

## MODÉLISATION DE LA DÉRIVE DES NAPPES D'HYDROCARBURES EN MER

**Pierre Daniel**

*Météo-France*

*Service central d'exploitation de la météorologie*

*42, avenue Gaspard-Coriolis*

*31057 Toulouse Cedex*

### RÉSUMÉ

En cas de pollution marine par des hydrocarbures, Météo-France fournit une assistance aux autorités chargées de la lutte en mer. Son action s'exerce au niveau national dans le cadre du plan Polmar-mer, ainsi qu'au niveau international dans le cadre du Système d'intervention d'urgence en cas de pollution de la mer (SIUPM) de l'Organisation météorologique mondiale. C'est pour mieux répondre à ces engagements qu'un modèle simulant l'évolution des nappes d'hydrocarbures en mer a été développé.

La dérive de la nappe est simulée par un modèle d'océan forcé par les champs de vent issus du modèle atmosphérique du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme. La marée est prise en compte en Manche et dans le golfe de Gascogne. L'étalement de la nappe est modélisé sous la forme d'une dispersion des particules par le cisaillement de courant près de la surface et par les processus de flottabilité et de diffusion turbulente.

Ce modèle a été validé sur plusieurs cas bien documentés : *Torrey Canyon* (1967), *Amoco Cadiz* (1978), *Tanio* (1980), guerre du Golfe (1991), *Aegean Sea* (1992). Il est opérationnel depuis février 1994 et peut être activé à la demande sur n'importe quelle région du globe. Il a été utilisé opérationnellement, avec succès, lors d'un accident au large du Portugal en décembre 1994 ainsi que lors de l'accident du *Sea Empress* au pays de Galles en février 1996.

De nouveaux développements et des exercices sont menés conjointement avec le Cedre (Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux).

### ABSTRACT Modelling the spread of oil pollution in the sea

Météo-France has national and international responsibilities to agencies fighting marine oil pollution; the Préfet Maritime may ask for help if oil threatens the French coast. Météo-France is also in the Marine Pollution Emergency Response Support System (MPERSS) of the World Meteorological Organisation (WMO). Because of these commitments, Météo-France has developed an oil spill response model designed to simulate the transport of oil in three dimensions.

The model ocean is forced by the wind and sea-level pressure forecasts from the European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF). Tidal forcing is included in the English Channel and the Bay of Biscay; the oil is dispersed by current shear, vertical movements and turbulent diffusion.

This system is applicable anywhere in the world (with a coarser resolution far from the French coastline) and has been operational since February 1994. It was validated on a few well serious incidents and it was tested twice in real-time.

New developments, exercises and training are conducted jointly with the collaboration of CEDRE (Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux).

La surveillance de l'océan superficiel et la prévision de ses évolutions font partie des missions d'État de Météo-France. Ainsi, en cas de pollution marine par hydrocarbures, Météo-France intervient en élaborant des bulletins particuliers destinés aux services

responsables de la lutte en mer. Son action peut se faire au niveau national dans le cadre du plan Polmar-mer pour la protection des côtes de métropole et d'outre-mer et, au niveau international, dans le cadre du Système d'intervention d'urgence en cas de pollution de la mer (SIUPM) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

Le SIUPM est un système mis en place depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1994 par l'OMM pour fournir une assistance météorologique aux opérations d'urgence en haute mer en cas de pollution. Les océans et les mers sont divisés en zones de responsabilité. Sur chacune de ces zones, l'assistance météorologique est coordonnée par un service météorologique national. Météo-France a accepté d'être coordonnateur météorologique de la zone II et de jouer le rôle de service d'appui aux coordonnateurs météorologiques des zones I, III et VII B (figure 1). L'assistance aux opérations d'urgence peut inclure une grande variété d'éléments : prévisions météorologiques pour la zone concernée ; observation, analyse et prévision de paramètres météorologiques et océanographiques nécessaires pour faire fonctionner des modèles de dérive de nappe ; exploitation de ces modèles de dérive de nappe ; accès aux moyens de télécommunications nationaux et internationaux.

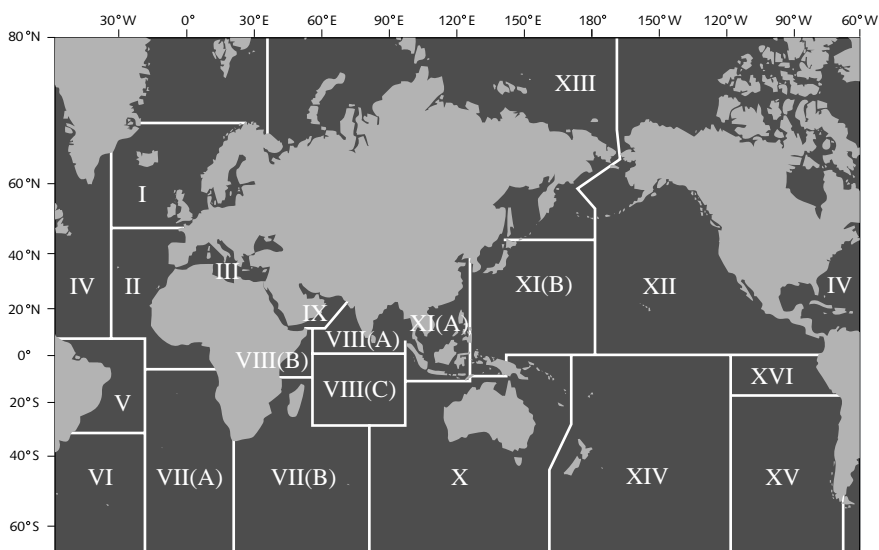


Figure 1 - Zones de responsabilité du Service d'intervention d'urgence en cas de pollution de la mer (SIUPM).

Le Cedre et Météo-France ont engagé une coopération technique, formalisée par une convention-cadre signée le 30 juin 1996. Créé en 1978 dans le cadre des mesures prises pour améliorer la préparation de la lutte contre les pollutions accidentelles des eaux et pour renforcer le dispositif national d'intervention, le Cedre, association régie par la loi de 1901, est placé sous la tutelle du ministère de l'Environnement. Sa principale mission est de conseiller et d'assister en matière technique les autorités chargées de lutter contre les pollutions accidentelles des eaux, notamment dans le cadre du plan Polmar-mer.



Lutte à terre contre la pollution. Ramassage manuel après l'accident de l'*Aragon* en décembre 1989. Ce pétrolier espagnol a été endommagé à la suite d'une tempête au large de l'archipel de Madère. La photo a été prise sur l'île de Porto Santo où le pétrole émulsionné s'est échoué après un long séjour en mer. (photo Cedre LK)

C'est pour mieux répondre à ces engagements qu'un modèle simulant l'évolution des nappes d'hydrocarbures en mer a été développé au sein de la subdivision Prévision marine du Service central d'exploitation de la météorologie [SCEM] de Météo-France. Mais le travail de Météo-France sur ce sujet ne date pas d'aujourd'hui. Il a démarré au début des années soixante-dix, à la suite de l'accident du *Torrey Canyon*. Ainsi, dès 1972, Météo-France a participé à la campagne Pollumer avec le Cnexo et l'Institut français du pétrole [IFP] (Gérard, 1972). À partir de 1975, Météo-France a participé à un projet de surveillance de la pollution marine due au pétrole, patronné par l'OMM et la Commission océanographique intergouvernementale [COI], dans le cadre du Système mondial intégré de stations océaniques [Smiso] (Gérard, 1977, 1979). Enfin, un outil simple mais robuste a été développé. Celui-ci permettait de faire des prévisions de déplacement de nappe en fonction des prévisions de vent (Gérard, 1974). Cet outil a été utilisé avec succès lors de l'accident du *Tanio* en 1980. Durant les années quatre-vingt, le travail sur ce sujet est resté en sommeil. Il est vrai qu'aucun accident majeur n'a touché les côtes françaises durant cette période. Le travail a été repris au début des années quatre-vingt-dix à l'initiative de J. Poitevin, responsable de la subdivision Prévision marine du SCEM. Les moyens de calcul avaient évolué et une utilisation opérationnelle de modèles d'océan était devenue possible. Le modèle actuel est devenu opérationnel en février 1994 et a permis à Météo-France d'intégrer le SIUPM.

