10
4	Le	modèle hydrodynamique MARS 3D	11
4 5	Le : Apj	modèle hydrodynamique MARS 3D plication au cas de l'Erika	11 13
4 5	Le : Apj 5.1	modèle hydrodynamique MARS 3D plication au cas de l'Erika Caractéristiques du pétrole	11 13 13
4 5	Le : Apj 5.1 5.2	modèle hydrodynamique MARS 3D plication au cas de l'Erika Caractéristiques du pétrole Adaptation de MARS3D	11 13 13 13
4 5	Le : Apj 5.1 5.2 5.3	modèle hydrodynamique MARS 3D plication au cas de l'Erika Caractéristiques du pétrole Adaptation de MARS3D Résultats des simulations	11 13 13 13 17
4 5	Le : Apj 5.1 5.2 5.3 5.4	modèle hydrodynamique MARS 3D plication au cas de l'Erika Caractéristiques du pétrole Adaptation de MARS3D Résultats des simulations Comparaison avec MOTHY	11 13 13 13 17 27
4 5	Le : Apj 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5	modèle hydrodynamique MARS 3D plication au cas de l'Erika Caractéristiques du pétrole Adaptation de MARS3D Résultats des simulations Comparaison avec MOTHY Discussion - Orientations futures	11 13 13 13 17 27 29
4 5 6	Le : Apj 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 Cor	modèle hydrodynamique MARS 3D plication au cas de l'Erika Caractéristiques du pétrole Adaptation de MARS3D Résultats des simulations Comparaison avec MOTHY Discussion - Orientations futures nclusion, perspectives opérationnelles	11 13 13 13 17 27 29 30

1

Ifremer

1 Introduction : Prévoir les dérives

1.1 La prévision numérique opérationnelle

L'importance du trafic des navires pétroliers et la multiplication des puits de forages offshore augmentent chaque jour les risques de pollution accidentelle du milieu marin par des hydrocarbures.

Pour faire face efficacement à ce type d'incident, il est important de pouvoir prévoir le comportement du pétrole déversé, à court et à moyen terme. La simulation numérique apparaît comme un outil essentiel pour évaluer les risques environnementaux et permettre la mise en œuvre les moyens de lutte adaptés contre la pollution.

Les modèles numériques permettent d'intégrer les lois de comportement d'un corps dérivant ou polluant quelconque, d'en représenter les interactions avec l'atmosphère et l'océan, et de décrire de façon aussi réaliste que possible l'état et les évolutions de ces environnements thermodynamiques complexes.

Un système opérationnel de prévision utilise de tels modèles en environnement opérationnel de production. Il résulte d'une recherche perpétuelle d'optimum entre la science disponible, les contraintes d'ingénierie et les objectifs d'emploi. Pour fournir aux autorités des propositions de dérive, il est intégré dans une « boucle de lutte » comprenant les observations, leur analyse, la prévision et la décision opérationnelle. Il est initialisé par les observations. Il doit pouvoir être lancé aussi souvent que nécessaire et son temps de réponse doit être inférieur à l'heure, ceci incluant l'intégration des modèles et l'expertise indispensable des prévisionnistes.

Tout modèle s'inscrit en effet dans un domaine d'emploi et possède par conséquent des limites. Les ébauches de prévision numérique d'un système opérationnel sont donc complétées par un travail d'expertise, c'est-à-dire de mise en regard des résultats par rapport à la situation, de validation du comportement des modèles, et idéalement par un échange avec les observateurs et autorités chargées de la lutte, pour aboutir à la prévision.

Dans le cadre du plan POLMAR, le Préfet Maritime est assisté par le Cedre (en qualité d'expert *ès* pollution marine), et Météo-France assure le soutien météo-océanique et réalise la prévision des dérives. Le modèle utilisé est le modèle MOTHY.

1.2 Les dérives de l'Erika

Le 12 décembre 1999, le pétrolier maltais Erika, chargé de 31 000 tonnes de fuel lourd appartenant au groupe TotalFina, s'est cassé en deux à 9h du matin dans les eaux internationales, au large de la pointe sud du Finistère (47°16' nord, 4°25' ouest). Les conditions météorologiques défavorables (vents de force 8) et les fortes vagues (jusqu'à 6 m de creux) ont d'abord éventré l'avant du navire avant que celui-ci ne se brise, répandant ainsi près de 10 000 tonnes de fuel lourd de type no.2, très dense (1000 kg/m³) et visqueux, et considéré comme insoluble. La partie avant a sombré la nuit suivante, à 4 miles au sud-est du lieu de la fracture. La partie arrière, qui renfermait potentiellement la plus grande quantité d'hydrocarbures, a disparu à 7 miles de la partie avant, après avoir été remorquée pendant près de 24 heures par l'Abeille-Flandres.

îfremer

La marée noire provoquée par ce naufrage fut la plus grande subie par la France depuis celle de l'Amoco Cadiz (1978). Au total, on estime à 20 tonnes la quantité totale de fuel déversée (10 000 tonnes ont pu être pompées depuis l'épave arrière).

Dès le 12 décembre, dans le cadre du plan POLMAR, le Préfet Maritime a lancé un programme quotidien de vols de surveillance. Dans le même temps, plusieurs modèles prévisionnels de dérive de nappes en mer sont activés. En tout premier lieu, le modèle MOTHY, développé par Météo-France dans le cadre d'une collaboration avec le Cedre. Deux modèles commerciaux sont également activés : le modèle anglais OSIS, dont dispose le Cedre et le modèle américain OILMAP utilisé par Totalfina.

Les prévisions de ces différents modèles le jour de l'accident ont de quoi inquiéter. Les nappes doivent avoir dépassé l'île d'Yeu (Vendée) le 17 décembre pour le modèle américain OILMAP. Elles s'approchent de l'île le même jour selon le modèle britannique OSIS (cf. fig.1). Par contre, selon le modèle MOTHY de Météo-France, les nappes restent plus au large ; cette dernière prévision de dérive se montre la plus proche des observations aériennes.



Fig. 1. Simulations du 12 décembre, avec 3 modèles différents (MOTHY, OSIS, OILMAP) (source : Cedre)

Une cellule de crise s'installe au centre de prévisions marines de Météo-France à Toulouse, pour chaque jour recaler les prévisions de dérive, au vu des résultats des observations aériennes. Relayées vers les autorités terrestres par la Préfecture Maritime et le Cedre, elles deviennent l'information de référence.

L'essentiel de la pollution est bien arrivé du 24 au 27 décembre, dans la zone indiquée par la prévision de dérive, des nappes moins importantes, qui ont touché le littoral du Morbihan à l'ouest de Belle-Île, n'ont pas été prévues. Les difficultés liées à l'observation des nappes expliquent en grande partie cette absence de prévision : les nappes ont échappé aux observations aériennes et n'ont pas pu être prises en compte dans les prévisions de dérive.

METEO

lfre<u>mer</u>

Même si les prévisions ont été globalement conformes à ce qui a été observé dans la réalité, plusieurs pistes d'amélioration ont été identifiées.

L'amélioration de la modélisation hydrodynamique figure parmi ces axes de progrès.

1.3 Evaluation de MARS3D

Le présent projet, mené par les équipes de l'Ifremer et de Météo-France, a pour objectif de tester la capacité d'un modèle hydrodynamique tridimensionnel décrivant la colonne d'eau entière, le modèle MARS3D de l'Ifremer, de prédire la dérive d'hydrocarbures en mer. Plus encore que d'améliorer l'outil opérationnel actuel, il s'agit ici de préparer l'avenir : le futur modèle opérationnel de prévision de dérive de nappes sera vraisemblablement un modèle tridimensionnel aux équations primitives.

Ce projet est financé par le ministère de l'environnement dans le cadre du programme Liteau

2 Etat de l'art des techniques de modélisation de dérive de nappes

2.1 Comportement des hydrocarbures dans le milieu marin

Lorsque des hydrocarbures sont déversés en mer, ils subissent un grand nombre de processus de transformation et de transport : évaporation, étalement, dérive, dispersion, émulsification, dissolution, biodégradation, sédimentation, échouage. Certains d'entre eux agissent directement sur les propriétés du produit, lesquelles modifient à leur tour le comportement hydrodynamique du polluant.

Les formules empiriques des processus de transformation physico-chimique, datant d'une quinzaine d'années, ont été sensiblement améliorées et continuent d'être utilisées par les modèles. Le facteur limitant de ces lois est leur caractère empirique, nécessitant plusieurs paramètres pas toujours disponibles. De plus, ces lois ont été établies, pour la majorité, dans des conditions de laboratoires, et manquent de validation *in situ*. Enfin, la façon dont interagissent entre eux ces différents processus reste à explorer.

