



Introduction

Les déversements d'hydrocarbures peuvent avoir des répercussions sérieuses sur l'environnement marin, tant par engluement physique que par toxicité. La sévérité de l'impact dépend généralement de la quantité et du type d'hydrocarbure déversé, des conditions ambiantes, ainsi que de la sensibilité aux hydrocarbures des organismes touchés et de leurs habitats.

Ce document décrit les effets des déversements d'hydrocarbures en mer, mais aussi des activités de nettoyage qui en résultent, sur la flore, la faune et les habitats marins. Une attention particulière est portée aux interactions complexes entre hydrocarbures et systèmes biologiques, qui ont fait l'objet d'études diverses au fil des ans. D'autres Guides d'Informations Techniques sont plus spécifiquement consacrés aux effets des hydrocarbures sur les pêches et la mariculture, et sur les activités humaines en général.

Généralités

Les déversements d'hydrocarbures peuvent avoir des impacts très divers sur l'environnement marin. Souvent qualifiées par les médias de « catastrophes écologiques », les marées noires sont présentées comme responsables de conséquences terribles pour la survie de la faune et de la flore marines. En cas d'accident majeur, l'impact environnemental à court terme peut être grave et frapper sérieusement les écosystèmes et les populations qui vivent à proximité du littoral contaminé, du point de vue tant de leurs moyens de subsistance que de leur qualité de vie (Figure 1). Les images d'oiseaux mazoutés à la suite d'un déversement viennent alimenter l'idée de dégâts écologiques considérables et irréversibles, accompagnés d'une perte inévitable de ressources marines. Étant donné la réaction très tendue et chargée d'émotion généralement suscitée par les marées noires, une bonne visibilité des réalités des effets du déversement et des perspectives de rétablissement est parfois difficile à obtenir.

Les impacts des déversements ont été étudiés et documentés dans la littérature scientifique et technique sur plusieurs décennies. Ainsi, les effets de la pollution par les hydrocarbures sont suffisamment bien compris pour fournir des indications générales de l'échelle et de la durée des dommages infligés par un accident donné. Une évaluation scientifique des effets typiques des déversements d'hydrocarbures révèle que si les dommages sont parfois profonds à l'échelle des organismes individuels, les populations sont plus résilientes. Avec le temps, les processus naturels de rétablissement sont capables de réparer les dégâts et de restaurer les fonctions normales du système. Ces processus peuvent être assistés par la récupération des hydrocarbures dans le cadre d'opérations de nettoyage efficaces, voire accélérés par des mesures de rétablissement gérées avec soin. Si des dommages à long terme ont été enregistrés dans quelques rares cas, les habitats et la vie marine touchés ont généralement tendance à se rétablir en quelques saisons, même après les plus grandes marées noires.

Mécanismes d'impact sur l'environnement des déversements d'hydrocarbures

Les mécanismes d'impact sur l'environnement qui interviennent en cas de déversement d'hydrocarbures sont les suivants :



▲ Figure 1: Hydrocarbure échoué sur le littoral à côté d'un village de pêcheurs.

- l'engluement physique avec impact sur les fonctions physiologiques ;
- la toxicité chimique avec effets létaux ou sublétaux ou détérioration des fonctions cellulaires ;
- les altérations écologiques, principalement la perte d'organismes clés d'une communauté et la prolifération d'espèces opportunistes au sein des habitats affectés ;
- les effets indirects, tels que la perte d'habitat ou d'abri entraînant l'élimination d'espèces d'importance écologique.

La nature et la durée des effets d'un déversement d'hydrocarbure dépendent de facteurs très divers. Parmi eux : la quantité et le type d'hydrocarbure déversé ; son comportement dans l'environnement marin ; les conditions ambiantes et les caractéristiques physiques du site du déversement ; et la période à laquelle il se produit, eu égard en particulier à la saison et aux conditions météorologiques qui prévalent. D'autres facteurs cruciaux sont la composition biologique de l'environnement affecté, l'importance écologique des espèces et leur sensibilité à la pollution par les hydrocarbures. La sélection de techniques de nettoyage appropriées et l'efficacité avec laquelle les opérations de dépollution sont menées peuvent également avoir une influence significative sur les effets d'un déversement.

Les effets potentiels d'un déversement dépendent en outre de la vitesse à laquelle le polluant est dilué ou dissipé par les processus naturels. En plus d'influer sur l'étendue géographique de la zone touchée, celle-ci détermine si les ressources environnementales sensibles sont exposées à de fortes concentrations d'hydrocarbure



▲ Figure 2 : Les effets typiques sur les organismes marins varient de la toxicité (particulièrement pour les hydrocarbures et les produits pétroliers légers) à l'engluement (fiouls intermédiaires et lourds (IFO et HFO) et résidus vieillis).

ou de composants toxiques, sur une durée significative. Le degré de sensibilité ou de vulnérabilité des organismes à la pollution par les hydrocarbures est du même ordre d'importance. Les organismes vulnérables sont ceux qui, parce qu'ils évoluent généralement à la surface ou au bord de l'eau, sont plus susceptibles d'entrer en contact avec le polluant. Les organismes sensibles sont ceux qui seraient extrêmement affectés par une exposition à l'hydrocarbure ou à ses composants chimiques. Les organismes moins sensibles supporteront probablement une exposition à court terme. Plusieurs pays ont cartographié leurs littoraux et attribué des indices de sensibilité aux différents habitats. Par exemple, les cartes ou les atlas de sensibilité accordent un indice élevé aux mangroves ou aux marais maritimes mais un indice généralement faible aux plages de sable.

Les caractéristiques de l'hydrocarbure déversé jouent un rôle important dans la détermination de l'étendue des dommages (Figure 2). Un déversement d'une grande quantité d'hydrocarbure persistant, tel que du fioul lourd (HFO), peut causer des dommages considérables dans les zones intertidales des littoraux, par engluement. Des effets toxiques sont moins probables dans le cas d'un HFO ou d'un hydrocarbure très visqueux peu soluble dans l'eau en raison de la faible disponibilité biologique de leurs composants chimiques. Les hydrocarbures incorporés dans les « revêtements d'asphalte » (mélange aggloméré d'hydrocarbure très vieilli et de galets) sont eux aussi moins biodisponibles, indépendamment de la durée de leur présence sur le littoral. Des dommages indirects sont toutefois possibles en raison de l'altération des habitats.

