

Pollution en mer

Observer et prévoir leur dérive

Douanes françaises



Naufrage du *Prestige*, le 19 novembre 2002.

De l'avis de tous, les catastrophes de l'*Erika*, puis du *Prestige*, auront eu au moins un avantage : celui d'avoir fait progresser plus encore nos compétences, nos moyens et notre organisation opérationnelle en matière de prévision de dérive de nappe de pétrole. S'agissant de l'organisation opérationnelle, une première instruction interministérielle en avril 2001, puis une deuxième en mars 2002, ont défini les responsabilités de chaque intervenant en cas d'accident maritime majeur. Il revient au Préfet maritime de la région concernée de déclencher le plan Polmar Mer, de coordonner les actions de sauvetage et de lutte antipollution et d'assurer la communication vers la presse. Le Cedre (Centre de documentation, de recherche et d'expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux) intervient comme expert auprès du Préfet maritime en matière de dérive du polluant et de son traitement. Concernant la dérive, il s'appuie sur les prévisions du modèle Mothy, mis en œuvre par Météo-France à sa demande et à partir des éléments qu'il fournit. Ce sont principalement les aspects scientifiques et techniques de la prévision de dérive que nous allons présenter dans cet article.

Michel Hontarrède,

Météo-France

D'après les sources suivantes :

- notes de cours de **Pierre Daniel,**

Météo-France

Direction de la Prévision/Division Marine

& Océanographie,

- divers exposés lors d'une formation

d'agents Météo-France au plan Polmar

notamment ceux de **Fanch' Cabioc'**

et de **Michel Girin** du Cedre,

- les sites internet www.le-cedre.fr

et www.meteorologie.eu.org/mothy.

Avant 1994, date de la première utilisation opérationnelle d'un modèle de dérive à Météo-France, on calculait déjà « à la main » des dérives de nappe d'hydrocarbure. On se contentait d'appliquer à l'objet dérivant la somme des déplacements dus au vent (à une vitesse égale à 3 % de celle du vent) et au courant (100 % de la vitesse du courant). Le calcul était reconduit toutes les six heures ou toutes les douze heures selon la disponibilité des prévisions de vent. Cette méthode a donné des résultats corrects en son temps, par exemple lors de la catastrophe du *Tanio* (nord de l'île de Batz, mars 1980). Elle est encore utilisée aujourd'hui par des modèles de dérive simples disponibles sur Internet. On peut l'améliorer en y associant la dérive due au courant de marée. Mais cette méthode a ses limites. Pour un objet dérivant solide, elle ne prend pas en compte le pourcentage d'immersion qui va conditionner la dérive due au vent, ni la profondeur de l'eau qui conditionne la vitesse du courant de surface. Pour un polluant, elle ne distingue pas entre les divers produits chimiques, dont les hydrocarbures, qui ont des comportements extrêmement différents en termes de plongée, d'évaporation, d'étalement...

Mothy, modèle de transport

Le système Mothy est un modèle double, constitué d'un modèle d'océan, développé pour représenter le mieux possible le courant de surface, et d'un modèle de nappe.

Le modèle Mothy¹ considère une nappe d'hydrocarbures comme étant composée d'un ensemble de particules indépendantes, des « gouttelettes » de diamètre différent. La version actuelle du modèle prend en compte 480 gouttes dont les diamètres varient de 0,3 à 1,3 mm, selon une distribution adaptée au type de polluant. Chaque particule a un mouvement horizontal sous l'effet du courant et de la diffusion turbulente, et un mouvement vertical sous l'effet de la flottabilité et de la diffusion turbulente. Les grosses particules ont tendance à rester en surface, alors que

masse d'eau sont ignorées, les courants de densité ayant peu d'influence pour une prévision sur quelques jours sur un domaine à profondeur limitée².

Dans un premier temps, on calcule un courant moyen pour toute la colonne d'eau (modèle 2D), puis dans un deuxième temps, le courant moyen est décliné selon la verticale (modèle 1D).

Le calcul du courant moyen fait appel aux équations de Saint-Venant qui relient le courant et l'élévation de la surface libre (surcote) à la pression atmosphérique, au vent en surface et à la profondeur de l'eau. La nature du fond intervient également sous la forme d'un coefficient de frottement (par exemple, ce coefficient est dix fois supérieur sur un récif corallien).