Dans un premier temps, la nappe commence par s'étaler. Cette phase est contrôlée par les forces de gravité, de viscosité et de tension inter-faciale. L'essentiel des pertes par évaporation se produit dans les premières 48 heures. Ensuite lorsque la nappe a atteint une épaisseur très faible, celle-ci se fractionne en petites nappes (dizaines de mètres), plaques (1 à 5 m) et boulettes (diamètre < 10 cm), puis en gouttes en fonction de l'état de la mer. Le pétrole dans ces différentes formes est alors transporté par les courants marins. Lors de cette deuxième phase, les conditions météorologiques, le vent en premier lieu, jouent un rôle important sur le transport des hydrocarbures, auxquelles viennent s'ajouter les effets des vagues et de la turbulence sur la dispersion dans la colonne d'eau.

Dès qu'un hydrocarbure est rejeté en mer, commence par s'étaler jusqu'à former une fine couche à la surface. Le processus *d'étalement* est surtout déterminant dans les premières heures de l'incident. De la surface de la nappe dépendent en effet les transferts de masse par évaporation et dissolution.

Le taux d'étalement dépend de la tension de surface liée à la viscosité, des courants et du vent. Ce processus se déroule selon 3 temps. Plus la tension superficielle est forte, plus l'étalement est lent. Les équations de base de Fay (1969) et Hoult (1972) servent aujourd'hui à la majorité des algorithmes. Cependant, d'autres facteurs non pris en compte dans cette formulation, interviennent dans le processus d'étalement. Parmi ces facteurs on retrouve le vent qui a tendance à étirer la nappe dans sa direction (Lehr *et al.*, 1984), les vagues et les courants pour leur action directe sur la nappe, et les processus modifiant la viscosité (évaporation, émulsification).

Après quelques heures, la nappe d'hydrocarbure commence à se fragmenter sous l'action des vagues et du vent. Ces plaques et galettes ainsi formées ont tendance à rester en surface, en raison de leur densité plus faible.

Durant les deux premiers jours d'un déversement accidentel d'hydrocarbure, *l'évaporation* est le processus dominant, en terme de transfert de masse. L'intensité de ce phénomène dépend essentiellement de la composition du pétrole, des conditions climatiques (ensoleillement, vent) et des conditions hydrodynamiques (vagues, température). Pour un composant léger, comme le kérosène par exemple, le taux d'évaporation peut atteindre les 80 % dès les premières heures. Pour un composé plus lourd, comme celui de l'Erika, ce taux dépasse rarement les 10 % (Source : Cedre).

Des méthodes simples de quantification de ce processus furent développées à partir du modèle analytique proposé par Stiver et Mackay (1984). Cette méthode fait l'hypothèse d'une dépendance linéaire entre le « boiling point » et le taux d'évaporation, la difficulté étant d'interpoler ce « boiling point » à partir des données standard disponibles pour différents types d'hydrocarbure. Le transfert de masse peut aussi s'évaluer à partir de la température d'ébullition, la densité et la masse moléculaire pour une fraction de pétrole spécifiée.

Plus récemment, Fingas (1998) a proposé une méthode empirique dérivée de ses expériences. Il semble qu'actuellement, malgré des hypothèses simplificatrices, la méthode analytique reste la plus simple et la moins coûteuse à adapter à chaque cas.

La dispersion du pétrole, à partir de la surface sous forme de gouttes, dépend de la turbulence. Le déferlement des vagues fournit l'énergie nécessaire au fractionnement des nappes en petites gouttes, créant ainsi une émulsion eau-pétrole. Ces gouttes entraînées sous la surface sont alors soumises aux effets de la turbulence. Le facteur limitant de ce processus est la viscosité du pétrole. Une pellicule de fuel visqueux comme dans le cas de l'Erika se dispersera en effet moins sous l'effet des vagues. Le transfert des gouttes depuis la surface vers l'intérieur de la colonne d'eau dépend de l'énergie dissipée par les vagues, de la surface de la nappe, ainsi que du diamètre des gouttes et de leurs caractéristiques. Le diamètre de ces gouttes est généralement compris entre 10 et 1200 µm (Delvigne et Sweeney, 1988). Certaines de ces gouttes sont alors dispersées à l'intérieur de la colonne d'eau sur une profondeur de l'ordre de 2 fois la hauteur des vagues déferlantes, tandis que les plus grosses d'entre elles sont maintenues en surface par les forces de flottabilité et forment un mince film en surface (Korontenko, 2000). Sous un certain seuil de vent, on considère que la dispersion induite est nulle. Ce mécanisme est encore aujourd'hui plutôt mal compris par rapport aux autres phénomènes, et sa modélisation s'appuie essentiellement sur les observations en laboratoire.

L'émulsification créée par les vagues désigne le mélange du polluant et de l'eau de mer. Lorsque les vagues sont très fortes, on assiste à un mélange d'eau dans le pétrole extrêmement visqueux. Ce phénomène est connu sous le nom de « mousse au chocolat ». Les hydrocarbures ont en effet une forte tendance à absorber de l'eau. Les émulsions eau-pétrole ainsi formées peuvent contenir jusqu'à 80 % d'eau. De telles émulsions sont très visqueuses, très denses et stables. Mackay *et al.* (1980) proposent une formulation empirique du taux d'émulsification en fonction de l'état de la mer (i.e. du vent). La viscosité et la densité de l'émulsion peuvent alors s'exprimer en fonction de ce taux. Dans le cas de l'Erika, le pétrole en émulsion contenait jusqu'à 30 % d'eau dans sa phase stabilisée (après 2 jours). Le pétrole rendu très collant et volumineux était de fait impossible à pomper (Source : Cedre).

Sous certaines conditions (mer de vent), on peut également observer la formation de filaments dans les zones de convergence (cellules de Langmuir) parallèles à la direction de

propagation des vagues (Leibovich 1998). Bien que ce phénomène soit reconnu et compris aujourd'hui, ses effets ne sont en général pas pris en compte dans les modèles.

La plupart des modèles considèrent que *l'advection horizontale* du pétrole résulte des effets combinés d'au moins 2 facteurs : l'effet direct du vent et les courants. La vitesse de déplacement de la particule s'obtient alors en faisant la somme vectorielle des vitesses induites par différents processus hydrodynamiques dont les échelles de temps et d'espace sont variables. Parmi les processus les plus courants on retrouve la circulation océanique de grande échelle, les courants de marée, la dérive de Stokes sous l'action de la houle et la circulation induite par le vent.

De manière très générale, la dérive en surface concerne en moyenne 50 à 70 % de la quantité de pétrole présente pour un hydrocarbure standard (Lonin, 1999). Le calcul de l'advection fait appel à des modèles hydrodynamiques et des prédictions météorologiques qui fournissent les données nécessaires au calcul des trajectoires.

D'autres processus interviennent sur des échelles de temps plus longues et ne peuvent être négligés lors des études d'impact.

Lors de la *biodégradation*, des bactéries se nourrissent du pétrole en suspension et le transforment en composés solubles. *L'oxydation* par le rayonnement ultra-violet réduit également le pétrole en composés solubles mais en quantité infime. Enfin, le processus de *sédimentation* peut survenir plus ou moins tôt, selon les conditions environnementales, en particulier la turbidité de l'eau. Les particules sédimentaires en suspension viennent se fixer sur les boulettes et gouttes de pétrole. Ces agrégats sont plus denses que l'eau et chutent vers le fond.

Les algorithmes développés pour ces phénomènes (étalement, dispersion, évaporation, émulsification) datent d'une quinzaine d'années pour la majorité et n'ont pas connu d'amélioration significatives depuis. Les principales difficultés de la modélisation proviennent du manque de données disponibles sur la nature du pétrole et de la grande diversité des conditions environnementales. Par ailleurs, le comportement physico-chimique fait appel à de nombreux paramètres empiriques souvent inconnus au début de l'incident. De plus le comportement du pétrole sous la surface échappe aux observations et peu de validations sur le terrain sont disponibles. Cependant dans la plupart des cas, le pétrole est rapidement sous forme d'émulsion, et les nappes très visqueuses sont peu dispersées sur la verticale.

Partant de ces considérations, l'essentiel de nos efforts s'est porté sur la capacité du modèle MARS3D à simuler la dérive du pétrole en surface.

2.2 Transport des hydrocarbures

Pour organiser la récupération du pétrole déversé et pouvoir protéger les zones exposées au risque de marée noire, la connaissance de la trajectoire des nappes est essentielle. C'est d'ailleurs sur cet aspect advectif que sont validés la plupart des modèles.