Les composants chimiques du kérosène ou d'autres hydrocarbures légers, plus biodisponibles, sont quant à eux plus susceptibles d'entraîner des dommages par toxicité. Cependant, grâce à la dissipation rapide par évaporation et dispersion, les hydrocarbures légers peuvent être moins nuisibles dans l'ensemble, à condition que les ressources sensibles soient suffisamment éloignées du site du déversement. En revanche, des effets plus graves et plus durables peuvent être observés dans les situations où la dilution est ralentie, par exemple lorsque le polluant est piégé dans des sédiments vaseux ou des zones confinées, notamment les lagons peu profonds avec faible échange d'eau. À des niveaux d'exposition inférieurs aux niveaux mortels, la présence de composants toxiques peut donner lieu à des effets subtils, tels que des troubles de l'alimentation ou de la reproduction.

L'environnement marin est extrêmement complexe et les fluctuations naturelles de la composition, de l'abondance et de la répartition des espèces dans le temps et dans l'espace sont une caractéristique fondamentale de son fonctionnement normal. Au

sein de cet environnement, les animaux et les végétaux marins manifestent des degrés variés de résistance naturelle à l'altération de leurs habitats. L'adaptation naturelle des organismes au stress environnemental, ainsi que leurs stratégies reproductives, sont des mécanismes importants qui entrent en jeu pour supporter les fluctuations quotidiennes et saisonnières des conditions ambiantes. C'est cette résilience innée qui permet à certains végétaux et animaux de supporter un certain niveau de contamination par les hydrocarbures. Les déversements ne constituent néanmoins pas la seule pression anthropogénique exercée sur les habitats marins. La surexploitation généralisée des ressources naturelles et la pollution urbaine et industrielle chronique contribuent elles aussi considérablement au degré de variabilité constaté au sein des écosystèmes marins. Sur fond de forte variabilité naturelle, les dommages plus subtils infligés par un déversement d'hydrocarbures, tels que la baisse du succès reproducteur, de la productivité ou de la biodiversité, peuvent être difficiles à détecter.

Rétablissement de l'environnement marin

La capacité de l'environnement marin à se rétablir à la suite de graves perturbations est fonction de sa complexité et de sa résilience. Le rétablissement suite à des phénomènes extrêmement destructeurs, tels que les ouragans et les tsunamis, démontre que les écosystèmes sont capables de se reconstituer avec le temps, même après de graves perturbations accompagnées de mortalités importantes. Si la définition de rétablissement et du point auquel un écosystème peut être considéré comme rétabli est largement débattue, le fait que la variabilité naturelle des écosystèmes rend un retour identique aux conditions initiales peu probable est généralement accepté. La plupart des définitions du rétablissement tendent plutôt à être centrées sur la notion de reconstruction d'une communauté végétale ou animale caractéristique de l'habitat et fonctionnant normalement en termes de biodiversité et de productivité.

Ce principe peut être illustré par le cas des opérations de nettoyage inappropriées à la suite du naufrage du pétrolier *Torrey Canyon* au large de l'Angleterre en 1967, au cours desquelles l'emploi d'agents nettoyants toxiques sur des littoraux rocheux a causé des dommages considérables. Bien que la répartition précise d'espèces particulières présentes ait été altérée et que les effets du sinistre aient été ressentis pendant plus de deux décennies, le fonctionnement général, la biodiversité et la productivité de l'écosystème ont été rétablis en un à deux ans. Selon la définition proposée ci-dessus, il est possible de dire que la communauté du

littoral rocheux s'est rétablie au cours de cette période de deux ans. Les limites de cette définition se sont néanmoins clairement manifestées dans la répartition par classes d'âge des organismes. Au lieu de l'éventail complet des âges antérieur à l'accident, des juvéniles aux organismes adultes, les végétaux et les animaux nouvellement recrutés appartenaient à une tranche d'âge étroite, résultant en une communauté initialement moins robuste.

De même, si une mangrove est endommagée, que ce soit sous l'effet d'un déversement, d'une tempête tropicale ou de tout autre phénomène naturel, la zone touchée sera recolonisée, avec le temps, par des plantes juvéniles issues de zones adjacentes. Or, ces végétaux de remplacement seront tous plus ou moins du même âge et n'assureront pas l'éventail complet de services environnementaux tant que les arbres n'auront pas atteint leur maturité. Ces constats mènent à opérer une distinction entre effets et dommages : dans certains cas, des effets moindres (en termes de fonctionnement normal d'un écosystème) peuvent encore être détectés après le rétablissement d'un écosystème suite à une pollution.

Les mécanismes de rétablissement ont évolué en fonction des pressions exercées par la prédation et les autres causes de mortalité. Par exemple, l'une des stratégies reproductives les plus importantes chez les organismes marins est la ponte massive synchronisée : de très grands nombres d'œufs et de larves sont libérés dans le plancton puis distribués par les courants. Dans la plupart des cas, seuls quelques individus sur un million survivent jusqu'à l'âge adulte. Cette forte fécondité donne lieu à une surproduction de juvéniles, c'est-à-dire un réservoir considérable non seulement pour la colonisation de nouvelles zones et le recrutement dans les zones affectées par un déversement, mais aussi pour compenser la mortalité naturelle au sein des populations. En revanche, les espèces longévives qui n'atteignent leur maturité sexuelle qu'à un âge avancé, et qui ne se reproduisent que peu, sont susceptibles de mettre plus longtemps à se rétablir après les effets d'une pollution.

Dans la plupart des cas, le rétablissement se fait sur quelques cycles saisonniers ; une à trois années suffisent pour la grande majorité des habitats, à l'exception des mangroves (voir le tableau 1 ci-dessous).

Les environnements marins

Les sections suivantes s'intéressent aux différents types de dommages dus aux hydrocarbures déversés par des navires dans divers environnements.

Pleine mer et eaux littorales

La plupart des hydrocarbures flottent à la surface de la mer et

Habitat	Période de rétablissement
Plancton	Semaines/mois
Plages de sable	1 – 2 ans
Côtes rocheuses exposées	1 – 3 ans
Côtes rocheuses abritées	1 – 5 ans
Marais maritimes	3 – 5 ans
Mangroves	10 ans et plus

▲ *Tableau 1 : Temps indicatif de rétablissement suite à une pollution par les hydrocarbures, pour divers habitats. Le temps dépend de nombreux facteurs, dont la quantité et le type d'hydrocarbures déversés. Le rétablissement est défini ici comme la phase à laquelle l'habitat fonctionne normalement.*

sont étalés sur de vastes surfaces par les vagues, le vent et les courants. Certains hydrocarbures à faible viscosité peuvent se disperser naturellement dans les quelques mètres supérieurs de la colonne d'eau, notamment en présence de vagues déferlantes. Ils sont alors rapidement dilués. Si le rejet est continu dans le temps, des concentrations d'hydrocarbure dispersé dans les couches supérieures de la colonne d'eau risquent d'être observées à proximité du point de rejet. L'impact de l'hydrocarbure déversé sur les espèces qui se trouvent plus profondément dans la colonne d'eau ou sur le fond marin reste néanmoins faible, à moins que les dommages ne soient causés par des épaves coulées, des déversements d'hydrocarbures très lourds (ou à faible degré API)* ou des résidus goudronneux d'incendies d'hydrocarbures.