Mais la vitesse d'entraînement de l'eau par le vent diminuant en réalité très vite avec la

viscosité homogène et une profondeur infinie, donc pas de frottement au fond ; de plus, c'est une solution à l'équilibre, ce qui n'est jamais tout à fait le cas en océan réel).

À la suite de ce calcul, on dispose d'un courant qui va varier en direction et en intensité selon la profondeur des gouttes. Cette variation du déplacement selon la taille des gouttes va déjà provoquer une certaine dispersion de la nappe. On y ajoute, à chaque pas de temps et pour chaque goutte, un déplacement aléatoire en distance et en direction, à la fois horizontal et vertical, afin de représenter la dispersion de la nappe par diffusion turbulente. La diffusion turbulente, principalement due à l'effet des vagues, conduit à un fractionnement de la nappe en petites gouttes qui diffusent dans les trois directions, avec toutefois une élongation dans le sens du vent et une accumulation de matière en tête. Le modèle choisi représente assez bien ce comportement qui est une caractéristique essentielle de l'océan.

Cette dernière partie du modèle constitue le « module de nappe » chargé de représenter la transformation du produit au cours de la dérive.

Mothy, modèle de marée noire

En matière d'évolution du produit lors du transport, la version opérationnelle de Mothy ne comprend que les aspects étalement et diffusion. Mais d'autres processus sont en cours d'étude, en collaboration avec le Cedre et la société Total, et pourront être prochainement intégrés au modèle opérationnel :

- **Évaporation.** C'est un processus important en termes de transfert de masse durant les premiers jours. L'évaporation dépend de la composition du pétrole, de l'épaisseur de la nappe et de son étendue, de la température de l'air et de la mer, de la vitesse du vent, du rayonnement solaire.
- **Dissolution.** La dissolution n'affecte qu'une très petite partie de la masse (en général moins de 1 %). Mais elle a des conséquences biologiques et toxicologiques importantes. Le processus est bien connu mais sa modélisation est compliquée dès lors qu'il s'agit d'une nappe constituée de