C METEO

2.2.1 Les différents types de modèle hydrodynamique

Les premiers modèles utilisés pour prévoir la dérive de nappe de pétrole étaient des modèles 2D qui calculaient uniquement le courant intégré sur la verticale, forcé par la marée et les vents. Pour estimer la vitesse de dérive en surface de la nappe on rajoutait à la vitesse du courant calculée un pourcentage de la vitesse du vent en surface (« wind factor ») compris entre 1 % et 5 % (Elliot 1991, Spaulding 1992, Proctor 1994, Varlamov 1999). Pour des vents faibles à moyens, l'angle de déviation entre la trajectoire de la nappe et celle du vent, est inférieur à 10°. Dans le cas de forts vents, cette déviation est considérée comme nulle.

Si ce type de modèle reste adapté au cas d'un traceur dissous dans une zone de prédominance des courants de marée et sans stratification verticale (ex : la Manche), son utilisation est inappropriée dans des régions fortement stratifiées, où la structure tridimensionnelle du courant est importante. L'impossibilité de pouvoir prédire les gradients de courants près de la surface constitue de plus un réel inconvénient pour simuler la dérive du pétrole dispersé.

Ces modèles de base ont depuis évolué vers des modèles plus complexes dits 2,5 D. Dans ce cas le modèle 2D est couplé avec un modèle 1D vertical, permettant de reproduire la structure verticale des courants horizontaux, notamment près de la surface. Ce type de modèle est très utilisé encore aujourd'hui, en raison de son faible coût en temps de calcul par rapport à un modèle totalement 3D, et de sa fiabilité. Ces modèles calculent les courants horizontaux sur la verticale à partir d'un profil analytique de viscosité turbulente choisi.

Pour traiter le cas des hydrocarbures, ces modèles peuvent avoir également recours à l'utilisation d'un « wind factor », pour simuler la dérive en surface. Ce facteur empirique ne peut être validé qu'à partir des premières observations (Daniel, 1999, Varlamov & Yoon, 1999).

Bien que ce type de modèle 2D+1D ne soit pas conservatif (les courants verticaux ne sont pas calculés), et ne puisse rendre compte des effets baroclines éventuels (entre autres de la densité), il prédit bien le comportement du pétrole dans la couche de surface. Ce type de modèle est d'ailleurs couramment utilisé pour des applications opérationnelles ; c'est le cas du modèle MOTHY de Météo-France (Daniel, 1996).

Ces dernières années des algorithmes complets décrivant le comportement des hydrocarbures en mer ont été développés. La majorité d'entre eux fonctionnent avec l'appui de modèles complètement 3D qui fournissent les données hydrodynamiques indispensables. C'est le cas du modèle de nappe OILMAP (Spaulding, 1992) fonctionnant avec GCOM3D (GEMS) et du modèle ADIOS de la NOAA par exemple. Ces modèles calculent la température et la salinité en 3 dimensions et sont capables de reproduire les éventuelles stratifications thermiques ou halines.

2.2.2 Modélisation du transport et de la diffusion des hydrocarbures

Deux approches sont possibles pour étudier le comportement des polluants en mer.

L'approche eulérienne est surtout employée dans le cas de traceurs dissous comme les pollutions chimiques ou bactériologiques. Dans ce cas, le produit étudié est considéré comme

un traceur passif non conservatif (qui n'agit pas sur la densité de l'eau), obéissant aux équations d'advection-diffusion pour la partie hydrodynamique et aux équations d'évolution (évaporation, dissolution, durée de vie...), en fonction des conditions environnementales. Le bilan des flux de polluants est alors calculé dans chaque maille.

Dans le cas d'une nappe d'hydrocarbures, une telle démarche n'est pas appropriée, car le produit n'est en général que faiblement soluble dans l'eau. Pendant la phase initiale d'étalement (1 à 2 jours), le pétrole subit un grand nombre de transformations. Il se trouve alors sous plusieurs formes : émulsions, petites nappes, gouttes dispersées. La représentation par des particules du pétrole déversé (représentation lagrangienne) devient alors tout à fait appropriée. Cette méthode simple s'avère plus efficace que le calcul de l'extension de la nappe d'hydrocarbure par une méthode de différences finies. Ce formalisme lagrangien de « particle tracking » est utilisé par la plupart des modèles dans le monde (Proctor, 1987, Spaulding, 1992, Varlamov *et al.* 1999). Le déplacement de ces gouttes dépend des courants (advection), de la turbulence (diffusion) et des forces de flottabilité (fonction du diamètre des gouttes). La distribution de la taille de ces gouttes est telle que les plus grosses, plus flottantes, ont tendance à rester en surface et se déplacent avec les courants de surface et le vent, tandis que les gouttes plus petites sont entraînées dans la colonne d'eau sous l'effet de la turbulence, et éventuellement réapparaissent à la surface. Ce phénomène dit de « resurfacing » fut d'ailleurs observé dans le cas de l'Erika (Source : Cedre).

On considère que la dispersion sous l'action des vagues génère une distribution de gouttes dont le diamètre varie entre 10 et 1200 μ m (Delvigne *et al.*, 1988).

Par ailleurs, cette technique lagrangienne permet également de paramétrer simplement l'évaporation des gouttes, et leur disparition par processus biochimiques dans la colonne d'eau. Pour cela on spécifie leur probabilité de disparaître par une simple loi de décroissance exponentielle (durée de demi-vie) (Dyke, 1995, Proctor, 1994).

Dans un premier temps, le déplacement horizontal est calculé à partir des courants simulés par le modèle. Ces courants prennent en effet compte des différents processus cités auparavant (marée, vent, pente de la surface libre à la côte).

$$Dx = \int_{t}^{t+\Delta t} u(x, y, z).dt \qquad \text{et } Dy = \int_{t}^{t+\Delta t} v(x, y, z).dt \qquad (1)$$

Dans cette approche lagrangienne, la diffusion turbulente (Proctor, 1994, Daniel, 1996, Spaulding, 1992) peut alors être modélisée par une technique de « marche aléatoire » en fonction du coefficient de diffusion turbulente. Le déplacement horizontal Dh et vertical Dv, pendant un pas de temps Δt est donné par :

$$Dh = R_1 \sqrt{6K_h \Delta t} \quad \text{dans la direction } \theta = 2\pi R_2, \qquad (2)$$

$$Dv = (2R_3 - 1)\sqrt{12K_z \Delta t} \tag{3}$$

Où K_h et K_z sont les coefficients de diffusion turbulente horizontale et verticale et $R_{1,2,3}$ des nombres aléatoires compris entre 0 et 1.

Les forces de flottabilité dépendent de la densité et de la taille des gouttes. La vitesse verticale dirigée vers la surface *w*, peut s'écrire :

C METEO

lfrem<u>er</u>

$$w = \frac{gd^2(1 - \rho_0 / \rho)}{18\nu} \quad \text{pour les petites gouttes } (d \le d_c)$$
(4)

$$w = \left[\frac{8}{3}gd(1 - \rho_0 / \rho)\right]^{1/2} \text{ pour les grosses gouttes } (d > d_c)$$
(5)

où d = le diamètre de la goutte, $\rho_0 =$ densité du pétrole, $\nu =$ viscosité cinématique de l'eau de mer, $\rho =$ densité de l'eau de mer, g = gravité terrestre.

Le diamètre critique d_c est donné par :

$$d_{c} = \frac{9.52\nu^{2/3}}{g^{2/3}(1 - \rho_{0}/\rho)} \quad (\text{Aravamudan et al., 1982})$$
(6)

Dans l'expression du déplacement vertical (éq. 3), on note que l'amplitude du mouvement dépend directement du coefficient de diffusion turbulente et par conséquent du gradient vertical des vitesses horizontales, générateur de la turbulence.

Le taux de pénétration des gouttes dans la colonne d'eau dépend du vent en surface et du cisaillement vertical des courants. Par temps agité, les particules dispersées sont plus nombreuses mais peuvent remonter en surface lors d'une accalmie. Lorsque ces gouttes, réapparaissent en surface, elles sont distancées par les gouttes en tête de nappe qui n'ont pas ou peu quitté la surface et ont été advectées par des courants plus forts.

La taille des gouttes affecte fortement la distribution des gouttes sur la verticale. Les gouttes sont en effet continuellement soumises d'une part, à la force de flottabilité dépendant directement de leur diamètre et de leur densité, d'autre part au mélange turbulent sur la verticale.

Les effets de la stratification peuvent se faire ressentir sur la chute des gouttes de pétrole en suspension, soit par l'expression du coefficient de diffusion turbulente K_z , soit simplement par le gradient de densité. Le coefficient de diffusion agit en effet sur la diffusion des gouttelettes par l'intermédiaire de l'éq.3, alors que la densité de l'eau de mer agit directement sur les forces de flottabilité (éq. 4,5). Plus la densité du pétrole est inférieure à celle de l'eau de mer, plus les gouttes remontent rapidement en surface.

3 MOTHY : Modèle Océanique de Transport d'HYdrocarbures

Le système MOTHY est constitué d'un modèle d'océan, qui a été développé pour représenter le mieux possible le courant de surface, et d'un modèle de nappe. Le modèle d'océan est constitué d'un modèle 2D couplé à un modèle 1D.