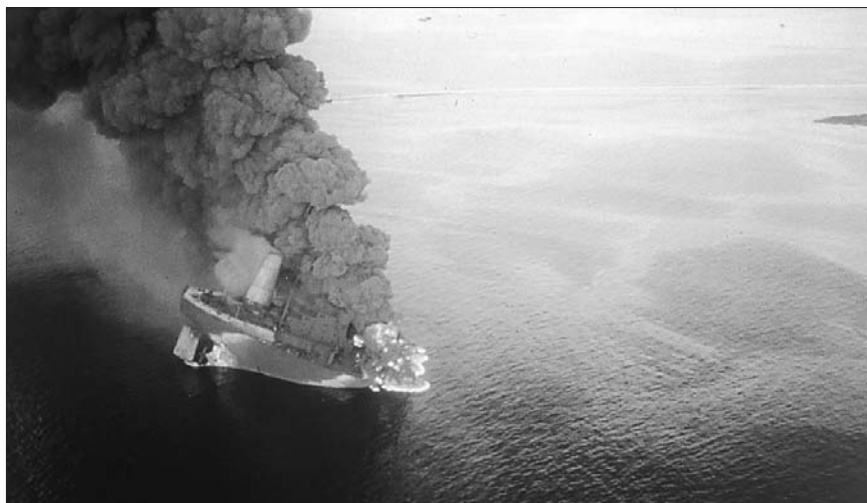
## LA POLLUTION MARINE PAR HYDROCARBURES

La pollution des mers par les hydrocarbures est difficile à estimer. Une évaluation récente, portant sur la période 1979-1989, fait état de 2 400 000 tonnes par an. 60 % de cette pollution proviennent de rejets terrestres aboutissant en mer et 17 % sont dus au transport maritime (déballastage et accidents), dont 8 % aux accidents de pétroliers. Les autres sources de pollution sont les fuites naturelles, les retombées atmosphériques et les activités offshore. Selon des données fournies par l'Organisation maritime internationale, la pollution liée aux accidents de pétroliers aurait été divisée par quatre en dix ans. Le déballastage illicite a été évalué à partir de données fournies par le Service aéronaval des douanes. On estime que le nombre total de nappes, pour les eaux territoriales métropolitaines, varie entre 120 et 130 par an. Le tableau ci-dessous indique les principales pollutions marines par hydrocarbures ayant eu lieu dans le monde depuis 1967.

Accident	Date	Lieu	Quantité de pétrole déversé (en tonnes)	Rang
Sea Island (8 sources : terminaux et pétroliers)	26 janvier 1991	Golfe Persique	800 000	1
Ciudad del Carmen (puits Ixtoc 1)	3 juin 1979	Golfe du Mexique	475 000	2
Nowruz Field (puits de la plate-forme n° 3)	4 février 1983	Golfe Persique	280 000	3
Atlantic Express (pétrolier)	19 juillet 1979	Au large de Tobago	276 000	4
Castillo de Bellver (pétrolier)	6 août 1983	Au large de l'Afrique du Sud	252 000	5
Amoco Cadiz (pétrolier)	16 mars 1978	Portsall, Manche	228 000	6
Odyssey (pétrolier)	10 novembre 1988	Au large de Terre Neuve	143 000	7
Haven (pétrolier)	11 avril 1991	Golfe de Gênes	133 000	8
Torrey Canyon (pétrolier)	18 mars 1967	Îles Scilly, Manche et proche Atlantique	121 000	9
Braer (pétrolier)	5 janvier 1993	Îles Shetland	84 500	18
Sea Empress (pétrolier)	15 février 1996	Milford Haven, Pays de Galles	72 360	20
Aegean Sea (pétrolier)	3 décembre 1992	La Corogne, Espagne	66 800	21
Exxon Valdez (pétrolier)	24 mars 1989	Prince William Sound, Alaska	38 500	47

Tableau 1 - Quelques pollutions marines majeures depuis 1967.  
(Sources : Cedre et Osir)





Le pétrolier chypriote *Haven* en feu. L'incendie a duré soixante-dix heures (avril 1991). La pollution a touché la Riviera italienne et la Côte d'Azur française. (Photo Cedre LK)

## LE COMPORTEMENT DES HYDROCARBURES DANS LE MILIEU MARIN

Lorsque des hydrocarbures sont déversés en mer, ils subissent un grand nombre de processus de transformation : dérive et étalement, évaporation, dissolution, dispersion, émulsification, photo-oxydation, biodégradation, sédimentation, coulage, échouage, interaction avec la glace de mer. La composition du pétrole et les caractéristiques environnementales influent grandement sur ces processus. Un type particulier de pétrole est toujours constitué d'un grand nombre de composants aux comportements différents. Certains processus peuvent être assez bien décrits (dérive, étalement), alors que d'autres sont très mal connus. Les échelles de temps s'étendent de quelques heures (dérive, étalement, évaporation) à quelques années (biodégradation).



Nappe de pétrole vue par le satellite *ERS 1*. Image du SAR d'*ERS 1* reçue le 13 décembre 1992 et couvrant 95 km x 95 km sur la côte espagnole, près de La Corogne. La zone sombre sur la partie ouest du littoral correspond à la marée noire provenant du naufrage du pétrolier *Aegean Sea* (3 décembre 1992). Les liquides huileux ayant pour effet de lisser la surface de la mer, la présence d'une nappe de pétrole se traduit par une diminution du signal rétrodiffusé. (© ESA)

La **dérive** de la nappe se fait essentiellement par le courant de surface. En effet, on constate que 60 à 65 % de la nappe restent en surface. Ce courant de surface est pour une grande part généré par le vent, mais, dans les régions de fortes marées, les courants de marée peuvent dominer.

L'**étalement** est un processus important, non seulement pour pouvoir prévoir l'étendue de la pollution, mais aussi parce qu'il conditionne les autres processus de transformation de la nappe. En particulier, l'étalement accroît les transferts de masse par évaporation et dissolution.