Plancton

Les zones pélagiques des mers et des océans font vivre une myriade d'organismes planctoniques simples, dont des bactéries, des végétaux (le phytoplancton) et des animaux (le zooplancton). Les œufs et les larves de poissons et d'invertébrés en font partie, y compris ceux qui vivront ensuite sur le fond marin ou le littoral. Le plancton subit naturellement des niveaux extrêmement élevés de mortalité, dus principalement à la prédation mais aussi à l'altération des conditions environnementales et au transport physique vers des régions où la survie est impossible. En revanche, des conditions particulièrement favorables, avec abondance de nutriments, peuvent donner lieu à des proliférations planctoniques spectaculaires, notamment au printemps dans les climats tempérés. Lorsque l'approvisionnement en nutriments s'affaiblit ou que les organismes sont consommés, les populations s'effondrent et les organismes morts se biodégradent et tombent sur le fond marin. L'écosystème a évolué en fonction de ces extrêmes, veillant à une production massive dans des temps de génération courts. Par conséquent, la répartition du plancton est souvent extrêmement hétérogène, tant dans l'espace que dans le temps, le classant ainsi parmi les communautés marines les plus variables.

La sensibilité des organismes planctoniques à l'exposition aux hydrocarbures est bien établie et des impacts considérables paraissent possibles. Cependant, la surproduction généralement massive d'organismes aux premiers stades du cycle de vie génère un effet tampon pour le recrutement à partir des zones voisines non affectées par le déversement. Les pertes d'œufs et de larves étant ainsi compensées, des déclin des populations adultes à la suite de déversements n'ont pas été observés.

Poissons

En dépit de la sensibilité des poissons aux stades juvéniles à des concentrations relativement faibles d'hydrocarbures dans la colonne d'eau, les poissons adultes sont plus résilients. Des effets sur les stocks pélagiques n'ont que rarement été détectés. Il semble que les poissons pélagiques évitent activement les hydrocarbures. Si un appauvrissement de la cohorte de l'année d'une espèce particulière a été enregistré dans des circonstances exceptionnelles, les mortalités en masse sont rares. Les mortalités constatées ont été associées à de très fortes concentrations localisées d'hydrocarbure dispersé dans la colonne d'eau par conditions de tempête, au rejet de quantités importantes d'hydrocarbures légers dans la zone de déferlement le long d'un littoral, ou à des déversements survenus sur des fleuves. L'impact des déversements d'hydrocarbures sur les stocks de poissons exploités et les produits marins cultivés est traité plus en détail dans le Guide d'Informations Techniques de l'ITOPF : *Effets de la pollution par les hydrocarbures sur les pêches et la mariculture.*

* Masse volumique de l'American Petroleum Institute



▲ Figure 3 : Parcage de manchots du Cap (*Spheniscus demersus*) mazoutés.



▲ Figure 4 : Le nettoyage est plus bénéfique aux manchots qu'aux autres espèces d'oiseaux. Ici, des gorfous sauteurs (*Eudyptes moseleyi*) sont réhabilités.

Oiseaux marins

Les oiseaux marins sont les animaux les plus vulnérables en pleine mer, pouvant périr en grands nombres lors d'accidents majeurs. Les canards marins (macreuses, eiders), alcidés (guillemots, pingouins) et autres espèces qui évoluent en bandes à la surface de la mer sont particulièrement menacés. Cependant, une forte mortalité parmi des populations d'oiseaux marins peut également être due à des causes indépendantes, telles que des tempêtes ou la perte de ressources alimentaires ou d'habitat. Des autopsies peuvent éventuellement être nécessaires pour établir la cause de la mort et déterminer si elle peut être attribuée à un accident particulier.

La souillure du plumage est l'effet le plus évident de la pollution par les hydrocarbures sur les oiseaux. Le plumage sert à retenir l'air chaud contre la peau, assurant à la fois flottaison et isolation. Lorsqu'elle est enduite d'hydrocarbure, la couche protectrice de plumes et de duvet isolant est déstructurée, laissant entrer l'eau de mer en contact direct avec la peau. La perte de chaleur qui en résulte peut entraîner la mort de l'oiseau par hypothermie. Dans les climats froids, une petite tache d'hydrocarbure sur le plumage d'un oiseau peut suffire à causer sa mort. De nombreuses espèces possèdent une couche de graisse sous la peau, qui sert à la fois de couche isolante supplémentaire et de réserve d'énergie. Cette réserve peut être rapidement consommée par les efforts de l'oiseau pour se protéger du froid. Un oiseau qui souffre de froid, d'épuisement et d'une perte de flottaison peut se noyer. Par ailleurs, le plumage mazouté réduit la capacité de l'oiseau à s'envoler en quête de nourriture ou pour échapper à ses prédateurs.

Un oiseau mazouté se lisse instinctivement les plumes, risquant ainsi d'étaler le polluant sur des parties de son corps non souillées. L'ingestion du polluant est fort probable et peut avoir des effets graves, comme la congestion pulmonaire, l'hémorragie intestinale ou pulmonaire, la pneumonie et des lésions du foie et des reins. De retour au nid, l'hydrocarbure peut être transféré du plumage de l'oiseau à celui de ses poussins ou aux œufs qu'il couve. La contamination des œufs par un hydrocarbure peut réduire l'épaisseur de la coquille, empêcher l'éclosion et causer des anomalies du développement de l'oisillon.

Il n'existe pas de lien clair entre la quantité d'hydrocarbure déversée et l'impact probable sur les oiseaux marins. Un déversement de faible ampleur pendant la saison de reproduction, ou dans des zones de rassemblement d'importantes populations d'oiseaux marins, peut s'avérer beaucoup plus dommageable qu'un plus

grand déversement à une autre période de l'année ou dans un autre environnement. Certaines espèces réagissent à la réduction de l'effectif des colonies en pondant davantage d'œufs, en se reproduisant plus fréquemment ou par un mécanisme de recrutement des juvéniles plus précoce dans le groupe reproducteur. Ces processus peuvent faciliter le rétablissement mais celui-ci peut prendre plusieurs années et dépend également de la disponibilité de nourriture et d'habitat ainsi que d'autres facteurs. Bien que le constat de pertes à court et moyen terme n'ait rien d'inhabituel, les mécanismes de rétablissement ci-dessus peuvent réussir à prévenir les impacts à long terme à l'échelle d'une population. Cependant, dans certaines circonstances, un déversement d'hydrocarbures risque de faire basculer une colonie marginale dans une situation de déclin permanent.