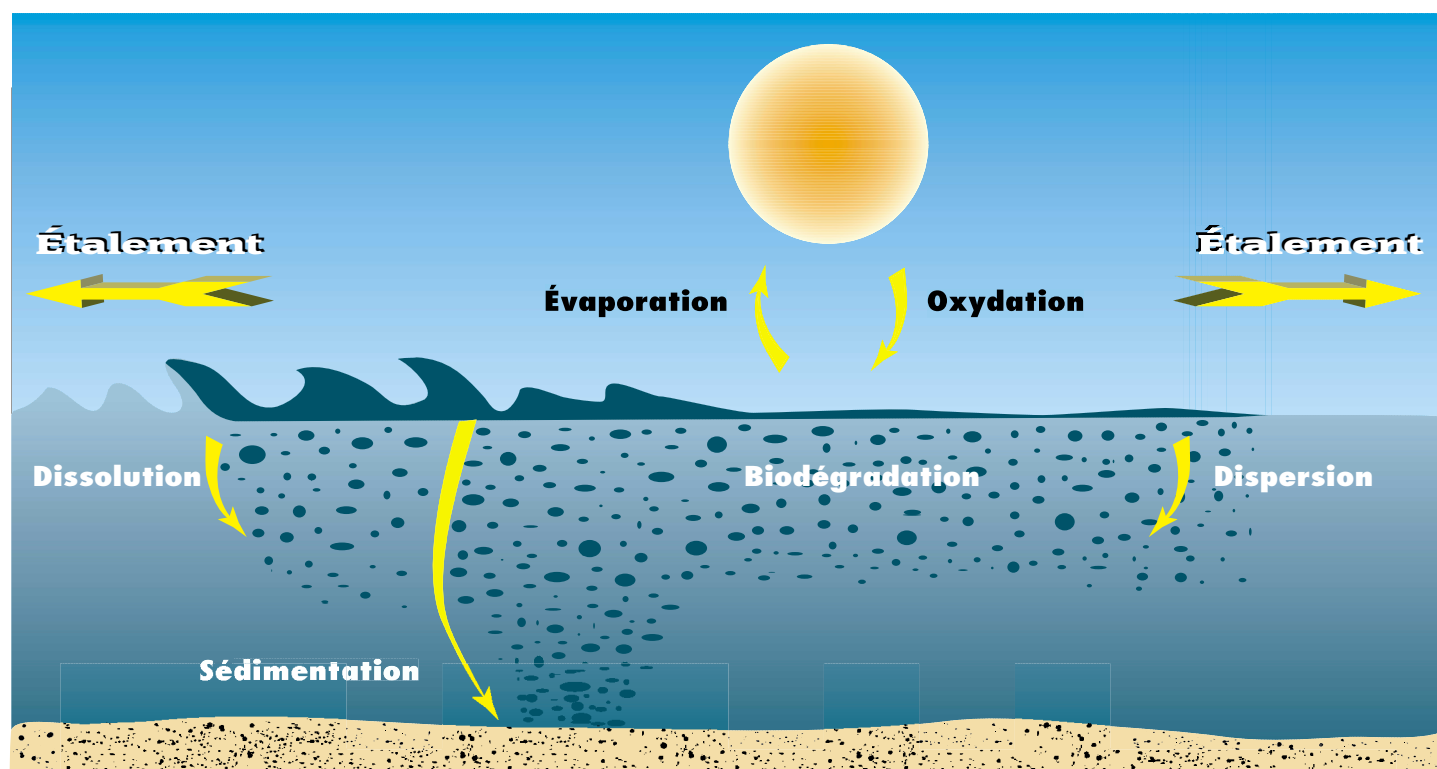


les petites se déplacent dans la colonne d'eau. Ces particules, du fait du cisaillement vertical du courant, ont des vitesses et un sens de déplacement différents de celles restant à la surface, ce qui est une première cause de l'étalement de la nappe.

Le modèle d'océan est « forcé » par le vent et la pression atmosphérique. Sur certaines zones, on prend aussi en compte la marée. En revanche, les différences de densité de la

profondeur, le courant moyen n'est pas représentatif du courant en surface. On calcule donc un profil de courant sur la verticale à partir d'un profil de viscosité turbulente, sous la contrainte du vent en surface, du frottement au fond et du courant moyen calculé précédemment. Ce modèle fait appel à une théorie un peu plus complexe que celle d'Ekman, bien connue des étudiants en océanographie (la théorie d'Ekman suppose une

1. Mothy : Modèle océanique de transport d'hydrocarbure.
2. Cette approche est justifiée en mer du Nord, en Manche et dans le golfe de Gascogne où la présence d'un plateau continental limite la profondeur de l'eau. Courants dus au vent et à la marée prédominent largement. En Méditerranée, en revanche, l'absence du plateau continental conduit à des courants de grande échelle non négligeables (courant liguro-provençal par exemple). Leur prise en compte dans le modèle, à partir des analyses et prévisions Mercator, est à l'étude, la difficulté étant de bien isoler, dans les sorties du modèle à grande échelle Mercator, le courant de densité, afin de ne pas prendre en compte deux fois (via Mercator et via Mothy), le courant dû au vent.



Processus affectant une nappe de pétrole à la surface de la mer.

plusieurs centaines de composés réagissant différemment.

- **Émulsification.** Sous l'effet mécanique du brassage, il se forme un mélange huile - eau de mer qui accroît de 2 à 5 fois le volume de la nappe, réduit son évaporation de plusieurs ordres de grandeur et rend les opérations de nettoyage plus difficiles. C'est un des processus les moins bien compris.

- **Photo-oxydation et biodégradation.** L'oxydation par le soleil génère des composés solubles dans l'eau de mer ; la biodégradation est due aux micro-organismes. Ces deux processus peuvent être négligés dans les modèles de dérive car les échelles de temps sont de l'ordre de la semaine pour le premier, du mois ou de l'année pour le second.

- **Sédimentation.** Deux processus peuvent conduire au « piégeage » du pétrole dans les fonds marins : l'augmentation de la densité du pétrole ou l'agrégation avec des particules en suspension qui peut conduire à un mélange plus dense.

L'évaporation et l'émulsification influent fortement sur la viscosité qui augmente au cours du temps. Or, la viscosité traduit la résistance à l'écoulement d'un fluide. C'est le facteur prépondérant dans le choix des moyens de lutte : moyens de récupération à terre et en mer, possibilités de pompage et de transfert ; traitement chimiques par produits dispersants, utilisation de produits désémulsifiants ou d'absorbants.

La dispersion favorise la dissolution, la biodégradation et la sédimentation (dépôt de l'hydrocarbure dans les sédiments du fond).