L'**évaporation** est le processus de transformation le plus important en termes de transfert de masse lors des deux premiers jours d'évolution d'une nappe. Elle peut réduire le volume de la nappe jusqu'à 60 % pour un hydrocarbure léger, ce qui est en général le cas des hydrocarbures en provenance du golfe Persique. Ce sont les composants les plus légers, en général les plus toxiques, qui s'évaporent en premier. L'évaporation est influencée par la nature du pétrole (densité, viscosité), les températures de l'air et de la mer, la vitesse du vent, le rayonnement solaire, l'étendue et l'épaisseur de la nappe. La **dissolution** peut avoir des conséquences biologiques importantes, mais elle ne concerne qu'une faible partie de la nappe. La **dispersion** est provoquée par le déferlement des vagues qui fractionne la

nappe en gouttelettes de tailles différentes. Ces gouttelettes sont ensuite soumises à des mouvements verticaux liés à leur flottabilité. Ce phénomène favorise la dégradation du pétrole dans la masse d'eau. L'**émulsification** est un processus qui conduit à la formation d'une émulsion d'eau et de pétrole. La nappe prend alors l'aspect d'une mousse de couleur brune ou rouge-orangé et son volume s'accroît. La formation d'émulsions diminue l'évaporation et rend aussi plus difficiles les



opérations de nettoyage. La **photo-oxydation** est un processus d'oxydation de la nappe sous l'effet des radiations solaires ultraviolettes. Il conduit à la génération de composés solubles dans l'eau. Ce processus, négligeable les premiers jours, prend de l'importance au bout d'une semaine. La **biodégradation** est due à la présence de micro-organismes dans l'eau. Elle peut se dérouler sur des échelles de temps de plusieurs années, notamment pour les fractions les plus réfractaires à la dégradation (résines, asphaltènes). La **sédimentation** et le **coulage** peuvent résulter de plusieurs processus différents : accroissement de la densité du pétrole résultant de sa transformation dans le milieu marin, agrégation avec des particules en suspension.

Quand la nappe atteint la côte, elle s'échoue. Selon la nature de la côte (sable, rochers...), la nappe peut repartir vers le large. La présence de glace de mer complique les phénomènes d'étalement et de transformation de la nappe.

## LES MODÈLES DE DÉRIVE DE NAPPE D'HYDROCARBURES

Les modèles de transport de polluant sont fondés sur une loi de conservation de la masse du polluant :

$$\frac{dC}{dt} = S \quad (1)$$

où C représente la concentration du polluant et S les termes source et puits, fonction de la nature du polluant et de l'environnement dans lequel il se trouve.

Le schéma ci-contre résume l'architecture générale des modèles de transport et de transformation de polluant. Les données relatives au polluant sont des caractéristiques physicochimiques (densité, point d'ébullition, etc.) et aussi des informations sur les quantités déversées et leur localisation. Les données environnementales sont à la fois des données hydrodynamiques (courants, vents), utilisées dans les algorithmes d'advection, et des données qui interviennent dans les algorithmes de transformation, telles que les températures de l'air et de la mer ou le vent.

Deux techniques sont possibles. Dans la technique eulérienne, l'équation (1) prend alors la forme d'une équation d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \cdot \nabla C = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) + S \quad (2)$$

où  $\nabla$  représente l'opérateur gradient, V le champ de vitesses tridimensionnel, D le tenseur de diffusion et S les termes source et puits. On obtient les concentrations de polluant en chaque point d'une grille.

La méthode lagrangienne consiste à suivre le mouvement de particules indépendantes de polluant dont l'ensemble constitue la nappe. On a pu montrer (Hunter, 1987) que cette deuxième approche donnait de meilleurs résultats. C'est celle qui est utilisée dans la plupart des modèles (par exemple Venkatesh, 1990, ou Proctor et al., 1994).

## Advection

Un grand nombre de modèles, développés depuis le début des années soixante, utilisent des lois empiriques et une dérive égale à 3 % de la vitesse du vent, avec une direction fixe par rapport à la direction du vent. Il est en général possible d'ajouter les courants de marée et les courants permanents issus de diverses bases de données. On fait ensuite une somme vectorielle de ces composantes du courant. Certains de ces modèles sont encore utilisés actuellement. Leur point fort est la rapidité du calcul.

Une autre approche consiste à utiliser un modèle hydrodynamique d'océan. Dans ce cas, les interactions entre les différentes composantes du courant sont correctement représentées, de même que la structure spatiotemporelle du courant. Seule cette approche permet d'obtenir des courants suffisamment réalistes pour bien simuler la dérive. Il faut cependant disposer de moyens de calcul importants.

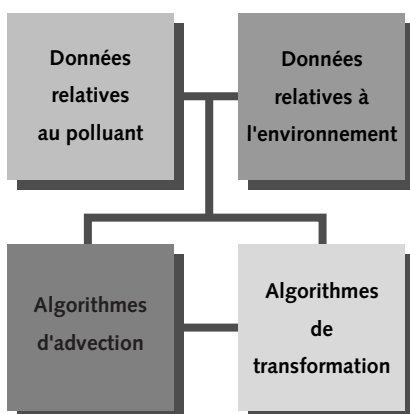


Schéma d'ensemble d'un modèle de transport de polluant.



## Expansion horizontale

Deux phénomènes physiques conduisent à une expansion horizontale des nappes de pétrole. Il s'agit, d'une part, de l'étalement sous l'effet de forces mécaniques telles que la gravité, l'inertie, la viscosité et la tension interfaciale et, d'autre part, de la diffusion turbulente.

Le modèle d'étalement de Fay (Fay, 1971) est l'un des plus utilisés (ASCE, 1996 ; Cekirge et al., 1995 ; Spaulding, 1997). Il sépare l'étalement en trois phases. La première, qui dure une heure, est dominée par les forces de gravité et d'inertie. La deuxième s'étend jusqu'à une semaine ; elle est contrôlée par les forces de gravité et de viscosité. Au-delà d'une semaine, seule la viscosité est prise en compte. Ce modèle, testé en laboratoire avec des nappes de forme simple, sous-estime l'étalement en conditions réelles avec des nappes de forme plus complexe. Aussi est-il utilisé avec une approche lagrangienne, en considérant que la nappe est constituée d'un certain nombre de petites nappes auxquelles on applique la théorie de Fay.

L'expansion horizontale par la diffusion turbulente est en général modélisée par un processus aléatoire ajusté par un coefficient de diffusion. Le modèle d'Elliot (Elliot, 1986) relie l'étalement à la distribution des tailles des gouttes d'hydrocarbure et au processus de diffusion par le cisaillement de courant. Ce modèle simule correctement l'étirement de la nappe dans le sens du vent et la présence des plus grosses gouttes en tête de nappe.

## Autres processus de transformation

Les autres processus d'évolution de la nappe (évaporation, émulsification...) sont calculés à partir de formules empiriques. Il existe un nombre limité d'algorithmes, en général deux ou trois pour chaque processus. La plupart ont été développés au début des années soixante-dix et peu d'améliorations significatives ont été apportées depuis. Les principales difficultés pour la modélisation proviennent du manque de données disponibles pour la validation, de la complexité des compositions chimiques des hydrocarbures et de la grande diversité des conditions environnementales.

## LE MODÈLE DE DÉRIVE DÉVELOPPÉ PAR MÉTÉO-FRANCE

La nappe d'hydrocarbures est composée d'un ensemble de gouttelettes indépendantes dont la masse volumique est déterminée par le type d'hydrocarbure. Les gouttelettes sont lâchées par paquets à intervalles de temps réguliers. Chaque paquet est constitué d'un ensemble de gouttelettes de tailles différentes ayant une distribution linéaire en diamètre, entre 10 mm et 500 mm. Le mouvement de chacune de ces gouttelettes est déterminé par le courant (mouvement horizontal), la diffusion turbulente (mouvement tridimensionnel) et la flottabilité (mouvement vertical).