Le nettoyage et la réhabilitation des oiseaux mazoutés peuvent être tentés mais, dans le cas de nombreuses espèces, seul un petit nombre des oiseaux traités réussit généralement à survivre au nettoyage. Une proportion encore plus faible des oiseaux nettoyés libérés survit dans la nature et réussit à se reproduire. Les manchots font souvent exception et sont généralement plus résilients que de nombreuses autres espèces. À condition d'être correctement manipulés, la plupart survivront probablement au nettoyage et rejoindront des colonies reproductrices (Figures 3 et 4). Même chez les manchots, on a constaté que le succès reproducteur des oiseaux nettoyés est inférieur à celui des oiseaux qui ont échappé à la pollution. Néanmoins, le développement et la dissémination des bonnes pratiques en matière de nettoyage des oiseaux contribuent à l'amélioration des résultats.

Mammifères et reptiles marins

Les baleines, les dauphins et autres cétacés peuvent être menacés par les hydrocarbures flottants lorsqu'ils viennent à la surface pour respirer ou lorsqu'ils sautent hors de l'eau. Des lésions des tissus nasaux et des yeux causées par les hydrocarbures ont été postulées. Cependant, lorsque des mortalités ont été enregistrées, les nécropsies ont généralement conclu que la mort était due à des causes autres que la pollution par les hydrocarbures. Alors que l'on pourrait croire les grands mammifères marins tropicaux – tels que les siréniens herbivores (lamantins et dugongs) – vulnérables, les cas signalés de dommages dus à la pollution par les hydrocarbures chez ces animaux sont très rares. Les phoques, les loutres et autres mammifères marins qui sortent de l'eau ou passent un certain temps à terre sont cependant plus susceptibles de rencontrer des hydrocarbures et de souffrir de leurs effets. Les espèces qui



▲ *Figure 5 : Les hydrocarbures peuvent avoir des effets délétères sur l'aptitude des animaux, tels que cette jeune otarie (Arctocephalus australis), à maintenir leurs fonctions physiologiques vitales.*

dépendent de leur pelage pour réguler leur température corporelle sont les plus menacées par les hydrocarbures. En effet, les animaux peuvent mourir d'hypothermie ou d'hyperthermie, selon la saison, si leur pelage est mêlé d'hydrocarbures (*Figure 5*).

Les hydrocarbures flottants peuvent être une menace pour les reptiles marins, tels que les tortues, les iguanes marins et les serpents de mer. Les tortues sont plus particulièrement vulnérables pendant la saison de ponte. Il peut y avoir perte d'œufs et de juvéniles si l'hydrocarbure s'échoue sur les plages de sable ou si les nids sont perturbés pendant les opérations de nettoyage. Les adultes peuvent subir une inflammation de la membrane muqueuse, qui accroît leur prédisposition aux infections. Les cas de tortues mazoutées nettoyées et relâchées en mer sont cependant nombreux (*Figure 6*). Toutes les espèces de tortue de mer sont menacées par les activités humaines, principalement en raison des prises accidentelles pendant la pêche, d'un ciblage délibéré pour leur chair et leur carapace, et de la perte d'habitat.

Eaux intérieures peu profondes

Dans les eaux peu profondes, les dommages sont le plus souvent causés par les hydrocarbures brassés dans la colonne d'eau sous l'effet puissant des vagues ou par un usage inapproprié de dispersants trop près du rivage. Dans de nombreuses circonstances, la capacité de dilution, par exemple due au renouvellement de l'eau par les marées, suffit à maintenir les concentrations d'hydrocarbure dans l'eau au-dessous des seuils de toxicité/nocivité. En revanche, lorsque des produits raffinés légers ou des pétroles bruts légers sont dispersés dans les eaux peu profondes, donnant lieu à de fortes concentrations des composants toxiques de l'hydrocarbure, une mortalité des espèces animales qui vivent sur le fond marin (benthiques) et de celles qui vivent dans le sédiment a été constatée.

Phanérogames marines

Différentes espèces de phanérogames marines vivent dans les eaux tempérées et tropicales. Elles permettent la survie d'un écosystème très divers et productif en abritant de nombreux autres organismes. Les herbiers ralentissent les courants marins, ce qui accroît la sédimentation, tandis que les structures racinaires stabilisent le fond marin, ce qui protège les zones côtières de l'érosion. Un hydrocarbure flottant est très susceptible de passer au-dessus des herbiers sans effets nocifs. Cependant, si l'hydrocarbure ou ses composants toxiques sont brassés dans ces eaux côtières peu profondes et atteignent des concentrations suffisamment



▲ *Figure 6 : Tortue imbriquée (Eretmochelys imbricata) juvénile en train d'être nettoyée.*

élevées, l'herbier et les organismes associés risquent d'en subir les effets délétères. Les opérations de nettoyage dans le voisinage d'herbiers de phanérogames marines doivent être entreprises avec soin car les plantes peuvent être déchiquetées ou arrachées par les hélices des navires et les ancres des barrages.

Coraux

Les récifs coralliens fournissent un écosystème extrêmement riche et divers, sont très productifs et protègent les littoraux exposés. Les coraux sont des organismes très sensibles, qui peuvent mettre très longtemps à se rétablir d'une pollution. Les hydrocarbures dispersés présentent le plus grand risque d'impact sur les récifs coralliens, plus particulièrement lorsqu'une turbulence accrue due aux vagues déferlantes favorise la dispersion naturelle de l'hydrocarbure déversé et lorsque des dispersants sont employés. Les communautés qui vivent dans cet habitat sont elles aussi sensibles aux hydrocarbures, d'où la nécessité de ne pas utiliser de dispersants dans le voisinage de récifs coralliens. Dans quelques cas rares, des récifs coralliens peuvent émerger lors des marées de vives-eaux, risquant alors d'être englués par les hydrocarbures flottants.

Les échouements de navires sont plus dommageables pour les récifs coralliens que la pollution par les hydrocarbures. D'autres impacts anthropogéniques peuvent également nuire aux coraux, notamment la surpêche ou les pratiques de pêche destructrices, la pollution par les sels nutritifs et la sédimentation accrue due à la déforestation et aux projets de construction côtière.

Littoraux

Les littoraux sont plus exposés aux effets des hydrocarbures que toute autre partie de l'environnement marin. Cependant, la grande majorité des espèces de faune et de flore présentes sur le rivage sont naturellement résilientes et capables de tolérer le cycle des marées ainsi que l'exposition périodique à des vagues violentes, des vents desséchants, des extrêmes de température, des variations de salinité en fonction de la pluviosité et autres agressions sévères. Cette tolérance permet également à de nombreux organismes qui vivent sur le littoral de supporter les effets d'une pollution et de se rétablir.