Le modèle 2D utilise un schéma numérique aux différences finies en trois pas explicites fractionnés pour résoudre les équations de Saint Venant. Il est forcé par le vent, la pression atmosphérique et la marée. Près des côtes, le calcul est fait sur une grille de maille 1' imbriquée dans une grille de maille 5' qui couvre le Golfe de Gascogne et la Manche.

lfrem<u>er</u>

10

Le modèle 1D calcule le profil de courant horizontal à partir d'un profil de viscosité turbulente, sous la contrainte de la tension du vent en surface, du frottement au fond et du courant moyen calculé par le modèle 2D.

La nappe d'hydrocarbure est considérée comme un ensemble de particules indépendantes qui dérivent en fonction du courant horizontal calculé précédemment. Le mouvement vertical est déterminé par la flottabilité et la diffusion turbulente. La flottabilité dépend de la taille et de la densité des particules.

Le système est opérationnel depuis 1994. Il peut être activé 24h/24 par un prévisionniste marine. Il est activé régulièrement sur des situations réelles très diverses (localisation géographique, situation météorologique, caractéristiques du polluant...). La plus importante intervention a été l'accident de l'Erika qui a donné lieu a environ 350 simulations (Daniel *et al.*, 2001).

Le statut opérationnel du modèle MOTHY impose de rechercher des performances optimales sur une large gamme de situations. En particulier, une calibration des paramétrisations physiques, réalisée *a posteriori* et visant à simuler au mieux la dérive des nappes de l'Erika, ne pourrait être intégrée dans le modèle opérationnel, le risque de dégradation pour d'autres conditions de simulation ne pouvant être écarté.

4 Le modèle hydrodynamique MARS 3D

Depuis environ 6 ans, IFREMER/DEL/AO développe un modèle hydrodynamique 3D de la façade atlantique (Lazure, Jégou, 1998). Ce modèle est destiné à représenter, de la manière la plus fidèle possible, le transport et le mélange des masses d'eau sur des échelles de temps variant de l'heure à la journée. Le modèle utilise un schéma numérique aux différences finies pour résoudre les équations primitives de la mécanique des fluides sous l'hypothèse hydrostatique.

Les équations sont résolues en employant la technique de séparation des modes de surface (externe) et interne (Blumberg et Mellor, 1987).

Le mode externe résout les équations du mouvement intégrées sur la verticale, qui reproduit les ondes de gravité. Le mode, dit interne, recueille les informations du mode externe (surface libre, courants intégrés) et résout alors les équations sur la verticale (structure tridimensionnelle des courants).

On utilise une méthode semi-implicite pour résoudre le mode externe, ceci permet de fournir la pente de la surface libre en entrée du mode interne qui fournit à son tour la valeur du frottement sur le fond et les termes non linéaires au mode externe.

Les conditions aux limites sont issues d'un modèle de plus grande emprise, qui reproduit la marée et la circulation. (*fig. 2a*).

La maille horizontale est de 5 km. Sur la verticale, on utilise un système de coordonnées σ définies par :

 $\sigma = \frac{z+h}{\eta+h} \quad \text{où } h \text{ représente la profondeur totale et } \eta \text{ l'élévation de la surface}$ (7)

ainsi $\sigma = 1$ en surface, et $\sigma = 0$ au fond.

La résolution verticale est de 10 niveaux avec un léger raffinement près de la surface libre. Le modèle couvre la zone comprise entre les latitudes 43.83° et 49° nord et les longitudes 0.5° et 7° ouest (cf. fig. 2a).

11

C METEO

lfre<u>mer</u>

Ce modèle a eu plusieurs applications en biologie (production primaire) et en halieutique (recrutement des larves d'anchois). Sa version bidimensionnelle a également été utilisée pour traiter le cas du chimiquier « Ievoli Sun » en 2000.

Les données météorologiques indispensables pour forcer le modèle ont été fournies par Météo France. Leur résolution spatiale est de 1/4° et l'intervalle entre chaque donnée est de 6 h. Ces données fournies au format GRIB sont interpolées linéairement sur la grille du modèle hydrodynamique.

La lecture et l'interpolation des composantes du vent se font directement dans le modèle. D'autres paramètres : nébulosité, température de l'air, humidité relative, sont également nécessaires au modèle pour calculer le bilan de chaleur à l'interface océanatmosphère. L'échelle de temps de la simulation du devenir du pétrole est assez courte pour négliger les échanges entre l'océan et l'atmosphère (et leur influence sur les courants).



Fig. 2a Couverture des modèles emboîtés

METEO



Fig. 2b) Situation hydrologique : Salinité du Golfe de Gascogne en décembre1999

5 Application au cas de l'Erika

5.1 Caractéristiques du pétrole

Le pétrole transporté par l'Erika appartenait au type II (fuel lourd). Sa densité initiale était de 1002 kg/m³ et sa viscosité de 20 000 cSt à 10°C ($1cSt = 10^{-6}m^2/s$ très visqueux). Les expériences réalisées en laboratoire par le Cedre ont montré que la viscosité du pétrole de l'Erika pouvait atteindre 350 000 cSt, dans le cas d'une émulsion à 50 % d'eau. Pour notre simulation, on ne simule pas l'évolution physico-chimique du pétrole et la viscosité n'est pas prise en compte.

Le pétrole bien que d'une densité voisine de l'eau de mer semble s'être déplacé essentiellement en surface, sous une fine pellicule d'eau (Source : Cedre). Enfin certains phénomènes de « resurfacing » ont pu également être observées par les équipes sur zone.

5.2 Adaptation de MARS3D

Le modèle MARS3D, comme la plupart des modèles hydrodynamiques appliqués au transport d'éléments généralement dissous, n'a pas été conçu pour traiter les éléments flottants peu miscibles dans l'eau de mer.

Dans le cadre de cette étude, nous avons essentiellement porté nos efforts sur la capacité du modèle à reproduire les courants tout près de la surface (< 1 m profondeur), pour simuler au mieux la dérive de la nappe, sans utiliser de wind factor. Dans le cas de l'Erika, on peut considérer que l'emploi d'un tel facteur n'est pas nécessaire au modèle pour évaluer la vitesse

lfremer

13

de la nappe en surface, du fait que les plaques de pétrole se déplacent sous une fine couche d'eau et qu'elles ne sont pas directement en contact avec le vent. Les modifications des paramètres physico-chimiques ne sont pas simulées mais des relevés sur zone peuvent servir à réajuster certains de ces paramètres dans le modèle de nappe (densité dans MOTHY).

Le premier mètre sous la surface de la mer est directement soumis à l'action du vent. On estime en effet que la vitesse en surface peut atteindre 2 % de la vitesse du vent en conditions de laboratoire (Wu et Tsanis, 1995). Plusieurs développements furent réalisés dans le modèle MARS3D pour obtenir le même ordre de vitesse.

La tension du vent en surface est définie par l'expression suivante :

$$\tau_{sx,sy} = \rho_a C_d |\vec{U}| U_{x,y} \quad \text{, où } U_{x,y} \text{ sont les composantes du vent } \vec{U} \text{ à 10m}$$

$$\rho_a \text{ est la densité de l'air, et } C_d \text{ le } \ll \text{drag coefficient } \gg$$
(8)

Ces trente dernières années, plusieurs études ont proposé différentes expressions du coefficient de frottement en surface. Dans cette étude, nous utilisons la formule proposée par Wu (1995) pour estimer ce coefficient. Cette formule est aussi utilisée dans le modèle MOTHY. On admet en effet que le coefficient de frottement dépend de l'intensité du vent et de la surface de la mer, et que la rugosité de la mer n'est pas modifiée par le pétrole (pas d'effet « mer d'huile »).

$$C_d = (0.8 + 0.065 |\vec{U}|) \times 10^{-3}$$
(9)

Les gradients verticaux de courants près de la surface sont très importants. La modification du calcul sur la verticale de ces courants nécessite une discrétisation et une formulation de la longueur de mélange adaptée plutôt que d'imposer un profil de viscosité turbulente.

Par ailleurs, une discrétisation verticale resserrée près de la surface permet de reproduire des vitesses en surface en accord avec les solutions analytiques pour un profil de viscosité imposée (Wu et Tsanis, 1995). La discrétisation sur la verticale dans le modèle MARS3D a été raffinée près de la surface où 5 niveaux sigmas supplémentaires sont rajoutés, entre 0.98 et 1, ce qui porte à 15 le nombre total de niveaux.