## Modélisation du courant

La modélisation du courant est réalisée par le couplage d'un modèle d'océan bidimensionnel (2D) avec un modèle analytique unidimensionnel (1D). Cette approche a été choisie pour avoir une bonne représentation du cisaillement de courant près de la surface de la mer.

Le modèle d'océan 2D est un modèle intégré sur la profondeur, dit barotrope. Il utilise les équations de Saint-Venant qui sont discrétisées en différences finies sur une grille latitude-longitude de maille fixe. La taille de la maille dépend du domaine considéré (de 300 m dans certains lagons de Polynésie à 9 km).

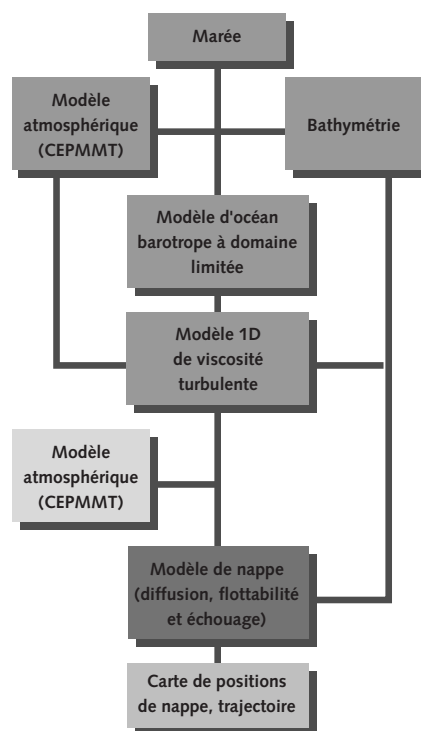


Schéma d'ensemble du modèle de dérive de nappe de Météo-France.



Le forçage atmosphérique, vent et pression, est fourni par les prévisions du modèle du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Le forçage par la marée est introduit par une condition aux limites du domaine de calcul en mer du Nord, en Manche et dans l'océan Atlantique, en prenant en compte seize ondes de marée. Les fichiers de profondeurs ont été obtenus au large des côtes françaises à partir de cartes du Service hydrographique et océanographique de la Marine et, ailleurs, à partir d'une base de données planétaire du National Geophysical Data Center (NOAA, États-Unis).

Le modèle 2D fournit, à chaque pas de temps, des courants intégrés sur la profondeur (courant moyen de la colonne d'eau), sur une grille régulière. Pour chaque gouttelette, on applique ensuite le modèle 1D.

Le modèle analytique de viscosité turbulente (1D) est contraint par le courant intégré sur la profondeur, par la tension du vent en surface et par le frottement au fond. On suppose que le coefficient de viscosité augmente linéairement de la surface jusqu'à une certaine profondeur (qui est variable) et que le coefficient décroît ensuite linéairement jusqu'au fond (Poony et Madsen, 1991). On obtient une rotation de la direction du courant suivant la profondeur. Cela permet d'affecter à la gouttelette considérée un courant horizontal, en fonction de sa position dans la colonne d'eau.

## La diffusion turbulente

Ce phénomène est représenté dans les trois dimensions par un processus aléatoire, ajusté par un coefficient de diffusion.

Le mouvement horizontal pendant un pas de temps  $\Delta t$  est donné par :

$$D_h = R \cdot \sqrt{2} \cdot K_h \cdot \Delta t$$

dans la direction  $\theta = 2\pi R$ , où  $K_h$  est le coefficient de diffusion horizontale et  $R$  un nombre aléatoire compris entre 0 et 1.

Sur la verticale, le mouvement est donné par :

$$D_v = (2R - 1) \cdot \sqrt{2} \cdot K_v \cdot \Delta t$$

où  $K_v$  est le coefficient de diffusion verticale.

## La flottabilité

La force de flottabilité engendre pour chacune des gouttes un mouvement vertical dont la vitesse est contrôlée par le diamètre et la densité des gouttes, par la viscosité et par la densité de l'eau de mer. Les grosses gouttes restent en surface, alors que les petites gouttes ont tendance à couler. On constate qu'environ 65 à 70 % des gouttes restent en surface.

La vitesse verticale  $U_f$  est (Elliot, 1986) :

$$U_f = \frac{g \cdot d^2 \cdot (1 - \frac{\rho_0}{\rho})}{18 \cdot \nu} \quad \text{pour les petites gouttelettes avec } d \leq d_c$$

$$U_f = \sqrt{\frac{8}{3}} \cdot g \cdot d \cdot (1 - \frac{\rho_0}{\rho}) \quad \text{pour les grosses gouttelettes avec } d > d_c$$

Le diamètre critique  $d_c$  est :

$$d_c = \frac{9,52 \cdot \nu^{2/3}}{\sqrt[3]{g \cdot (1 - \frac{\rho_0}{\rho})}}$$

$\rho$  étant la densité de l'eau de mer,  $\rho_0$  la densité du polluant et  $\nu$  la viscosité.

## UN EXEMPLE DE VALIDATION : LE TORREY CANYON

Le modèle a été validé sur des cas concrets de pollution bien documentés : *Torrey Canyon* en Manche en 1967 (Drici, 1994 ; Chaussard et Perrin, 1996) ; *Amoco Cadiz*, en Manche en 1978 (Drici, 1994 ; Chaussard et Perrin, 1996 ; Daniel, 1996) ; *Tanio* en Manche en 1980 (Chaussard et Perrin, 1996) ; *Mina Al Ahmadi* dans le golfe Persique en 1991 (Dervillée et Jouvenot, 1993), *Aegean Sea* au large de La Corogne en Espagne en 1992 (Daniel, 1995). L'exemple du *Torrey Canyon*, présenté ci-après, est un des plus intéressants car il fait intervenir plusieurs nappes qui ont dérivé pendant plusieurs semaines.



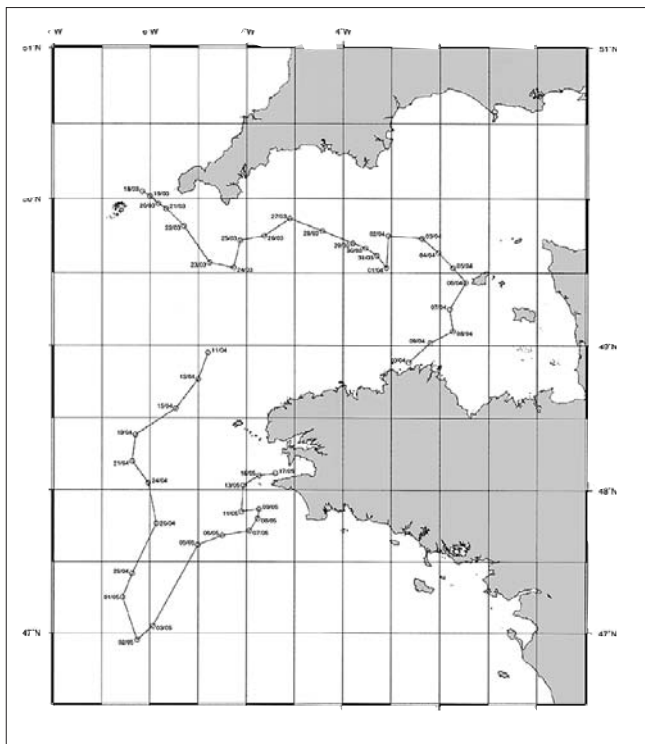


Figure 2 - Trajectoires observées des têtes de nappe lors de l'accident du *Torrey Canyon* en 1967.