Mothy, modèle opérationnel

Le modèle Mothy fonctionne dans le monde entier avec une maille de 5 milles nautiques. Mais, pour bénéficier d'une meilleure représentation de la bathymétrie et du trait de côte, des domaines géographiques limités ont été définis avec une maille inférieure : maille de deux milles pour le golfe Arabo-Persique, maille d'un mille pour les côtes de France et

du Portugal, voire jusqu'à 0,1 mille pour les plus petites îles des DOM-TOM. Quel que soit le domaine, Mothy peut être mis en œuvre immédiatement, 24 heures sur 24, par le prévisionniste « marine » de Toulouse.

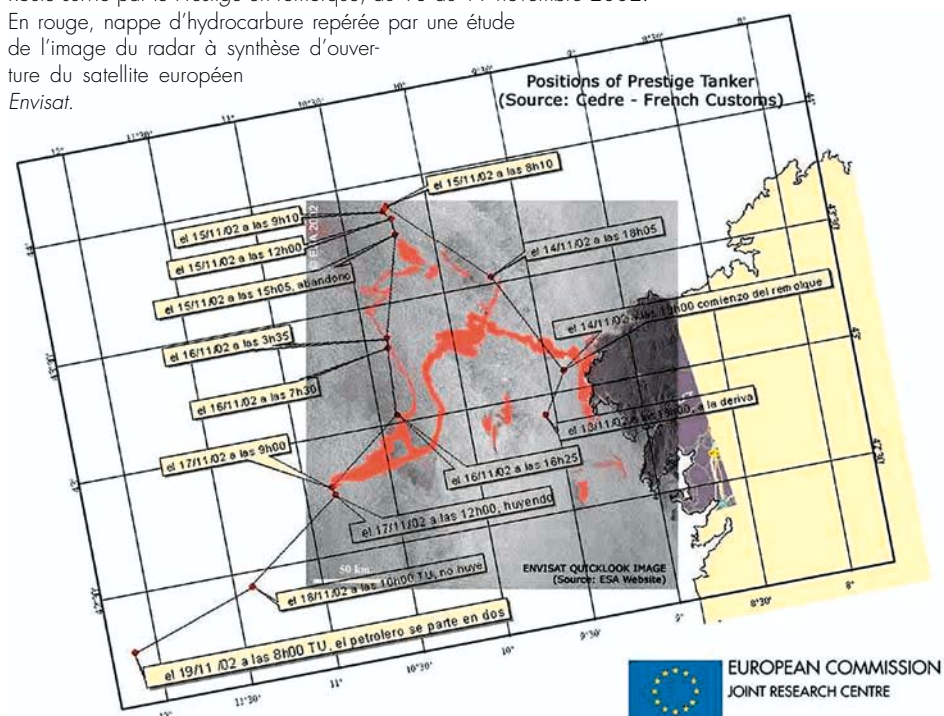
Disposer d'un bon modèle de prévision de dérive est une chose. L'utiliser avec les bonnes données en entrée en est une autre.

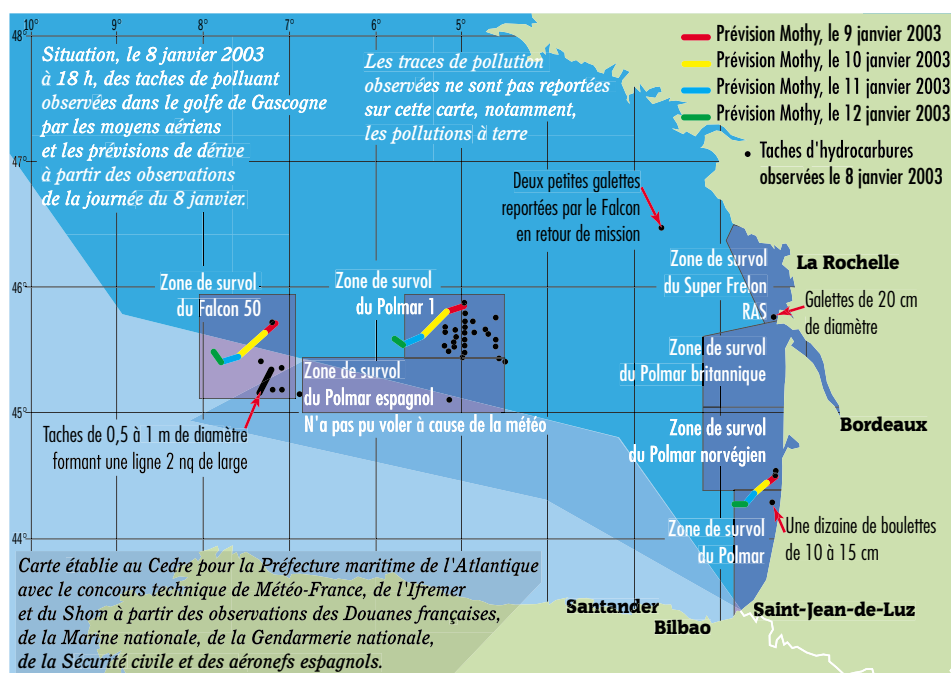
La qualité de la prévision de dérive dépend directement de la qualité des prévisions de vent et de pression utilisées (surtout du