(/0.98/0.99/0.995/0.999/0.9995/0.9999/)



Fig. 3 : Cisaillement vertical des courants en fonction du nombre de niveaux

La vitesse calculée en surface pour 10 niveaux atteint à peine 0.8 m/s (soit 0.8 % de la vitesse du vent en surface), tandis que 12 niveaux permettent d'obtenir 1.5 % de la vitesse du vent. La vitesse maximale en surface est atteinte pour 15 niveaux et vaut 2.1 %. Un nombre de niveaux supérieur à 15 ne donne pas de valeurs plus fortes en surface.

La viscosité turbulente dépend directement du gradient de vitesses. Si le gradient est fort, la viscosité turbulente l'est aussi, et le terme de viscosité aura tendance à réduire les courants de surface à partir des équations du mouvement. La viscosité turbulente et les vitesses rétroagissent sans cesse au travers des équations hydrodynamiques et du calcul de la turbulence (Delhez,1993).

Pour traiter le cas de nappes de pétrole, on fait souvent l'hypothèse d'une viscosité turbulente nulle en surface, qui permet d'obtenir des vitesses fortes en surface. Plusieurs profils de viscosité turbulente ont été proposés :

D'après Bowden (1983), on peut considérer qu'à partir d'une certaine distance de la surface, le profil de viscosité turbulente décroît linéairement vers zéro en surface. Cette hypothèse sur la viscosité, permet d'obtenir des vitesses élevées en surface (Davies, 1995, Craig *et al*, 1992). L'hypothèse d'un profil de viscosité bilinéaire, comme dans le cas du modèle à deux couches de Poon and Madsen (1991), trilinéaire (Varlamov, 1999) ou parabolique (Wu and Tsanis, 1995) est souvent reprise pour simuler les courants de surface dus au vent.

Pour cette étude, la viscosité turbulente est calculée et plusieurs modèles de turbulence ont été testés avec des formules de longueur de mélange différentes.

La turbulence est calculée à partir de l'équation d'évolution de l'énergie cinétique turbulente de type k-l. L'énergie cinétique turbulente k est calculée à partir d'une équation de transport faisant intervenir le taux de dissipation d'énergie ε . Ce taux de dissipation est lui relié à la longueur de mélange par :

$$\varepsilon = \varepsilon_o \frac{k^{3/2}}{l}$$
 où ε_o est une constante, *k* l'énergie cinétique turbulente et (10)

l la longueur de mélange.

La longueur de mélange est ici donnée par une expression algébrique.

Parmi les différents paramétrages de la longueur de mélange testés, la formulation suivante (Robert et Ouellet, 1987, Lee et Kyung 1998) a été implémentée dans notre modèle de turbulence.

$$l = k.z.(1 - \sigma).\sigma$$
 où k est la constante de Von Karman , $k = 0.4$ (11)

Rem 1 : avec une telle expression de la longueur de mélange, la surface agit comme une « paroi » (l = 0 en surface), ce qui pour une nappe dérivant en surface est plausible.

Rem 2 : D'autre part, un modèle de turbulence sans équation d'évolution (faisant intervenir uniquement la longueur de mélange de Prandtl et le cisaillement des vitesses) donne

METEO

également de bons résultats pour une zone de courants de marée importants, comme c'est le cas dans le golfe de Gascogne.

Pour traiter le mélange des traceurs dans la colonne d'eau, on considère que la nouvelle discrétisation ne sert qu'au calcul des courants, et que la couche située entre $\sigma = 0.99$ et $\sigma = 1$. est totalement mélangée. Cette hypothèse nous rapproche de la version de base du modèle où le dernier niveau sigma valait 0.97.

Les résultats de ces modifications ont été validés par des simulations sur une année réelle ; on retrouve bien la situation hydrologique du Golfe (formation et détachement des panaches) pour différentes saisons (fig. 2b).

<u>Le modèle de nappe</u> :

La représentation des plaques de pétrole par un ensemble de particules est à ce jour la plus pratique et encore la plus fiable. Ce concept de suivi de particule « particle tracking » sera également utilisé dans le cadre de notre étude pour suivre l'étendue de la nappe. La diffusion turbulente est dans ce cas modélisée par un processus de marche aléatoire « random walk ». Plusieurs formulations de ce processus furent également testées avant d'opter pour une formulation définitive.

On sait que tout le pétrole ne se déplace pas uniquement sous forme de gouttes, en particulier en surface où il est très visqueux et n'est pas entièrement dispersé sous la surface par l'action des vagues. On considère dans le cas de boulettes ou de plaques que les trajectoires sont correctement simulées par les plus grosses des gouttes maintenues en surface sous l'effet des forces de flottabilité. Cette description lagrangienne du pétrole peut donc aussi bien représenter le comportement des gouttes dispersées sur la verticale que celui des boulettes et autres plaques en surface, pour une distribution de taille des gouttes adaptée.

Les expériences sur la dispersion du pétrole sur la verticale prévoient une distribution des gouttes s'étalant entre 10 et 1200 μ m (Delvigne et Sweeney, 1988) dont une majorité comprise entre 200 μ m et 700 μ m.

La formulation du random walk proposée par Visser (1997) a été implémentée dans l'algorithme de suivi de particules. Elle diffère sensiblement de la formulation classique (éq. 3).

Cette expression tient en effet compte des gradients du coefficient de diffusivité turbulente. Le déplacement vertical D_v au point de coordonnées z est donné par :

$$Dv = K_{z}'(z)\Delta t + R \left\{ 2r^{-1}K_{z} \left[z + \frac{1}{2}K_{z}'(z)\Delta t \right] \Delta t \right\}^{1/2}$$
(12)

où $K_z' = \partial K_z / \partial z$ représente le gradient de diffusivité turbulente.

La principale différence entre cette formulation et la précédente (éq. 3) est l'apparition du terme non aléatoire $K_z'(z)\delta t$, qui agit sous la forme d'un déplacement des régions de faible diffusivité vers les régions de forte diffusivité. De plus, le coefficient de diffusion du

lfremer

16

terme aléatoire n'est plus évalué à la position initiale z de la particule mais en $z+(1/2) K_z'(z)\Delta t$.

Ce terme non aléatoire contrebalance la tendance du modèle à collecter les particules dans les régions de faible diffusivité comme c'est le cas avec la première formulation.

La méthode de modélisation de la diffusion turbulente sur la verticale a peu d'effet sur la trajectoire de la nappe en surface. En effet, les plaques et boulettes (de pétrole ou d'émulsions pétrole-eau) restent en surface sous l'action des forces de flottabilité. Seules les gouttes dont le diamètre est supérieur à 700-800 μ m (300-400 μ m avec l'autre formulation). En résumé, par cette autre formulation, la diffusion à l'intérieur de la colonne d'eau est plus importante. La répartition par classes de diamètre est dans notre cas arbitraire (uniforme) et comprise entre les valeurs extrêmes classiques (10-1200 μ m).

5.3 Résultats des simulations

On dispose aujourd'hui de nombreuses informations sur les zones touchées, la quantité de pétrole échouée et ses caractéristiques (fig. 4). Ces informations sont très utiles pour valider les résultats du modèle même si de nombreuses incertitudes demeurent au sujet des fuites d'hydrocarbures durant les dernières heures précédant le naufrage, pendant et après la plongée vers le fond de la partie arrière du bateau contenant près de 15 000 tonnes de fuel.

Dans le cadre de la simulation, nous disposons de deux types de forçages météo : d'une part des prévisions météorologiques à 4 jours aux dates données (12/12, 21/12, 24/12), et d'autre part des données de vent réanalysées *a posteriori* du mois de décembre. Ces données proviennent du modèle ARPEGE de Météo France (données réanalysées). Le mode « prévision » désigne les simulations utilisant les données de prévisions des vents, contrairement au mode « analyse » qui fait appel aux données de vent réanalysées. Dans un premier temps, les simulations pour le mois de décembre en mode analysé ont permis de conforter les prédictions du modèle de dérive de surface à partir des observations (*fig. 4*). Ensuite, plusieurs simulations furent réalisées avec les mêmes conditions initiales (position et date) et dans les 2 différents modes, ceci afin de mettre en avant l'importance des forçages météo. Enfin, des simulations réalisées avec de nouvelles hypothèses sur la position et la date ont révélé l'importance des conditions initiales.

D METEO

Îfrem<u>er</u>



Fig. 4 Bilan des zones touchées

Les premières simulations ont été réalisées avec des gouttes de taille suffisante $(d>800 \ \mu m)$ pour que les forces de flottabilité les maintiennent constamment en surface. On peut ainsi confronter les prédictions du modèle aux observations réalisées à la surface de la mer pour une période allant jusqu'à 2 semaines (*Fig. 5, 6, 7*).