Le 18 mars 1967, le pétrolier *Torrey Canyon* s'échoue sur les récifs de Seven Rocks au large des îles Scilly, à l'ouest des Cornouailles ; les 121 000 tonnes de pétrole qu'il contient vont se répandre à la surface de la Manche et du proche Atlantique. Ce pétrole va se diviser en quatre nappes (figure 2) :

- La première (30 000 tonnes) s'écoule tout de suite après le naufrage et va dériver en Manche pendant 24 jours avant d'aller s'échouer sur la côte nord de la Bretagne, tout d'abord entre Trébeurden et l'île de Bréhat, puis, s'étendant progressivement, jusqu'à la rivière de Morlaix à l'ouest et jusqu'à Plouescat à l'est.
- La deuxième (20 000 tonnes) s'échappe les jours suivants et va directement polluer les côtes des Cornouailles.
- La troisième (50 000 tonnes) est libérée le 26 mars lorsque l'épave est coupée en deux par la tempête. Cette nappe va dériver dans le proche Atlantique au large des côtes du Finistère. Elle dérive vers le sud jusqu'au 2 mai. Puis, poussée par des vents de sud-ouest, elle remonte vers les baies de Douarnenez et d'Audierne où des pollutions très limitées sont signalées le 19 mai.
- La dernière (20 000 tonnes) est brûlée pendant le bombardement de l'épave entre le 28 et le 30 mars.

Une simulation sur deux mois a été effectuée en supposant un déversement continu de pétrole pendant dix jours. Les vents utilisés pour la simulation sont issus de mesures en mer par des navires ou des bouées. Une interpolation a été faite pour avoir le vent en chaque point de grille. On dispose des vents toutes les six heures.

en mer par des navires ou des bouées. Une interpolation a été faite pour avoir le vent en chaque point de grille. On dispose des vents toutes les six heures.

La figure 3 montre les trajectoires des gouttes ayant quitté l'épave entre le 18 mars à 10 h UTC et le 19 mars à 14 h UTC. L'intervalle de temps entre chaque point sur une trajectoire est de six heures. Les oscillations dues à la marée apparaissent clairement avec un renversement du courant toutes les six heures. La trajectoire des gouttes est conforme à la trajectoire observée. On constate que les gouttes touchent la côte de Bretagne le 10 avril 1967 (après trois semaines de trajet en Manche), ce qui correspond parfaitement à l'observation.

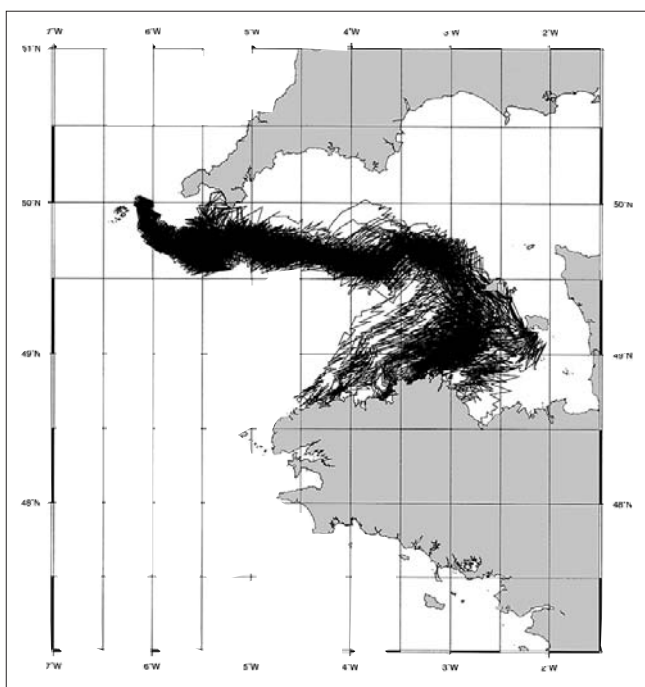


Figure 3 - *Torrey Canyon*. Première nappe : trajectoires simulées des gouttes d'hydrocarbure lâchées entre le 18 mars à 10 h UTC et le 19 mars à 14 h UTC.

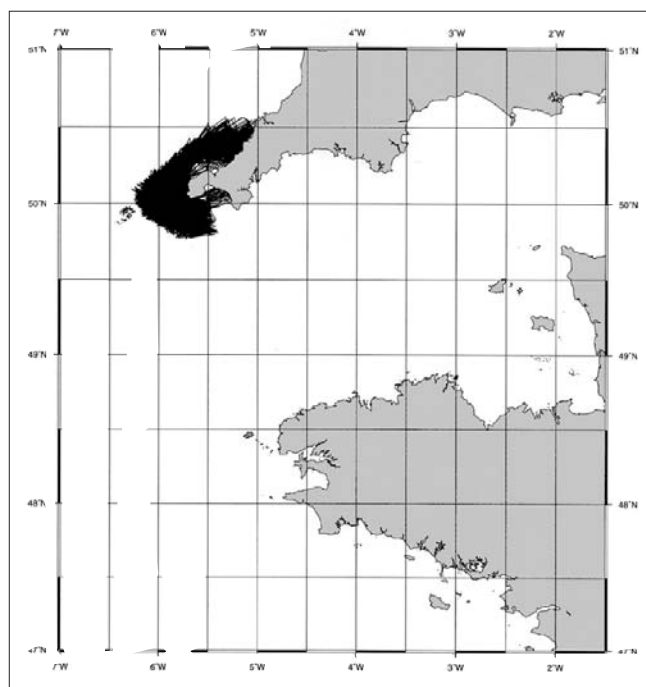


Figure 4 - *Torrey Canyon*. Deuxième nappe : trajectoires simulées des gouttes d'hydrocarbure lâchées entre le 19 mars à 14 h UTC et le 25 mars à 18 h UTC.



La figure 4 représente la trajectoire des gouttes lâchées entre le 19 mars à 14 h UTC et le 25 mars à 18 h UTC. Toutes les gouttes se sont échouées sur les côtes des Cornouailles.

La figure 5 montre les trajectoires des gouttes lâchées entre le 25 mars à 18 h UTC et le 27 mars à 22 h UTC. Pendant cette période, les courants de marée déplacent les gouttes alternativement vers le nord et vers le sud. Quatre paquets de gouttes vont s'échouer sur la côte nord des Cornouailles et trois paquets partent vers le sud. Le mouvement de ces gouttes qui partent vers le sud correspond bien au mouvement observé durant le premier mois, puis diverge ensuite. Le déplacement vers le sud est plus lent que ce qui a été observé, notamment dans la partie centrale de la Manche. Une explication de cette divergence réside peut-être dans le manque d'observations de vent dans cette région (figure 6), ce qui conduit à utiliser dans l'interpolation des vents proches des côtes qui sont en général plus faibles qu'au large par flux de nord.

La figure 7 montre la position des gouttes le 10 avril 1967 à 10 h UTC. La première nappe atteint la côte de Bretagne. La deuxième nappe est entièrement échouée sur les côtes des Cornouailles. La troisième se trouve au milieu de la Manche.