Littoraux rocheux et sableux

En raison de leur exposition aux effets décapants de l'action des vagues et des courants de marée, les littoraux rocheux et sableux sont les plus résistants aux conséquences d'un déversement

(Figure 7). Par ailleurs, ce décapage permet généralement à un auto-nettoyage naturel et rapide de se produire. Dans les climats tempérés, l'impact sur les littoraux rocheux se traduit souvent, par exemple, par une disparition temporaire de la patelle commune (*Patella vulgata*), une espèce dite « clé de voûte » de gastéropode marin. On appelle clé de voûte les espèces végétales ou animales qui exercent une influence déterminante sur l'écosystème, disproportionnée par rapport à leur biomasse, et dont le retrait est susceptible d'entraîner une modification radicale de cet écosystème. Les patelles qui broutent les micro-algues à la surface des rochers limitent la croissance algale et le développement d'autre faune. Ainsi, leur perte entraîne généralement une croissance rapide d'algues vertes opportunistes (encadré de la Figure 7). Avec le temps, cette croissance algale est remplacée par d'autres espèces d'algues et, au fur et à mesure que de l'espace se libère pour permettre aux patelles de recoloniser la surface rocheuse, l'équilibre écologique est graduellement rétabli. Sur les littoraux tropicaux et subtropicaux sableux, les crabes fantômes (*Ocypode* sp.) occupent une niche écologique analogue à celle des patelles, et des taux de mortalité élevés sont courants en cas de pollution des littoraux par les hydrocarbures. En dépit de cela, les crabes recolonisent souvent les plages en nombres plus ou moins égaux, quelques semaines seulement après que les littoraux sont redevenus propres.

Littoraux sédimentaires meubles

Les sables fins et la vase se trouvent dans les zones abritées des vagues, y compris les estuaires, et tendent à être biologiquement très productifs (Figure 8). Ils subviennent aux besoins d'importantes populations d'oiseaux migrateurs et d'invertébrés vivant dans le sédiment, dont les bivalves, et constituent également des zones de nourricerie pour certaines espèces.

Les impacts de la pollution ne sont pas aussi facilement ressentis sur les sédiments fins que sur d'autres substrats, mais les

hydrocarbures peuvent toutefois être incorporés par floculation avec le sédiment mis en suspension par les tempêtes, ou par pénétration dans les galeries de vers et le long des tiges de végétaux. Les polluants qui réussissent à pénétrer dans les sédiments fins peuvent persister pendant de nombreuses années, accroissant ainsi la probabilité d'effets au long terme.

Marais maritimes

La frange supérieure des littoraux sédimentaires meubles est souvent dominée par une végétation palustre composée de plantes ligneuses vivaces, de plantes grasses annuelles et de graminées. Les marais maritimes sont généralement associés aux climats tempérés mais se retrouvent dans le monde entier, des régions subpolaires aux tropiques. Sur les littoraux tropicaux, ils sont souvent associés aux mangroves, occupant les zones intertidales supérieures et inférieures respectivement. Leur composition spécifique est déterminée en grande mesure par le gradient de salinité. Par exemple, dans les eaux à faible salinité ou saumâtres en amont des estuaires, la végétation palustre fait place à des roselières. Les détritux végétaux entraînés loin des marais contribuent également aux réseaux trophiques des estuaires et des eaux littorales. De nombreux marais maritimes se sont vu attribuer un statut spécial de préservation au titre de la Convention Ramsar relative aux zones humides d'importance internationale, en raison de leur importance en tant qu'habitats pour les oiseaux et plus particulièrement les espèces migratoires.

L'impact d'un déversement d'hydrocarbures sur les marais maritimes dépend de la période de l'année à laquelle il se produit par rapport aux périodes de croissance des végétaux. Les marais des régions tempérées ou froides sont en repos pendant les mois d'hiver, tandis qu'en Méditerranée, la croissance est lente pendant les hautes températures estivales. Un seul événement est peu susceptible de causer plus que des effets temporaires, mais des dommages au plus long terme, éventuellement sur



▲ Figure 7 : Les littoraux rocheux, souvent exposés au vent et aux vagues, peuvent parfois s'auto-nettoyer rapidement. Les organismes, y compris les patelles, peuvent être affectés par les hydrocarbures. Une mortalité importante peut favoriser l'abondance de flore opportuniste (algues et varech) qui serait autrement contrôlée par le broutage. Avec le temps, les espèces se rétablissent et l'équilibre est retrouvé.



▲ *Figure 8 : Les sédiments meubles souvent présents le long des littoraux abrités, moins dynamiques, sont généralement biologiquement très productifs. Laisser un marais pollué par les hydrocarbures se nettoyer naturellement devrait être une option envisagée car les opérations de nettoyage risquent d'aggraver les dommages. Les hydrocarbures qui pénètrent dans le substrat, comme sur la coupe donnée en illustration, peuvent subsister pendant plusieurs années.*

plusieurs années, peuvent être infligés par une pollution par les hydrocarbures répétée, chronique, ou par une activité de nettoyage agressive, avec piétinement, utilisation d'engins lourds ou collecte du substrat contaminé. Parce qu'il est difficile de nettoyer un marais maritime sans risquer d'infliger davantage de dégâts, il est souvent recommandé de confier le nettoyage aux processus naturels. Cependant, si la combustion ou la coupe de la végétation sont envisagées, il est préférable d'attendre que la végétation ait déperé. En règle générale, tant que les racines ou les bulbes des plantes ne sont pas très pollués ou excessivement écrasés pendant le nettoyage, la repousse saisonnière devrait se produire.

Mangroves

Les mangroves sont des forêts amphibies denses constituées d'arbres et d'arbustes halophiles, les palétuviers, qui poussent aux marges des eaux tropicales et subtropicales abritées. Les mangroves fournissent un habitat précieux pour les crabes, les huîtres et autres invertébrés ainsi que d'importantes frayères et nourriceries pour les poissons et les crevettes. En outre, la structure complexe des racines piège et stabilise le sédiment, réduisant ainsi l'érosion des littoraux tout en minimisant le dépôt de sédiments terrestres sur les herbiers et récifs coralliens voisins.

Leur emplacement rend les palétuviers très vulnérables aux marées noires. Ils sont également considérés comme extrêmement sensibles à la contamination par les hydrocarbures, en fonction, dans une grande mesure, du substrat sur lequel ils poussent. Les palétuviers poussent généralement sur des sédiments anaérobies vaseux denses et dépendent de l'apport d'oxygène par les petits pores de leurs racines aériennes, appelés lenticelles (Figure 9). Le recouvrement des systèmes racinaires aériens par des hydrocarbures peut bloquer l'arrivée d'oxygène et causer la mort des palétuviers. Cependant, dans les sédiments aérés ouverts, qui permettent un échange d'eau relativement libre, les

systèmes de racines tirent l'oxygène de l'eau de mer et tolèrent donc davantage l'engluement par les hydrocarbures. Dans ce second mécanisme, les composants toxiques des hydrocarbures, notamment des produits raffinés légers, perturbent les systèmes de maintien de la salinité des végétaux, affectant ainsi leur tolérance à l'eau salée. L'expérience indique que la mortalité des palétuviers due à l'engluement par des hydrocarbures lourds paraît moins probable que la mortalité due à la couverture par des produits plus légers, y compris certains agents nettoyants, qui peuvent induire une perte localisée de la couverture arborée.