Route suivie par le *Prestige* en remorque, du 13 au 19 novembre 2002.

En rouge, nappe d'hydrocarbure repérée par une étude de l'image du radar à synthèse d'ouverture du satellite européen

Envisat.





Exemple de carte de synthèse élaborée par le Cedre et diffusée par internet. Elle comprend les éventuelles observations d'hydrocarbure et quelques-unes des prévisions de dérive Mothy effectuées à la demande du Cedre. De nombreux commentaires sont intégrés à l'image.

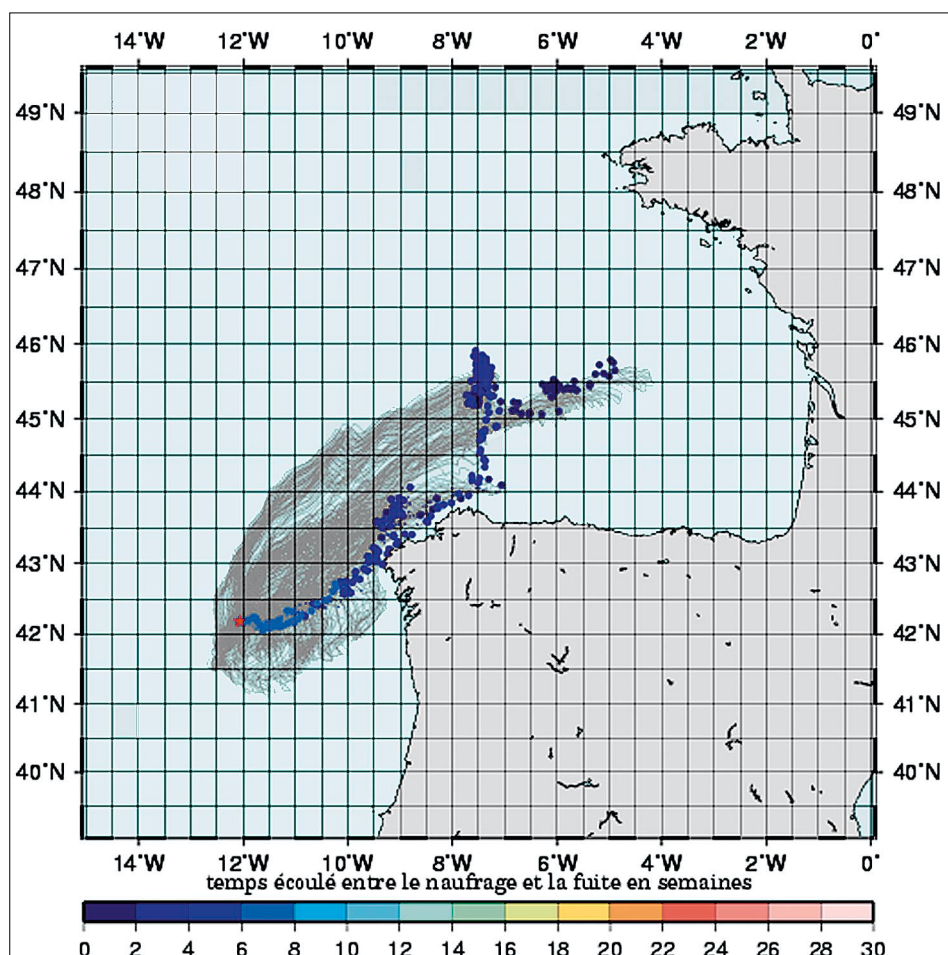
vent). De ce point de vue, Météo-France est équipé au mieux :

- modèle à maille très fine Aladin couvrant toutes les côtes de France ;
- modèle Arpège à maille variable, centré sur la France, pour les prévisions sur les

mers européennes, hors du domaine Aladin ;

- modèle du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMET) pour les prévisions outre-mer ou pour les prévisions à moyenne échéance.