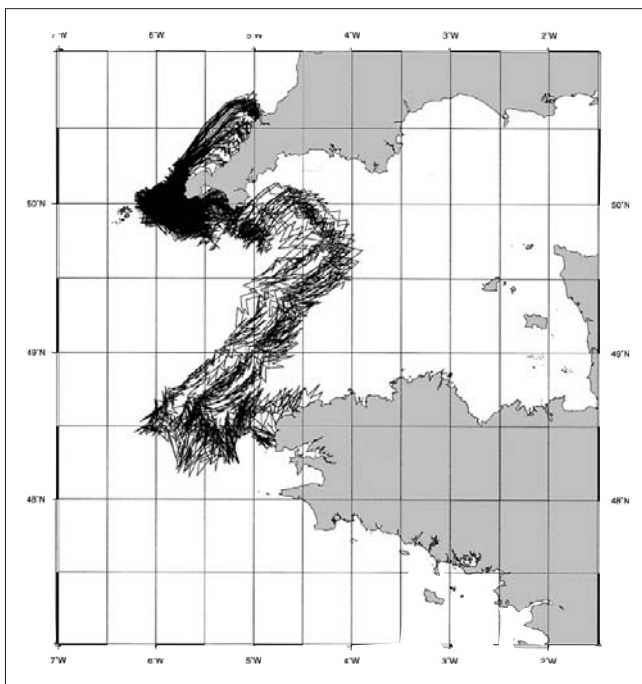


Figure 5 - *Torrey Canyon*. Troisième nappe : trajectoires simulées des gouttes d'hydrocarbure lâchées entre le 25 mars à 18 h UTC et le 27 mars à 22 h UTC.

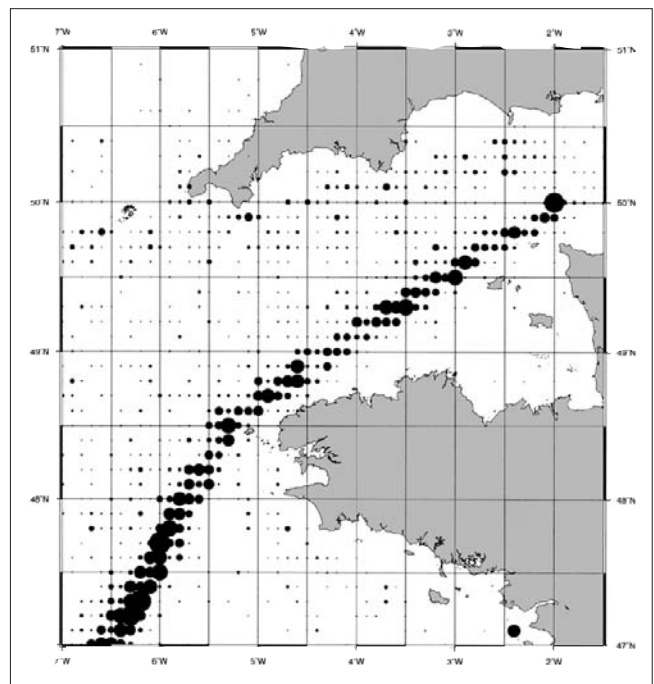


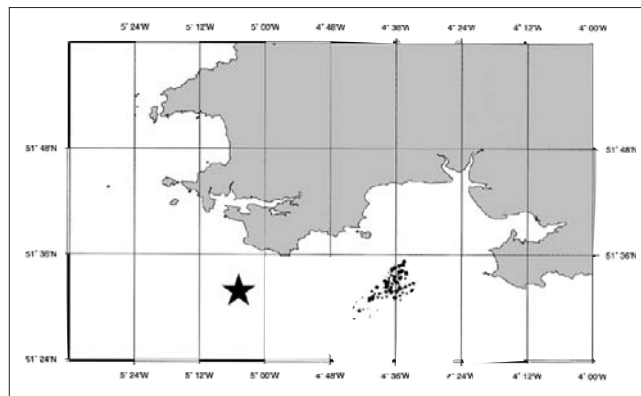
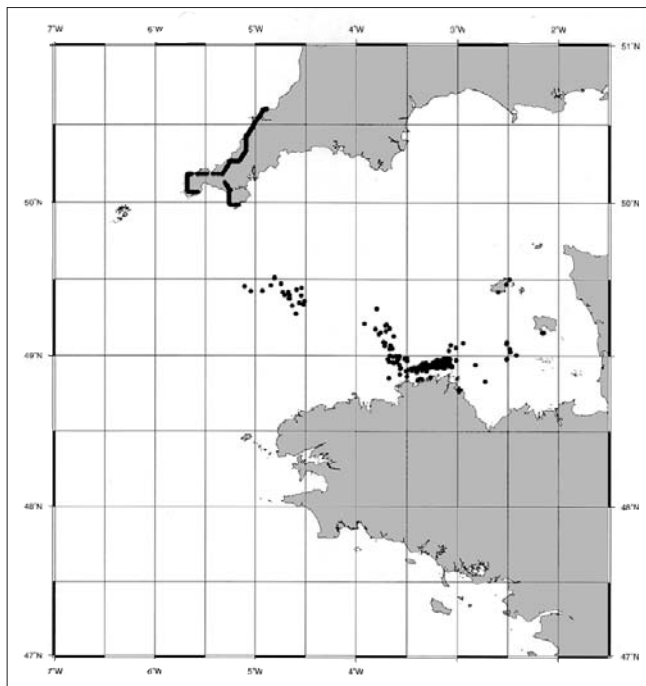
Figure 6 - Densité des observations de vent durant la période de simulation de l'accident du *Torrey Canyon* (la taille des points est fonction du nombre d'observations).

## UN EXEMPLE D'UTILISATION OPÉRATIONNELLE : L'ACCIDENT DU SEA EMPRESS

Depuis février 1994, le modèle peut être activé à la demande par un prévisionniste marine du SCEM à Toulouse. Les informations nécessaires sont la position de la nappe, l'heure de l'observation, la durée du déversement et le type d'hydrocarbure (pétrole brut léger ou lourd, huile, kérosène, gasoil, mazout, essence). Une prévision à cinq jours prend quelques minutes sur le Cray C98. Actuellement, le modèle a été utilisé deux fois lors d'accidents, la première fois en décembre 1994 pour un accident survenu au large du Portugal dans la zone II. Des cartes de dérive prévue furent envoyées aux services météorologiques du Portugal, de l'Espagne et du Maroc, ainsi qu'à la compagnie propriétaire du navire. Aucune côte ne fut touchée.

Plus récemment (février 1996), lors de l'accident du *Sea Empress* au pays de Galles, le Cedre a demandé à Météo-France des prévisions de dérive de nappe. Les résultats des prévisions correspondaient bien à ce qui a été observé. La figure 8 donne un exemple de prévision à 60 heures, à partir de la position de la nappe observée le 22 février à 12 h UTC. L'étoile indique la position de départ de la nappe. Les disques noirs indiquent la position des gouttes le 25 février à 0 h UTC. La taille des disques est fonction de la profondeur des gouttes : les grosses gouttes sont proches de la surface.





▲ Figure 8 - Accident du *Sea Empress*. Prévission à 60 heures à partir d'une position de nappe (indiquée par une étoile) observée le 22 février 1996 à 12 h UTC. Les disques noirs indiquent la position des gouttes le 25 février 1996 à 0 h UTC. La taille des disques est fonction de la profondeur des gouttes : les grosses gouttes sont proches de la surface.