Les organismes qui vivent dans l'écosystème des mangroves peuvent subir à la fois les effets directs de l'hydrocarbure et, à plus long terme, la perte de leur habitat. Si le rétablissement naturel de l'écosystème complexe des mangroves peut demander beaucoup de temps, diverses mesures de réhabilitation offrent un réel potentiel d'accélération.

Dommages à long terme

Une opération de nettoyage efficace implique normalement de collecter les accumulations d'hydrocarbure, de réduire l'étendue géographique et la durée des dommages dus à la pollution et de permettre au rétablissement naturel de commencer. Cependant, les méthodes de nettoyage agressives peuvent causer des dégâts supplémentaires et les processus de nettoyage naturels sont parfois préférables. Dans le temps, plusieurs facteurs réduisent la toxicité des hydrocarbures, de telle sorte que le substrat contaminé peut permettre de nouvelles pousses (Figure 10). Par exemple, les hydrocarbures peuvent être entraînés par la pluie et les marées ; au fur et à mesure qu'ils vieillissent, les fractions volatiles s'évaporent, ne laissant que les résidus moins toxiques. Étant donné la très forte capacité de rétablissement naturel de l'environnement marin, l'impact d'un déversement d'hydrocarbures



▲ *Figure 9 : Les palétuviers sont très vulnérables aux hydrocarbures. Le recouvrement des racines échasses ou des pneumatophores (structures respirantes qui poussent à la verticale à travers le substrat) peut causer le blocage des lenticelles (pores) et empêcher ainsi l'échange de gaz, entraînant l'asphyxie.*

est généralement localisé et transitoire. Il n'existe que peu d'exemples documentés de dommages au long terme. Cependant, dans certaines circonstances spécifiques, les dommages peuvent être persistants et l'écosystème rester affaibli plus longtemps. Les circonstances qui tendent à aboutir à des dommages graves à long terme sont associées à la persistance de l'hydrocarbure, particulièrement lorsqu'il est piégé dans le sédiment et protégé contre les processus de vieillissement normaux. Les habitats abrités, tels que les marais, les grèves de cailloutis et les eaux littorales en sont autant d'exemples, surtout lorsqu'un déversement d'hydrocarbures coïncide avec des conditions de tempête. L'inondation d'un marais par une marée de tempête, accompagnée des conditions turbulentes associées, est susceptible de mettre des sédiments fins en suspension et en contact avec des hydrocarbures naturellement dispersés. Lorsque la tempête se calme, l'hydrocarbure incorporé dans le sédiment se dépose sur le fond du marais. Des circonstances analogues aboutissent à l'incorporation d'hydrocarbure dans des sédiments fins qui se déposent dans les eaux littorales. Dans les deux cas, les conditions anaérobies ralentissent toute dégradation de l'hydrocarbure. Sur les grèves de cailloutis, le vieillissement du mélange d'hydrocarbure et cailloutis peut former un revêtement d'asphalte capable de persister longtemps. Les produits pétroliers qui sont plus denses que l'eau de mer, tels que les hydrocarbures très lourds ou les résidus d'incendie, tombent sur le fond où ils peuvent rester sans être perturbés pendant des périodes indéterminées et causer l'étouffement localisé des organismes benthiques.

Études post-déversement

Les recherches sur les effets de la pollution par les hydrocarbures se sont intéressées à la quasi-totalité des accidents majeurs depuis le naufrage du *Torrey Canyon*. C'est ainsi que l'on dispose aujourd'hui de connaissances importantes sur les effets environnementaux probables d'un déversement. Étant donné ce niveau de

connaissances, il n'est ni nécessaire ni approprié d'envisager des études post-déversement après chaque déversement. Cependant, afin de déterminer l'étendue, la nature et la durée spécifiques de l'impact attribuable aux circonstances particulières d'un accident, des études post-déversement sont parfois nécessaires. Étant donné que les effets de la pollution par les hydrocarbures sont, pour la plupart, bien compris et prévisibles, il est important que les études s'intéressent à la quantification des dommages visibles plutôt qu'à l'investigation d'un large éventail d'impacts hypothétiques. Compte tenu de la variabilité de l'environnement marin, l'étude d'un éventail très divers d'impacts potentiels donnera presque certainement des résultats peu probants.

Les techniques disponibles pour l'analyse chimique des polluants évoluent continuellement. Les concentrations des composants potentiellement toxiques de l'hydrocarbure peuvent désormais être mesurées en parties par trillion (ppt, ng/kg, 1×10^{-12}). L'un des objectifs les plus importants de l'évaluation des dommages est à la fois d'établir les processus des impacts observés et de procéder à l'identification qualitative du composant spécifique de l'hydrocarbure responsable de la contamination, notamment dans les environnements à pollution chronique. Une analyse par chromatographie en phase gazeuse liée à la spectrométrie de masse (GC-MS) est généralement employée.

Des biomarqueurs sont habituellement utilisés pour détecter, chez les animaux, l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) trouvés dans le pétrole brut et les produits pétroliers. Par exemple, une mesure de l'activité éthoxyrésorufine-O-dééthylase (EROD) détecte les niveaux enzymatiques dans le tissu hépatique, qui intervient à la fois dans le métabolisme et l'élimination des toxines ainsi que dans le développement de tumeurs cancéreuses. Cette technique est suffisamment sensible pour indiquer l'exposition aux HAP sans contamination



Figure 10a : Le nettoyage agressif du marais a entraîné des dommages additionnels à ceux causés par l'hydrocarbure.



Figure 10b : Le marais nettoyé sept semaines plus tard. Des signes de repousse sont apparents.



Figure 10c : 22 mois plus tard, le marais est entièrement recouvert de végétation, même s'il ne s'agit que d'espèces opportunistes.



Figure 10d : Trois ans plus tard, la diversité des espèces du marais est entièrement rétablie.

corporelle détectable et peut donc donner une alerte précoce de dommages potentiels. Cependant, les changements de niveaux d'activité enzymatique sont également indicateurs d'autres causes d'agression, telles que la présence d'autres matériaux toxiques analogues sans rapport avec l'hydrocarbure. Les niveaux d'activité reflètent également l'âge et le statut reproductif de l'animal, ainsi que les changements de température. Il est important, dès lors, que ces études tiennent compte de ces facteurs potentiellement difficiles à interpréter.