Reste encore à connaître le point de départ



de la prévision. C'est en effet un élément primordial, plus complexe qu'il n'y paraît. On se souvient en effet des « mauvaises prévisions » d'arrivée de pétrole à la côte lors du naufrage de l'*Erika* : attendue sur les plages de Charente-Maritime et de Vendée, la pollution avait surpris tout le monde en débutant ses méfaits à Penmarc'h. Par la suite, les études ont montré que le pétrole échoué à Penmarc'h provenait bien de l'*Erika* et que sa présence pouvait être expliquée soit par une fuite antérieure au naufrage – une hypothèse qui n'avait pas été envisagée sur le moment –, soit par la fuite continue des épaves. Ce fut là le premier enseignement de l'*Erika* : ne pas négliger l'hypothèse d'une fuite antérieure à l'accident, inconnues de l'équipage ou volontairement ignorée. L'autre enseignement fut l'incertitude sur la détection des nappes et la difficulté à obtenir chaque jour une vision aussi exhaustive que possible de l'ensemble du terrain de lutte.

Observer avant de prévoir

Lors d'un accident au large, du type *Erika* ou *Prestige*, l'essentiel du travail d'observation repose sur les avions au large (avions spécialisés Polmar des Douanes, avions de la Marine nationale et autres moyens européens) et les hélicoptères devant la côte. Seules les reconnaissances aériennes, effectuées par les avions spécialisés, sont en mesure d'évaluer la dispersion des nappes et leur morcellement. Dans les mois qui ont suivi le naufrage du *Prestige*, jusqu'à 12 avions et hélicoptères ont été mis en œuvre le même jour pour informer et guider les navires engagés dans la lutte en mer. Malheureusement, les conditions météorologiques permettent rarement des vols quotidiens (en général, les accidents ont lieu lors de périodes de mauvais temps durable). Les nappes sont perdues, retrouvées, puis repérées, au fil de leur dérive et de leur désagrégation. Rien n'assure que le polluant détecté un jour correspond au polluant détecté le lendemain ou la veille. Pendant l'épisode du *Prestige*,

Pendant l'épisode du *Prestige*, des améliorations furent apportées au modèle Mothy. L'une d'elles a conduit à cette simulation de dérive, mettant en évidence la formation de deux branches. Alors que les avions suivaient attentivement les nappes par 5° W, ils furent invités à aller voir ce qui se passait le long du 7° méridien, où l'on découvrit d'autres nappes inattendues. Cette carte représente la reconstitution de la dérive du pétrole du *Prestige*, du 19 novembre, jour du naufrage, au 7 janvier. Les traits gris matérialisent les trajectoires suivies par les boulettes en surface et les points leur position finale. La couleur de ces derniers varie du bleu clair au bleu foncé selon la date de leur rejet.

on s'est aperçu que selon l'angle d'incidence de l'éclairage, une nappe pouvait être visible ou invisible. Il suffit également qu'il pleuve pour qu'une couche d'eau douce, moins dense que l'eau de mer, se forme en surface et recouvre la nappe d'hydrocarbure, qui n'en continuera pas moins à dériver à l'abri des regards. Plus subtil encore : lorsque la densité du produit est très voisine de celle de l'eau de mer, il semble que les nappes plongent ou font surface au gré des variations diurnes de la température de la mer. Pour observer la dérive des nappes de fioul, on a également fait appel aux satellites. Mais ces derniers ont peu de chance de bien voir les nappes. Les satellites d'observation en lumière visible, type Spot, ne voient ni la nuit, ni en présence de couverture nuageuse. Les satellites de télédétection dans les bandes de rayonnement infrarouge sont aveugles par temps nuageux. Enfin, les satellites qui peuvent voir la mer jour et nuit, quelles que soient les conditions météo (Radarsat, Envisat), avec leurs radars à synthèse d'ouverture capables de repérer la différence de rugosité de surface de l'eau provoquée par une nappe d'huile, perdent cette capacité quand la mer est trop calme ou trop forte. De plus, les uns et les autres suivant des orbites polaires, ne passent