◀ Figure 7 - *Torrey Canyon*. Position des gouttes d'hydrocarbure, prévue par le modèle le 10 avril 1967 à 10 h UTC.

### LES EXERCICES ANTIPOL95 ET KIDOUR III

Régulièrement, le Cedre procède à des exercices qui permettent de tester le modèle.

L'exercice Antipol95, qui s'est déroulé les 3 et 4 octobre 1995 au large de l'île de Batz (Bretagne), a associé le Cedre, la Marine nationale, la compagnie Saudi Petroleum Overseas Ltd. et Météo-France. Cet exercice a consisté à simuler l'accident d'un pétrolier contenant 300 000 tonnes de pétrole brut léger. Une bouée dérivante, de type Norda, a été lâchée au point de l'exercice pour simuler la dérive de la nappe. Pendant deux jours, des simulations ont été faites avec le modèle de dérive de nappe et ont été envoyées au Cedre. Les positions observées de la bouée sont reportées sur la figure 9. La figure 10 résume deux semaines de simulation avec le modèle. Les trajectoires des gouttes sont représentées avec une position toutes les six heures. Le forçage atmosphérique est issu du modèle Arpège de Météo-France. Les premiers jours, les vents soufflent du sud-ouest et la trajectoire de la bouée est très semblable à

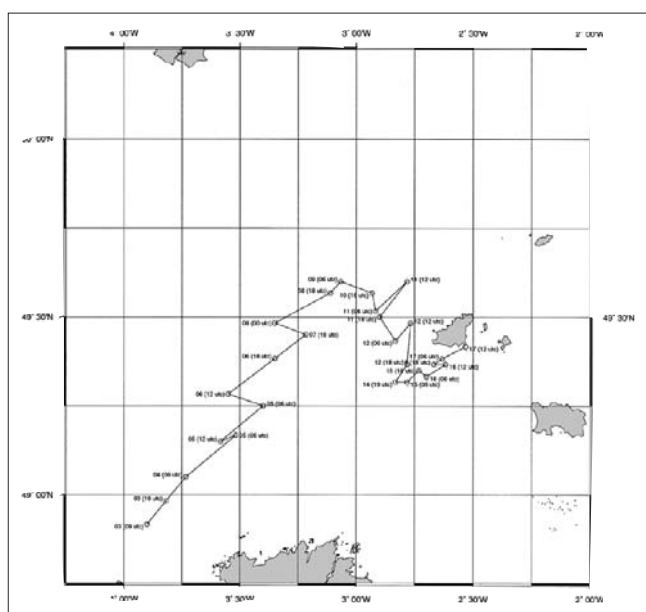


Figure 9 - Exercice Antipol95. Positions observées de la bouée du 3 octobre 1995 au 17 octobre 1995.

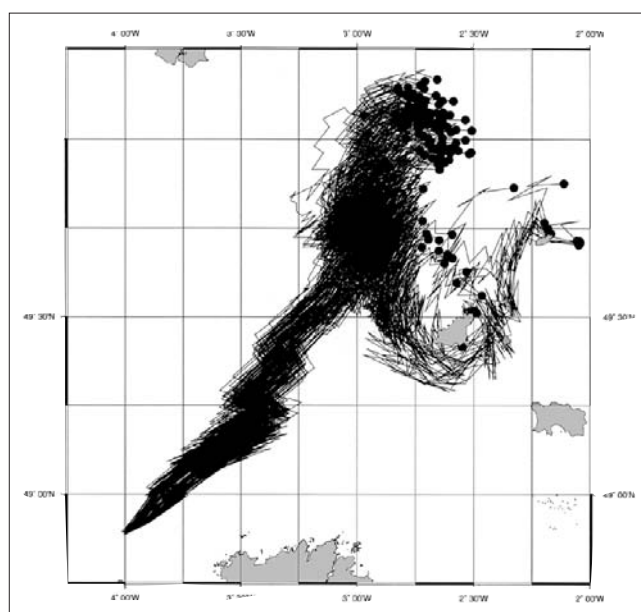


Figure 10 - Exercice Antipol95. Trajectoires des gouttes simulées par le modèle du 3 octobre au 17 octobre 1995. Les disques noirs indiquent la position des gouttes le 17 octobre à 12 h UTC.

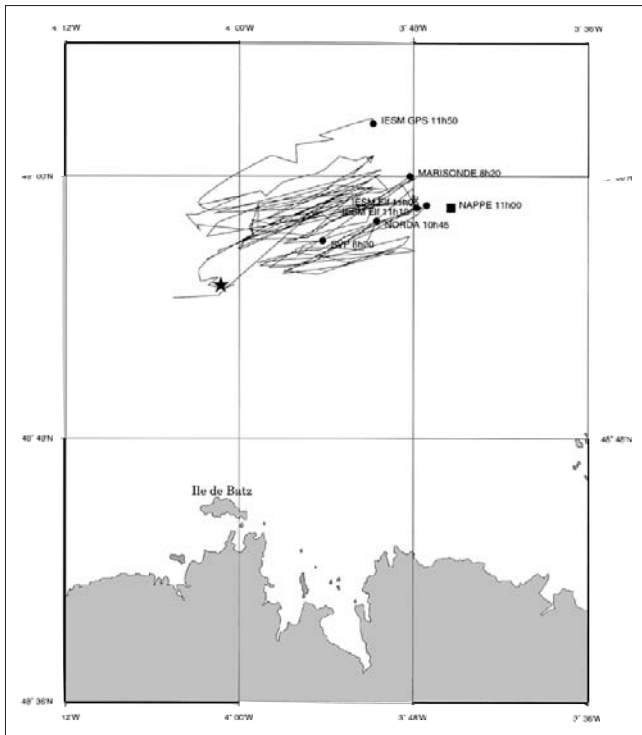


Figure 11 - Exercice Kidour III. Trajectoires observées des bouées. L'étoile représente la position de lâcher de la nappe d'huile de poisson le 17 juin à 15 h UTC. Les disques noirs représentent les positions des bouées le 19 juin. Le carré noir représente la position du centre de la nappe le 19 juin.

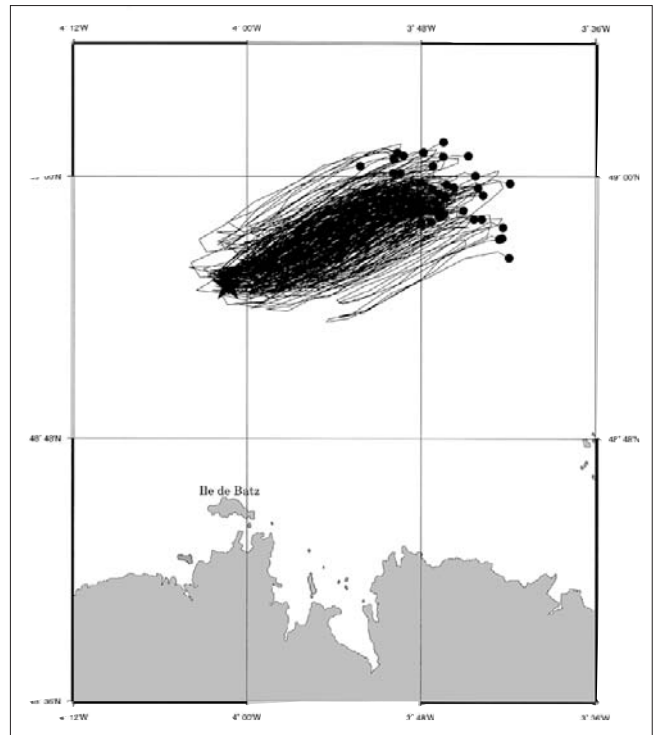


Figure 12 - Exercice Kidour III. Trajectoires des gouttes simulées par le modèle du 17 juin à 15 h UTC au 19 juin à 11 h UTC. Le point de lâcher est représenté par une étoile. Les disques noirs indiquent la position des gouttes le 19 juin à 11 h UTC.