Pour un lâcher unique depuis la partie avant du navire, on observe que la nappe en surface fut advectée vers le sud, après quelques jours seulement, au lieu de se diriger plus directement vers l'île d'Yeu, comme le suggéraient les premières prévisions (fig. 1). Ce n'est qu'autour du 20 décembre que la nappe est remontée vers le nord, pour approcher Belle-Île dès le 24 décembre, puis les côtes de Loire Atlantique 2 jours plus tard. Les observations de la fig. 8 viennent confirmer ces résultats. Cependant, ces dates sont données à titre indicatif, puisque la date du rejet initial à pu varier en réalité de quelques heures. On rappelle également que ces 3 figures représentent la trajectoire de gouttes n'ayant à aucun moment quitté la surface, ce qui n'a pas toujours été le cas dans la réalité. La confrontation des résultats du modèle avec la trajectoire des nappes de pétrole est satisfaisante, et c'est donc la configuration du modèle décrite dans le § 3 qui a été retenue pour la suite des simulations.

C METEO

<u> Ifremer</u>



Les observations de la fig. 8 (partie droite) ont par la suite permis de réaliser une série de simulations à diverses échéances à partir des positions relevées de plusieurs nappes en mode prévision et en mode analysé.

19

Ifremer



Fig. 8 : *Bilan des observations aériennes (à droite : relevé des positions des nappes principales pour le mois de décembre, à gauche : détails des zones de pollution observées)*

Dans un premier temps, les simulations du 12/12, du 21/12 et du 24/12 sont réalisées dans les 2 modes (prévision et analyse). Pour les 2 premières simulations, l'emplacement du rejet initial est précisé par une croix (conformément aux indications de Météo France). Pour la simulation du 24/12, on définit un rectangle correspondant aux observations aériennes de nappes et de plaques (*fig. 8*). On ne trace que les trajectoires des particules concentrées dans les 5 premiers mètres près de la surface.

• Simulations du 12/12

Position initiale du rejet : (-4.42, 47.28) Date : 12/12 à 9h00 utc Fin de la simulation : 16/12 à 0h00 utc

Les premières comparaisons entre les 2 modes sont réalisées à partir des simulations du 12 décembre. La trajectoire de la dérive du pétrole est sensiblement différente d'un mode à

20

l'autre. En mode prévision, la nappe semble se diriger plus rapidement vers l'est, avant de prendre une direction sud-ouest, suite au renversement des vents (fig. 9). En mode analysé, on retrouve des trajectoires plus proches des observations (fig. 10). Après 4 jours de simulation, la nappe principale se situe plus au sud.



Simulations du 21/12

Position initiale : (-3.27, 46.41)Date : 21/12 à 8h00 utc Fin de la simulation : 25/12 à 0h00 utc

Ifremer



La comparaison des résultats pour le 25/12 montre en effet que les vents prévus étaient plus forts que les vents réanalysés (fig. 11 et 12). La direction prévue de la dérive n'est cependant pas très différente. Les menaces qui en ont découlé sur Noirmoutier sont justifiées, puisque les premières nappes de pétrole sont apparues dès le 26/12 (source : Cedre).

Simulations du 24/12

Position initiale : zone rectangulaire définie par les points : (-2.92, 46.98) et (-3.33, 47.17) (cette zone correspond à l'étendue des principales nappes observées le 24/12 (encadré)) Date : 24/12 à 9h00 utc Fin de la simulation : 26/12 à 0h00 et 12h00 utc

C METEO

Ifremer



En mode prévision, on constate que l'essentiel du pétrole en surface a tendance à s'échouer près des côtes du Croisic dès le 26/12, tandis qu'en mode analysé, une part importante du pétrole semble se diriger plus au sud vers Noirmoutier.

Ces simulations (mode analysé) paraissent relativement conformes aux observations sur le terrain ; des plaques de pétrole sont arrivées en nombre au sud de Belle Île, au Croisic, et dans la baie de Bourgneuf (fig. 4). Ces plaques se sont essentiellement déplacées en surface et en sub-surface et sont les premières à avoir atteint les côtes.

Pour la suite des simulations, on se placera en mode analysé afin de pouvoir comparer le plus efficacement possible les résultats du modèle avec les observations. Dans un premier

temps, nous avons réalisé de nouvelles simulations à partir de points (ou zones) de rejet, issus de la fig. 8.

Simulation du 23/12

Positions initiales : sommets d'un triangle délimitant une zone d'observations (*fig. 8*) Date : 23/12 à 12h00

Fin de la simulation : 26/12 à 12h00 et 27/12 à 12h00 utc



Dans le cas de cette simulation, les prédictions du modèle concernent plus particulièrement la baie de Bourgneuf et l'Île d'Yeu. Tandis qu'une partie des hydrocarbures s'échoue sur les côtes du Croisic dès le 26/12, le reste est advecté plus au sud le long de la côte, vers la baie et la presqu'île de Noirmoutier. Ces résultats semblent en accord avec la réalité.

On peut en pratique considérer que l'essentiel d'un hydrocarbure "lourd" se déplace en surface et subsurface, sous la forme de plaques ou de boulettes (émulsions). De nombreuses observations viennent le confirmer dans le cas de l'Erika. Cependant, on sait également qu'une partie du pétrole est dispersé sous forme de gouttes à l'intérieur de la colonne d'eau sous l'action des vagues. Ces gouttes peuvent alors atteindre des profondeurs d'immersion nettement plus importante, voire sédimenter et leur impact sur l'écosystème n'en est pas moins préoccupant, notamment sur les systèmes pélagiques et benthiques. La concentration de ces

Modélisation de dérive d'hydrocarbure : Application au cas de l'Erika

particules peut en effet influencer la teneur en HAP (Hydrocarbure Aromatique Polycyclique) dont on retrouve la trace dans les sédiments et coquillages sur des zones plus étendues, à la côte ou plus au large.

Simulation du 12/12

Position initiale : (-4.42, 47.28); partie avant Date: 12/12 à 9h00 utc Fin de simulation : 26/12 à 12h00 et 28/12 à 12h00 utc



Pour cette simulation de la répartition des particules dans la masse d'eau (fig. 19, 20), les trajectoires de toutes les particules dont le diamètre dépasse 200 µm sont représentées (traces grises). En dessous de ce diamètre, les particules s'éloignent peu du lieu du naufrage (courant résiduel de marée) et s'échouent rapidement sur le fond ou se dissolvent plus facilement. Cette étude ne donne aucune indication quantitative. La distribution est en effet uniforme (nombre constant par classe de diamètre) et n'est pas représentative statistiquement. On note que les particules en tête de nappe atteignent les côtes les premières (cf. premières simulations) et que les gouttes dispersées dans la colonne d'eau (en rouge sur la figure) se déplacent nettement moins rapidement. Les gouttes de taille intermédiaire se dirigent plutôt vers le sud de Noirmoutier (les points bleus correspondent aux positions des gouttes comprises dans les 5 premiers mètres en surface). La figure 4 indique en effet que les pollutions échouées plus au sud, sont constituées plutôt de petites boulettes.



Les résultats de la figure 21 illustrent parfaitement ce que l'on désigne par phénomène de « resurfacing ». En effet, alors que le pourcentage échoué au fond augmente très peu au cours du temps (en vert), les pourcentages en surface (i.e < 1 m) et dans la colonne d'eau varient de manière inverse. On peut remarquer également que le fuel échoué à la côte se déplaçait en surface (baisse moyenne de la quantité en surface, vers le 24/12, date des premiers arrivages sur Belle Île ; courbe noire et rouge). Lorsque le fuel s'approche des côtes, celui-ci se dépose plus facilement sur le fond, en raison des faibles profondeurs (légère augmentation de la proportion sur le fond vers le 24/12). Ceci peut sans doute expliquer parfois la présence d'hydrocarbure, échoué sur le fond à quelques miles des côtes, notamment comme cela a été rapporté par des plongeurs de Belle-Île.

Les premiers échouages sur les côtes du sud Finistère laissent à penser que le pétrole de l'Erika ait pu commencer à fuir dès la nuit du 11 au 12 décembre, et plus probablement encore après le naufrage de la partie arrière. En effet, on estime à 8000 tonnes la quantité échappée depuis la partie arrière (source : Cedre). Les premières nappes de pétrole arrivées sur les côtes du Finistère et du Morbihan pourraient en fait provenir de l'épave de la partie arrière du navire. En effet, si l'on réalise a posteriori la simulation d'un rejet de pétrole depuis le fond quelques jours après la catastrophe, on constate que celui-ci arrive près des côtes dès le 24/12 (fig. 23). Le pétrole remontant depuis le fond réapparaît en surface au moment où les vents s'orientent vers le nord (23/12). Bien que les quantités échouées soient moins importantes que sur Belle-Île ou sur les côtes vendéennes, on a bien observé des traces d'hydrocarbures aux Glénans, ou encore sur l'île de Groix. Une autre simulation (avec les mêmes paramètres) débutant le 16/12 prévoit clairement un échouage sur Groix et la presqu'île de Quiberon (fig. 22).