sur la zone qu'à faible fréquence, jusqu'à une fois tous les dix jours selon le programme d'observation en cours du satellite. Les images exploitables ne sont donc pas fréquentes. De plus, les délais de traitement des images ne permettent pas encore une information en temps réel et l'interprétation de ce qu'elles font apparaître n'est pas évidente. Ainsi, au cours des trois mois qui ont suivi le naufrage du *Prestige*, seules deux images issues des satellites équipés de radar à synthèse d'ouverture furent réellement exploitables. En revanche, les images satellite ont l'avantage de montrer de très grandes surfaces, permettant une confrontation intéressante entre la modélisation et la réalité. L'approche demeure donc une piste à suivre pour le futur. Cette incertitude forte sur les observations se traduit de facto par une incertitude forte sur les conditions initiales imposées au modèle de prévision. Lorsque l'on connaît la sensibilité des modèles de prévision, quels qu'ils soient, aux conditions initiales, on découvre ici la première source d'erreur possible. Elle n'est pas la seule. La prévision de dérive accumule en effet les difficultés de la prévision atmosphérique à celle de la prévision océanique et, enfin, à celle du comportement du polluant.

Nul doute qu'avec un point de départ erroné, l'exercice puisse très vite s'avérer délicat. D'où l'intérêt, entre autres, de l'ingénieur prévisionniste analysant les résultats des différents modèles et donnant son sentiment sur la qualité de la dérive proposée.

En guise de conclusion, citons les propos de Michel Girin, directeur du Cedre.

« L'analyse des accidents maritimes ayant conduit à une pollution montre que les circonstances et les causes sont trop diverses pour qu'il y ait une solution miracle. Qu'il s'agisse d'une solution technique comme la double coque, ou d'une mesure administrative – circulation plus au large, obligation de prévoir des ports refuge dûment équipés – il se trouvera toujours des circonstances nouvelles qui conduiront à l'accident. C'est un peu comme sur la route. Les progrès technologiques permettent certes de réduire les accidents, mais ils conduisent aussi à repousser les limites. On en profite donc pour aller plus vite, charger plus le navire, augmenter la densité du trafic... Les accidents maritimes et leur pollution induite font partie des risques technologiques que l'on ne pourra jamais supprimer totalement et pour lesquels il faut se préparer au mieux. »

Naufrage du *Prestige* Rappel des interventions en surface et au fond

Le mercredi 13 novembre 2002 à 14 h 50, le pétrolier *Prestige*, battant pavillon des Bahamas, transportant 77 000 tonnes de fuel lourd, émet un May Day au large du cap Finisterre (Galice, Espagne). En avarie machine avec une forte gîte, il n'est plus maître de sa manœuvre et dérive au gré des conditions météo-océaniques. L'équipage est hélicopté, à l'exception du capitaine, du second et du chef mécanicien. À 17 h, une observation aérienne dépêchée par les autorités espagnoles met en évidence une fuite de pétrole en mer.

Le fuel transporté est d'une densité relativement élevée, proche de celle de l'eau (0,9753) et d'une forte viscosité initiale. Il montre, par ailleurs, une très faible tendance à l'évaporation et à la dispersion naturelle. De plus, à l'instar du fuel de l'*Erika*, il tend à se mélanger avec l'eau de mer pour former une émulsion extrêmement visqueuse.

Le 13 au soir, les remorqueurs *Ria de Vigo*, *Alonso de Chaves*, *Charuca Silveira* et *Ibaizabal I* de Sasemar (organisme en charge du sauvetage en mer et de la lutte antipollution) se dirigent vers la zone de l'accident. Le système de remorquage d'urgence du navire ne fonctionne pas et les tentatives de prise en remorque échouent au cours de la nuit.

Le 14 au matin, la prise en remorque réussit, évitant l'échouement du pétrolier. Le fuel déversé forme un chapelet de nappes s'étendant sur 20 milles de long. Sasemar sollicite Météo France pour des prévisions de dérive des nappes. Le Biscaye Plan, plan d'intervention franco-espagnol en cas de sinistre en Atlantique, est déclenché à midi. Des moyens nautiques et aériens de la Marine nationale et des Douanes françaises sont immédiatement mis à disposition de Sasemar. L'*Ailette*, remorqueur de haute mer de la Marine nationale équipé de moyens antipollution adaptés à la récupération de pétrole visqueux, apparaît à 20 h et se dirige vers le cap Finisterre. En fin de journée, la gîte est réduite mais le bateau continue à fuir.