celle des gouttes. À partir du 9 octobre, les vents deviennent faibles et la nappe simulée est dispersée par les courants de marée. La plupart des gouttes se déplacent lentement vers le nord. Mais quelques gouttes se déplacent vers le sud-est, passent au sud de Guernesey, puis remontent vers le nord. La trajectoire de ces gouttes est assez semblable à celle de la bouée qui s'est finalement échouée à Guernesey. Cet exercice montre que la dérive d'une seule bouée (censée dériver comme une nappe) ne permet pas de rendre compte des phénomènes de dispersion et d'étalement.

L'exercice Kidour III (17-19 juin 1996) avait pour but d'évaluer les dérives de plusieurs types de bouées de marquage en les comparant à une dérive d'huile de poisson. La zone d'expérimentation était sensiblement la même que pour l'exercice Antipol95. Le modèle de dérive de nappe a été activé à partir des données fournies par le Cedre et correspondant au lâcher de 5 m<sup>3</sup> d'huile de poisson. Lors de cet exercice, les vents sont restés faibles sur la zone (inférieurs à 10 nœuds) et la nappe a évolué essentiellement en fonction des courants de marée. Dans cette zone, les courants de marée sont presque parallèles à la côte et changent de sens toutes les six heures. Cela apparaît nettement sur la figure 11 où sont représentées les trajectoires des bouées. La simulation du modèle est représentée figure 12. La trajectoire simulée par le modèle correspond assez bien aux trajectoires des bouées et de la nappe d'huile de poisson.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le modèle de dérive de Météo-France permet de prévoir le mouvement des nappes d'hydrocarbures à la surface de la mer avec une bonne précision. Une étude comparative récente (Bonfils, 1996) menée par le Cedre a montré que le modèle de Météo-France était plus précis que les autres modèles utilisés par cet organisme.

Cependant, des améliorations devront être apportées. Elles concernent la prise en compte des processus de transformation de la nappe comme l'évaporation ou l'émulsification. Ce travail va être mené conjointement avec le Cedre. Un autre type d'amélioration concerne la modélisation des courants. Si le modèle est bien adapté pour la prévision des courants dans les zones où les eaux sont bien mélangées, comme la Manche ou le plateau continental du golfe de Gascogne, il est en revanche moins précis pour des mers stratifiées et dans les zones où il existe de forts courants permanents. L'utilisation d'un modèle d'océan tridimensionnel, prenant en compte les effets de la circulation profonde, est à l'étude pour la Méditerranée et pour l'Atlantique tropical.



## Remerciements

Ce travail a été mené au sein de la subdivision Prévision marine du SCEM, à l'initiative de son responsable Joël Poitevin. Un grand nombre de stagiaires de l'ENM ont contribué à la réalisation de ce projet lors de leur stage de fin de scolarité. L. Dervillée et P. Jouvenot ont travaillé sur l'étalement de la nappe et les mouvements des gouttes dans la colonne d'eau. K. Drici a introduit la marée dans le modèle d'océan. D. Chaupin et S. Martinez ont développé une version tridimensionnelle du modèle d'océan. L. Chaussard et L. Perrin ont contribué à l'obtention des résultats présentés dans cet article. L'aide de P. Vincent (CNES) sur la modélisation des marées a été appréciée.

## BIBLIOGRAPHIE

ASCE, 1996 : State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122, 11, 594-609.

Bonfils C., 1996 : Prévision des risques en cas de pollution des mers par les hydrocarbures : étude comparative de quelques modèles de dérive de nappes, validation de deux modèles à partir de cas réels de déversements. Rapport de DEA, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 52 p.

Cekirge H. M., M. Koch, C. Long, C. P. Giammona, K. Binkley, R. Engelhardt et R. Jamaal, 1995 : State-of-the-art techniques in oil spill modeling. Proceedings of the 1995 International Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Washington, États-Unis, 67-72.

Chaussard L. et L. Perrin, 1996 : Modélisation de la dérive des nappes d'hydrocarbures en mer : application à l'exercice Antipol95 en Manche et à plusieurs accidents réels de pétroliers. Note de travail de l'ENM n° 570, Météo-France, Toulouse, 111 p.

Chaupin D. et S. Martinez, 1995 : Développement d'un modèle 3D d'hydrodynamique côtière pour la dérive d'une nappe d'hydrocarbure. Note de travail de l'ENM n° 513, Météo-France, Toulouse, 77 p.

Daniel P., 1995 : Numerical simulation of the *Aegean Sea* oil spill. Proceedings of the 1995 International Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Washington, États-Unis, 894-895.

Daniel P., 1996 : Operational forecasting of oil spill drift at Météo-France. *Spill Science and Technology Bulletin*, 3,1/2, 53-64.

Dervillée L. et P. Jouvenot, 1993 : Pollution marine. Modélisation de la dérive et de l'étalement d'une nappe d'hydrocarbures. Note de travail de l'ENM n° 391, Météo-France, Toulouse, 112 p.

Drici K., 1994 : Modélisation de l'évolution des nappes d'hydrocarbures à la surface de la mer. Note de travail de l'ENM n° 453, Météo-France, Toulouse, 64 p.

Elliot A., 1986 : Shear diffusion and the spread of oil in the surface layers of the North sea. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 39, 3, 113-137.

Fay J. A., 1971 : Physical processes in the spread of oil on a water surface. Proceedings of Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, American Petroleum Institute, 463-468.

Gérard F., 1972 : La campagne Pollumer. *La Météorologie* 5<sup>e</sup> série, 24, 85-100.

Gérard F., 1974 : Dérives d'hydrocarbures en mer. Note de l'EERM n° 354. Météorologie nationale, Paris, 50 p.

Gérard F., 1977 : La pollution des mers par le pétrole. *Met Mar*, 95, 27-39.

Gérard F., 1979 : Surveillance de la pollution marine due au pétrole. *Met Mar*, 103, 25-41.

Hunter J. R., 1987 : The application of Lagrangian particle-tracking techniques to modeling of dispersion in the sea. *Numerical Modelling: Applications to Marine Systems*. J. Noye ed., North Holland, 257-269.

Poony Y. K. et O. S. Madsen, 1991 : A two layers wind-driven coastal circulation model. *J. Geophys. Res.*, 96, C2, 2535-2548.

Proctor R., R. A. Flather et A. J. Elliott, 1994 : Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf: application to the Gulf oil spill. *Continental Shelf Res.*, 5, 531-545.

Spaulding M. L., 1997 : Oil spill trajectory and fate modeling: A state-of-the-art review. *Spill Science and Technology Bulletin*, à paraître.

Venkatesh S., 1990 : Model simulations of the drift and spread of the Exxon Valdez oil spill. *Atmosphere-Ocean*, 28, 90-105.