Ce qui s'est passé en réalité doit certainement se situer entre ces 2 hypothèses extrêmes ; il y a bien eu une fuite depuis le fond, étalée sur plusieurs jours après le naufrage, ce qui explique que ces nappes aient échappé aux opérations de surveillance, et soient arrivées « par surprise » plus à l'ouest de Belle-Île autour du 24 décembre.

C METEO

<u> Îfremer</u>



5.4 Comparaison avec MOTHY

Les simulations réalisées avec le modèle MARS3D sont ensuite comparées aux prévisions du modèle MOTHY. Les conditions de simulation (position, date, densité du pétrole) sont identiques. Malgré les différences concernant le traitement de la diffusion verticale (et de la taille des gouttes représentées), les prévisions de dérive en surface présentent de fortes similitudes.

Simulation du 12/12

Des simulations MOTHY ont cependant été réalisées en cherchant à s'approcher des choix retenus pour MARS3D (*cf.* 5.2). La comparaison reste indicative mais permet de vérifier la cohérence entre les deux modèles. Les résultats de la simulation avec un rejet unique au moment du naufrage et un forçage atmosphérique ré-analysé sont présentés figure 24 pour le 24 décembre à 12h00 utc, soit après plus de 12 jours de dérive. L'étalement horizontal est légèrement plus important avec MOTHY et la tête des nappes est en avance de 5 à 10 nq par rapport à MARS3D. La cohérence entre les deux simulations reste cependant satisfaisante.

C METEO



Fig. 24 : Simulations en mode analysé de la dérive des gouttes en surface. Les vents utilisés en forçage par le modèle de nappe sont des vents réanalysés.

Rejet initial :

- Date : 12/12 à 9h00 utc
- Position : (-4.42, 47.28) (partie avant)
- Fin des simulations : 24/12 12 :00 :00 utc

Simulation du 21/12

La figure 25 compare les simulations MOTHY et MARS3D à partir d'une position initiale observée le 21/12 à 18h00 utc en mode prévision (c'est à dire avec des vents prévus) et une simulations MARS3D en mode analyse (avec des vents analysés).

MOTHY est utilisé dans sa version opérationnelle, en particulier avec une distribution de taille de gouttes différente de celle de MARS3D. Seule la position des gouttes en tête de nappe (les plus rapides) est comparable entre les simulations.

La comparaison des deux simulations MARS3D, montre que les vents prévus étaient plus forts que les vents analysés. La dérive MOTHY, pourtant réalisée avec les mêmes vents prévus semble plus proche de la simulation MARS3D analysée. La différence de taille de gouttes vient en effet compenser la surestimation du vent prévu. Les plus grosses gouttes de MOTHY (500 microns) subissent un « brassage » sur la verticale qui ralentit leur dérive

<u>lfremer</u>

horizontale. Cet effet est beaucoup moins marqué dans MARS3D (gouttes entre 700 et 1200 microns).



Fig. 25 : Simulations MOTHY (gauche) et MARS 3D (centre) en mode prévision et simulation MARS3D en mode analyse (droite)

Rejet initial :

- Date : 21/12 à 8h00 utc
- Position : (-3.27, 46.41)
- Fin de la simulation : 25/12 à 0h00 utc

5.5 Discussion - Orientations futures

Cette série de simulations MARS3D a confirmé 2 points. Le premier est que, pour une zone où les courants de marée sont relativement faibles (< 0,5 m/sec ici), les effets du vent sont prédominants. La qualité des prévisions de dérive d'hydrocarbures dépend en premier lieu de la fiabilité des prévisions météorologiques. D'autre part, le modèle hydrodynamique tridimensionnel à notre disposition, moyennant quelques développements, est désormais capable de simuler correctement la dérive du pétrole comme celui de l'Erika.

De plus les différences de comportement sur la verticale peuvent également être pris en compte. Cela peut par exemple être très utile lorsque l'on veut simuler une fuite depuis le fond. Cela peut s'avérer également très intéressant dans le cas d'une stratification verticale forte. En présence de panaches d'eau douce (fleuves, glaces) par exemple, la densité des eaux superficielles est inférieure à celle du pétrole et l'on peut s'attendre à ce que celui-ci se déplace à l'interface entre les masses d'eau. Un cas de ce genre s'est rencontré en août 1977

<u> Ifremer</u>

29

dans la baie de Melville, au Groenland, une zone de fonte importante d'icebergs (Source : Le Cedre). La stratification thermique (situation estivale) a pour conséquence de réduire le mélange entre les 2 couches, et donc la diffusion des gouttes sur la verticale.

Le recours à une composante supplémentaire calculée uniquement à partir de la vitesse du vent (« wind factor ») ne fut pas nécessaire dans ce cas, compte tenu des diverses modifications apportées au code (raffinement des niveaux sur la verticale près de la surface, nouvelle formulation de la longueur de mélange). Cependant, son utilisation pourrait être nécessaire dans d'autres conditions (émulsions en surface type « mousse au chocolat ») dans lesquelles le pétrole se déplacerait plus vite que les courants, ou dans le cas de containers à la dérive.

Le module développé ne prend actuellement pas en compte les différents processus intervenant dans les premières heures (étalement, évaporation) et au cours de sa dérive (émulsion, sédimentation) permettant d'estimer la quantité du produit au cours du temps. Cependant, on considère que ces phénomènes ne modifient pas significativement les trajectoires des nappes, que le pétrole se trouve principalement sous forme de plaques, galettes ou boulettes se déplaçant en surface (0-1 m) et qu'un modèle lagrangien suffit à décrire la dérive visible d'hydrocarbures. Les conditions de mer très forte ont mis le pétrole sous forme d'émulsions très visqueuses, difficiles à fractionner et à disperser sur la verticale. C'est aussi d'ailleurs ce qui a empêché toutE tentative de dispersion chimique ou de pompage.

Le traitement de la diffusion turbulente des particules sur la verticale selon la méthode proposée par Visser (1997) est adapté au cas d'un profil de coefficient de diffusion turbulente non constant sur la verticale $((\partial K_z/\partial z) \neq 0)$. Le principal effet de cette méthode est d'entraîner dans la colonne d'eau des gouttes de taille plus importante que dans MOTHY. Cependant, la distribution de taille des gouttes adoptée provient d'expériences en laboratoire, pas forcément transposable au cas réel. En pratique, seulement une partie du pétrole est dispersé sous la nappe et les plus grosses gouttes continuent de simuler la dérive en surface, la difficulté étant de quantifier la fraction mise en suspension. Ce type de description conviendrait également à des nuisances de type biologique.La confrontation des simulations réalisées avec le modèle MARS dans le cadre du présent travail et des prévisions réalisées avec MOTHY en décembre 1999 montre une très bonne cohérence. Il s'agit là d'une forme de validation des prévisions réalisées en temps réel (et en situation de crise !) avec MOTHY, dans la mesure où le modèle MARS3D est représentatif de l'état de l'art scientifique en 2001. Un autre enseignement de la comparaison avec un modèle tri-dimensionnel est la confirmation de l'impact de la taille des gouttes considérées sur le brassage vertical avec des conséquences sur la vitesse de dérive en surface

6 Conclusion, perspectives opérationnelles

Malgré les incertitudes qui entourent les conditions initiales de la catastrophe, les simulations réalisées à l'aide du modèle 3D de l'Ifremer sont pour la plupart conformes à la réalité. A partir d'un formalisme relativement simple (représentation par particules), ce modèle décrit désormais la dérive d'hydrocarbures en mer de manière satisfaisante. Sa capacité à reproduire la structure tridimensionnelle du courant fut peu mise à contribution dans ce cas, car le fuel lourd de l'Erika s'est peu fragmenté malgré les conditions de tempête, et a peu plongé. On voit cependant néanmoins, à travers les derniers exemples (Fig. 19,20), de nettes différences entre la trajectoire du pétrole en surface et celle des gouttes en

lfremer

30

suspension dans la masse d'eau. Une perspective naturelle serait donc de réaliser le même type d'étude en choisissant des zones et des situations plus favorables à la mise en évidence de l'apport d'un modèle tridimensionnel. On peut par exemple envisager une étude comparée de MARS3D et du modèle opérationnel MOTHY dans la zone d'action du courant liguroprovençal en Méditerranée.

Un des intérêts de ce travail est d'offrir une validation des résultats du modèle MARS grâce à de nouvelles méthodes qui permettront en outre d'étendre le champ d'application au domaine de la biologie, comme par exemple le suivi des algues flottantes.

Enfin, ce travail apporte également des éléments quant à une utilisation éventuelle d'un modèle PE tridimensionnel pour succéder à MOTHY : sur le cas de l'Erika, le modèle MARS 3D contraint par les forçages météo opérationnels utilisés pour MOTHY simule des trajectoires de dérive comparables à celles de l'outil opérationnel actuel. Cette conclusion demande à être étendue à d'autres zones géographiques et à d'autres situations météorologiques, mais elle constitue un premier pas encourageant.