Les priorités des études peuvent être établies en fonction de plusieurs facteurs. Tout d'abord, les conditions de base par rapport auxquelles les effets seront déterminés : par référence aux données pré-déversement, lorsqu'elles existent ; par comparaison avec des espèces, communautés ou écosystèmes équivalents à des sites de référence extérieurs à la zone touchée ; ou en suivant le rétablissement d'un élément ayant subi un dommage évident, telle que la mortalité d'oiseaux ou d'invertébrés marins. Le plancton n'est pas un bon sujet d'études. En effet, bien que des analyses en laboratoire et sur le terrain aient démontré la mortalité et les effets sublétaux après exposition aux hydrocarbures, la variabilité du plancton est telle que des comparaisons entre les situations pré et post-déversement seront probablement peu fiables. D'autres facteurs à prendre en compte sont l'étendue géographique de la zone touchée, le degré de contamination et les niveaux associés d'exposition (concentration et durée) ainsi que l'importance de la ressource affectée, c'est-à-dire sa rareté ou sa fonction écologique. Enfin, les aspects pratiques de la réalisation des études doivent être pris en compte. Il peut s'agir des moyens financiers ou tout simplement de la facilité d'accès aux sites ou du risque de les perturber pendant la période d'étude. Des conseils complémentaires sur la conception et l'organisation d'études post-déversement sont donnés dans le Guide d'Informations Techniques : *Échantillonnage et suivi des déversements d'hydrocarbures en mer*.

Restauration, remise en état et remédiation

La restauration, également appelée remise en état ou remédiation, est le processus qui consiste à prendre des mesures pour remettre l'environnement endommagé dans un état lui permettant de fonctionner normalement plus rapidement que ne pourraient le faire les processus de rétablissement naturels à eux seuls. Les termes sont souvent employés de manière interchangeable dans le contexte des dommages à l'environnement. Cependant, la comparaison du droit de l'environnement aux États-Unis et en Union européenne avec le régime international de la Convention de 1992 sur la responsabilité civile, révèle une interprétation parfois différente des termes. Les orientations données dans le Manuel des demandes d'indemnisation du Fonds de 1992 (FIPOL)** indiquent qu'au sein du régime international, les mesures de **remise en état** doivent avoir des chances raisonnables d'accélérer le rétablissement naturel sans conséquences néfastes pour d'autres ressources naturelles ou économiques. Les mesures doivent également être proportionnelles à l'étendue et à la durée du dommage subi, ainsi qu'aux avantages susceptibles d'être obtenus. Un dommage est considéré comme une détérioration de l'environnement marin, laquelle détérioration peut, dans ce contexte, être décrite comme le fonctionnement anormal ou l'absence d'organismes au sein d'une communauté biologique, causés par le déversement.

** <http://www.iopcfund.org/publications.htm>

▲ Figure 10 : Rétablissement naturel d'un marais endommagé.

Le règlement américain promulgué en vertu de l'Oil Pollution Act de 1990 (OPA '90) reconnaît également le rétablissement naturel comme un mécanisme crucial pour la **remise en état**, mais introduit deux concepts : la remise en état primaire et la remise en état compensatoire. La remise en état compensatoire a pour but de compenser les services environnementaux « perdus » pendant que l'environnement est en cours de rétablissement, tandis que la remise en état primaire fait référence aux actions entreprises pour remettre en état ou accélérer le rétablissement, c'est-à-dire l'équivalent de la réhabilitation au sens du régime international. Ces mêmes concepts constituent la notion de **remédiation** dans la directive européenne de 2004 sur la responsabilité environnementale (DRE). Le régime international ne reconnaît toutefois pas le concept de remise en état compensatoire ou de remédiation.

À la suite d'une opération de nettoyage, d'autres mesures actives peuvent être justifiées pour rétablir des ressources endommagées et encourager le rétablissement naturel, notamment dans des circonstances dans lesquelles le rétablissement serait autrement relativement lent. Un exemple d'une telle approche suite à un déversement d'hydrocarbures consisterait à replanter la végétation de marais maritimes ou de mangroves (*Figure 11*). Une fois que les nouvelles pousses sont établies, d'autres formes de vie biologique reviennent et le potentiel d'érosion de la zone est minimisé.

L'élaboration de stratégies de remise en état utiles pour la faune est une bien plus grande gageure. Les habitats endommagés peuvent être protégés et le rétablissement des écosystèmes peut être favorisé, par exemple, en restreignant l'accès et l'activité humaine, en mettant en place des contrôles de la pêche pour réduire la concurrence pour une ressource alimentaire limitée – comme dans le cas des lançons et des macareux – ou en fermant les plages fréquentées par les tortues pendant la saison de ponte. Dans



▲ *Figure 11 : Zone de mangrove, créée en plantant des jeunes pousses individuelles.*

certains cas, la protection d'une population reproductrice naturelle sur un site voisin non pollué peut être justifiée, par exemple en contrôlant les prédateurs, afin de fournir un réservoir à partir duquel la recolonisation des zones endommagées peut s'effectuer. De nombreux facteurs biologiques, écologiques et environnementaux complexes sont cependant susceptibles de régir la capacité des populations voisines à recoloniser une zone polluée.