Le 15 novembre au matin, le pétrolier a été remorqué à 60 nautiques des côtes espagnoles. Le convoi fait route vers le sud à deux nœuds. Le *Prestige* a une déchirure de 35 mètres de long sur son flanc droit. La société Smit Salvage, pressentie par l'armateur pour son sauvetage, est sur place.

L'observation aérienne met en évidence un chapelet de nappes de quelques mètres à deux milles de long, échappées du navire la nuit du 13 au 14.

Le 16 novembre au matin, le pétrolier est à 50 nautiques du cap Toriñana. Le convoi fait route vers le sud à 1,5 nœuds. La déchirure observée la veille mesure désormais 53 mètres.

Les premiers arrivages de pétrole à la côte sont observés dans la matinée en divers endroits, entre la Corogne et le cap Finisterre.

Le 17 novembre au matin, le convoi se trouve à environ 75 milles marins à l'ouest du cap Finisterre. Les reconnaissances aériennes indiquent la présence d'un chapelet de nappes qui coïncide avec la route suivie.

Le 19 novembre à 8 h 50, le navire se casse en deux par 42° 15' N et 12° 08' W, à 130 nautiques des côtes dans l'ouest-sud-ouest du cap Finisterre.

Extraits du site internet du Cedre : www.le-cedre.fr//fr/prestige/sauvetage.htm



Fuite de la partie avant, sur le pont du *Prestige*.

Interventions du *Nautilus*

Le 27 novembre, à la demande des autorités espagnoles, l'Ifremer interrompt la mission en cours en Méditerranée pour dépêcher sur place l'*Atalante* et le sous-marin d'observation *Nautilus*. Météo-France met en place une assistance pointue pour le *Nautilus* qui se prépare à de délicates opérations.

Grâce aux sondeurs de l'*Atalante* et au sonar du *Nautilus*, la partie avant de l'épave est immédiatement retrouvée par 3 830 mètres de fond. Puis la partie arrière est localisée par 3 565 mètres de fond, sur la pente d'un relief accidenté, à environ 3,5 kilomètres.

Le *Robin*, petit robot piloté par l'équipage du *Nautilus*, est utilisé pour des observations rapprochées et à l'intérieur de l'épave. Équipé de projecteurs et de caméras, relié au *Nautilus* par un câble de 60 mètres, il permet d'accéder dans des zones inaccessibles au *Nautilus*, notamment pour des raisons de sécurité (pont, zones encombrées d'objets comme les élingues, compartiments de ballastage, intérieur des cuves...).

Du 2 au 15 décembre, 10 plongées sont effectuées, totalisant environ 40 heures de travail sur le fond et l'une des 14 fuites répertoriées est obturée à titre expérimental.

La deuxième phase de l'intervention, dont la mission est de colmater au mieux les fuites, se déroule du 19 décembre au 14 février. Malgré deux semaines d'interruption des opérations pour cause de mauvaises conditions météorologiques, 26 plongées sont réalisées, totalisant plus de 100 heures de travail sur le fond. Les 20 fuites finalement répertoriées sont colmatées, réduisant les pertes de fuel de 125 tonnes par jour à environ deux tonnes par jour³.

Compte tenu des faibles courants à cette profondeur, de la diminution de la fluidité du fioul avec son refroidissement progressif, de la pression à l'équilibre entre les cuves et leur environnement et de la lenteur de la corrosion, ces dispositifs devraient être efficaces durant plusieurs mois, voire plusieurs années, dans l'attente d'un traitement industriel définitif de l'épave.

Par ailleurs, le *Nautilus* a effectué un certain nombre de relevés complémentaires qui seront utiles dans le cadre des opérations de neutralisation ultérieure.

Extraits du site internet de l'Ifremer : <http://www.ifremer.fr/envlit/prestige/nautilus.htm>



À l'intérieur du *Nautilus*, check-list avant la plongée et communication avec le bord.

Fixation de l'aussière de relevage sur le *Nautilus*.



3. À la demande des autorités espagnoles, le *Nautilus* a effectué une nouvelle mission de contrôle de l'état de l'épave du Prestige, du 25 mai au 4 juin. Aucune dégradation nouvelle ni fuite supplémentaire n'ont été observées. Au contraire, il a été constaté une réduction des fuites résiduelles, évaluées à 700 kg par jour pour l'ensemble de l'épave.