Dans cette marche vers une utilisation opérationnelle, l'étape suivante pourra être de mener une comparaison systématique « sur la durée » des deux modèles, par exemple en réalisant une simulation MARS3D pour chaque lancement opérationnel de MOTHY.

7 Bibliographie

- Al Rabeh, A., Lardner, R., Gunay, N., Khan, R., Hossain, M., Reynolds, R. M. & Lehr, W. J., 1993: On Mathematical and Empirical Models for Surface Oil Spill Transport in the Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 27, pp 71-77.
- Aravadam K., Raj P., Ostlund J., Newman E., Tucker W., 1982 : Break up of oil on rough sea-simplified models and step-by-step calculations. United Coastguard Report CG-D-29-29, U.S. Departement of Transportation, pp 200.
- Blumberg, A. F., Mellor, G. L., 1987 : A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. *Coastaland EstuarineSciences* 4.
- Bowden, K.F., 1983 : Physical Oceanography of Coastal Waters. Ellis Hordwood series in Marine Science.
- Craig, P. D., Hunter, J. R., Johnston, B. L., 1992: The implications of linearly varying eddy viscosity for wind-driven current profiles. *Cont. Shelf Research*, vol.13, No.1, pp 1-24.
- Daniel, P. 1996 : Operational forecasting of oil spill drift at Meteo-France. *Spill & Science Technology Bulletin.* Vol. 3, pp 53-64.
- Daniel P., P. Josse, P. Dandin, V. Gouriou, M. Marchand, C. Tiercelin, 2001 : Forecasting the Erika oil spills, *Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Washington, D.C*, pp 649-655.
- Davies, A. M., Kwong, S. C. M., Flather, R. A.,1998: A three-dimensional model of winddriven circulation on the shelf: application to the storm of January 1993. *Cont. Shelf Research*, vol. 18, pp 289-340.

Îfrem<u>er</u>

- Davies, M. A. & Xing, J., 1996: The Influence of Mixing Length Formulation and Stratification upon Tidal Currents in Shallow Seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, No. 42, pp 417-456.
- Davies, A. M., Kwong, S. C. M. & Flather, R. A., 2000: On determining the role of wind wave turbulence and grid resolution upon computed storm driven currents. *Cont. Shelf Research*, vol. 20, pp 1825-1888.
- Delhez, E.J., Martin, G. P., 1993 : 3D turbulence field on the North-Western European Continental Shelf, *Tellus 46A (1994), pp 98-112.*
- Delvigne, G. A. L., 1988: Droplet Size Distribution of Naturally Dispersed Oil, *Fate and Effects of Oil in Marine Ecosystems*.
- Delvigne, G.A.L., Sweeney, C.E., 1988 : Natural dispersion of oil. *Oil and Chemical Pollution* vol.4, pp281-310
- Dyke, P. P. G. 1999 : Coastal and Shelf Sea Modelling. Topics in Environmental Fluid Mechanics. Kluwer Academic Publishers.
- Elliot, A. J., Hurford, N., Penn, C. J., 1986: Shear Diffusion and the Spreading of Oil Slicks. *Marine Pollution Bulletin*.Vol 17, No.7, pp 308-313.
- Elliot, A.J., 1991 : Eurospill; Oceanic processes and NW European shelf databases . Marine Pollution Bulletin. Vol.22, pp 548-553.
- Fay, J.A., 1969 : The spread of oil on a water surface. *Oil on the sea*, D.Hoult (Ed.). Plenum Press.
- Fay, J.A., 1971 : Physical processes in the spread of oil on a water surface. Proc. Prevention and Control of Oil Spills, 15-17 June. American Petroleum Institute, Washington, DC, pp 463-467.
- Fingas, M., 1995: Water-in-Oil Emulsion Formation: A review of Physics and Mathematical Modelling. *Spill Science & Technology Bulletin*, vol 2, No.1, pp 55-59
- Garcia-Martinez, R. & Flores-Tovar, H., 1999: Computer Modeling of Oil Spill Trajectories With a High Accuracy Method. *Spill Science & Technology Bulletin*, vol.5, No 5/6, pp 323-330.
- Hoult, D.P., 1972 : Oil spreading on the sea. Annu. Rev. of Fluid Mech., pp 341-367.
- Jenkins, A. D., 1986: Wind and Wave Induced Currents in a Rotating Sea with Depth-varying Eddy Viscosity. J. Phys. Oceanogr. 17, 938-951
- Korotenko, K. A., Mamedov, R. M. & Mooers, C. N. K., 2000: Prediction of the Dispersal of Oil Transport in the Caspian Sea Resulting from a Continuous Release. *Spill Science & Technology Bulletin*, vol. 6,No. 5/6, pp 323-339.
- Lazure, P., Jegou, A. M., 1998 : 3D moelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay Bay continental shelf. *Oceanologica Acta*, vol. 21, No. 2.
- Lehr, W. J., Fraga, R. J., Belen, M. S., Cekirge, H. M. 1984: A New Technique ti Estimate Initial Spill Size Using a Modified Fay-type Spreading Formula. *Marine Pollution Bulletin*. Vol 15, No.9, pp 326-329.
- Lee, J. C. & Kyung, T. J., 1999: Application of eddy viscosity closure models for the M₂ tide and tidal currents in the Yellow Sea and the East China Sea. *Cont. Shelf Research*, vol 19, pp 445-475.
- Leibovich, S., 1997: Surface and near-surface motion of oil in the sea. Final Report to US Minerals Management Service, Contract No. 14-35-0001-30612, Part I, 136 pp, Part II, 24 pp.
- Li, M. & Garret, C., 1998: The Relation Between Oil Droplet Size and Upper Ocean Turbulence. *Marine Pollution Bulletin*,vol. 36, No. 12, pp 961-970.
- Lonin, S. A., 1999: Lagrangian Model for Oil Spill Diffusion at Sea. Spill Science & Technology Bulletin, vol.5, No 5/6, pp 331-336.

- Mackay, D., Paterson, S., Trudel, K., 1980: A mathematical model of oil spill behaviour. *Environment Canada Report* EE-7.
- Melsom, A. 1996 : Effects of wave breaking on the surface drift. J. of Geophysical Research., vol.101, No.C5, pp 12,071-12,078.
- Nakata, K., Sugioka, S., Hosaka, T., 1997: Hincast of a Japan Sea Oil Spill. Spill Science & *Technology Bulletin*, vol.4, No.4, pp 219-229
- Luyten, P. J., Delersnijder, E., Ozer, J.& Ruddick, K. G., 1996: Presentation of a family of turbulence closure models for stratified shallow water flows and preliminary application to the Rhine outflow region. *Cont. Shelf Research*, vol. 16, No. 1, pp 101-130
- Poon, Y. & Madsen, O. S., 1991: A Two Layer Wind-Driven Coastal Circulation Model. J. of Geophysical Research, vol 96, No.C2, pp 2535-2548.
- Proctor, R., Flather, R.A, Elliot, A.J. 1994: Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf application to the Gulf oil spill. *Cont. Shelf Research*. Vol. 14, pp 531-545
- Reed, M., Oisten, J., Brandvik, P. J., Daling, P., Lewis, A., Fiocco, Mackay, D. & Prentik, R., 1999: Oil Spill Modelling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art.*Spill Science & Technology Bulletin*, vol 5, No.1, pp 3-16.
- Robert, J. L. & Ouellet, Y. 1987 : A three-dimensional models of marine and estuarine dynamics, J. C. Nihoul & B. M. Jamart, editors, *Elsevier Oceanography Series*, Amsterdam, pp. 359-372.
- Spaulding, M. L., Howlett, E., Anderson, E. & Jayko, K., 1992: OILMAP : A Global Approach to Spill Modelling. *Proc. of the fifteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar*.
- Stiver, W., Mackay, D., 1984 : Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 18, 834-840.
- Varlamov, S. M., Yoon, J. H., Nagaishi, H. & Abe, J. 1999 : Japan Sea oil spill analysis and quick response system with adaptation of shallow water ocean circulation model. *Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University*, 2000, No.118, pp 9-22
- Visser, A. W., 1997: Using random walk models to simulate the vertical distribution of particules in a turbulent water column. *Marine Ecology Progress*, vol. 158, pp 275-281.
- Wu, J. & Tsanis, I., 1995: A vertical/horizontal integration wind-induced circulation model (VHI3D): A method for including surface and bottom logarithmic profiles. *Advances in Water Resources*, vol. 18, No. 2, pp 77-87.
- Wu, J.& Tsanis, K., 1995: Numerical Study of Wind-Induced Water Currents. J. of Hydraulic Engineering. May 1995, pp 388-395.