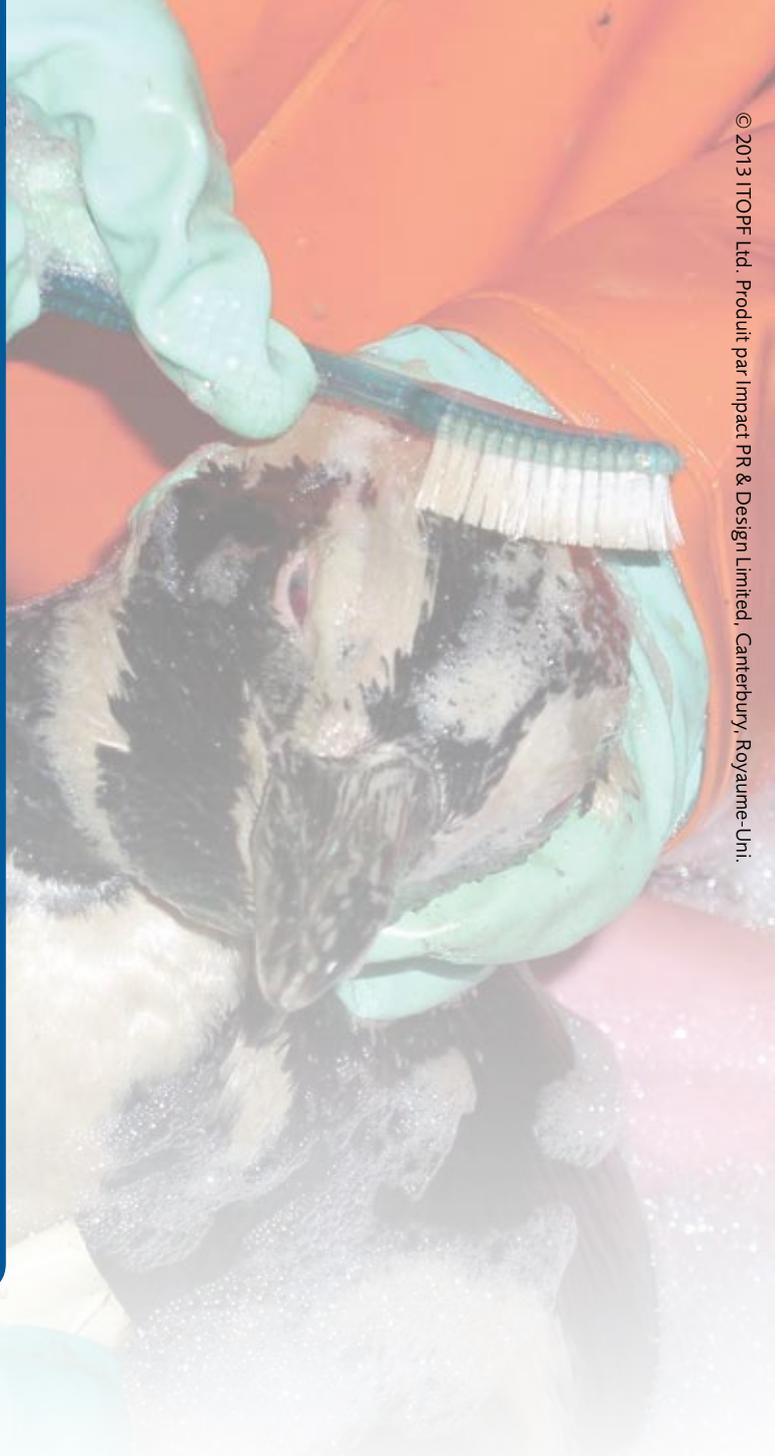
Dans la réalité, la complexité de l'environnement marin signifie que les possibilités de réparation artificielle des dommages écologiques sont limitées. Dans la plupart des cas, le rétablissement est susceptible d'être relativement rapide et ne sera que rarement accéléré par des mesures de remise en état.

L'essentiel

- Des écosystèmes très divers et très complexes existent dans l'environnement marin ; les fluctuations importantes en termes d'abondance et de diversité font partie de leur fonctionnement normal.
- L'environnement marin est apte à se rétablir lui-même des perturbations sévères causées tant par les phénomènes naturels que par les déversements d'hydrocarbures.
- Les principaux mécanismes d'impact environnemental par les déversements d'hydrocarbures sont l'engluement et la toxicité. Toutefois, la gravité des dommages dépend largement du type d'hydrocarbure déversé et de la rapidité avec laquelle il se dissipe relativement à l'emplacement de ressources sensibles à la pollution par les hydrocarbures.
- Les organismes les plus vulnérables sont ceux qui évoluent à la surface de l'eau ou sur les littoraux.
- Les marais maritimes et les mangroves sont les habitats littoraux les plus sensibles.
- Les oiseaux marins sont particulièrement menacés. Certaines espèces – les manchots en particulier – réagissent bien au nettoyage. D'autres, cependant, risquent de ne pas survivre longtemps une fois remises en liberté après avoir été nettoyées, ou d'avoir des difficultés à se reproduire.
- Bien que les impacts à court terme puissent être sévères, des dommages durables sont inhabituels même après les accidents les plus importants. Les dommages à long terme observés sont limités à des zones géographiquement isolées où les conditions ont permis aux accumulations d'hydrocarbure de persister.
- Une planification et une exécution efficaces des opérations de lutte antipollution permettent à la fois d'atténuer les dommages et de faire un premier pas vers le rétablissement par la collecte de l'hydrocarbure.
- Des mesures de remise en état bien conçues peuvent parfois améliorer les processus naturels de rétablissement.

GUIDES D'INFORMATIONS TECHNIQUES

- 1 Observation aérienne des déversements d'hydrocarbures en mer
- 2 Devenir des déversements d'hydrocarbures en mer
- 3 Utilisation des barrages dans la lutte contre la pollution par les hydrocarbures
- 4 Utilisation des dispersants dans le traitement des déversements d'hydrocarbures
- 5 Utilisation des récupérateurs dans la lutte contre la pollution par les hydrocarbures
- 6 Reconnaissance des hydrocarbures sur les littoraux
- 7 Nettoyage des hydrocarbures sur les littoraux
- 8 Utilisation de matériaux absorbants dans la lutte contre la pollution par les hydrocarbures
- 9 Traitement et élimination des hydrocarbures et des débris
- 10 Direction, commandement et gestion des déversements d'hydrocarbures
- 11 Effets de la pollution par les hydrocarbures sur les pêches et la mariculture
- 12 Effets de la pollution par les hydrocarbures sur les activités sociales et économiques
- 13 Effets de la pollution par les hydrocarbures sur l'environnement
- 14 Échantillonnage et suivi des déversements d'hydrocarbures en mer
- 15 Préparation et soumission des demandes d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures
- 16 Planification d'urgence en cas de déversement d'hydrocarbures en mer
- 17 Intervention en cas d'accident chimique en mer



L'ITOPF est une organisation à but non lucratif, fondée au nom des armateurs du monde entier et de leurs assureurs. Sa mission : contribuer à l'efficacité des interventions de lutte contre la pollution en cas de déversements en mer d'hydrocarbures, de produits chimiques et autres substances dangereuses. De l'intervention d'urgence à la formation, l'éventail de services proposés comprend également l'apport de conseils techniques en matière de nettoyage, l'évaluation des dommages causés par la pollution et l'aide à la préparation de plans d'intervention en cas de déversement. Source d'informations exhaustives sur la pollution marine par les hydrocarbures, l'ITOPF publie ce document dans le cadre d'une série de guides basés sur l'expérience de son personnel technique. L'information qu'il contient peut être reproduite avec la permission expresse préalable de l'ITOPF. Pour tout renseignement complémentaire, merci de vous adresser à :



ITOPF Ltd

1 Oliver's Yard, 55 City Road, London EC1Y 1HQ, Royaume-Uni

Tél: +44 (0)20 7566 6999
Fax: +44 (0)20 7566 6950
24h: +44 (0)20 7566 6998

E-mail: central@itopf.org
Web: www.itopf.org