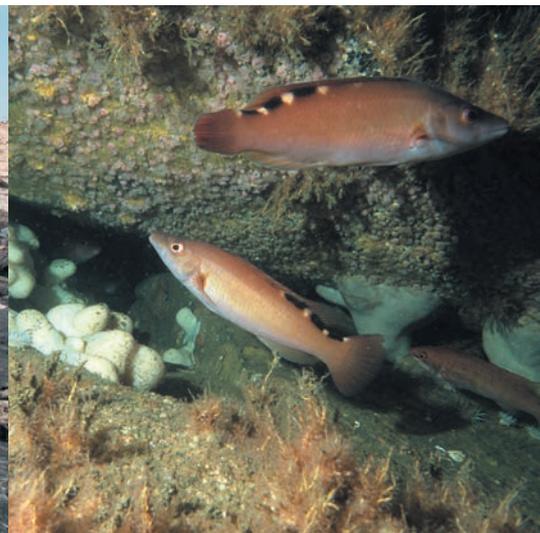
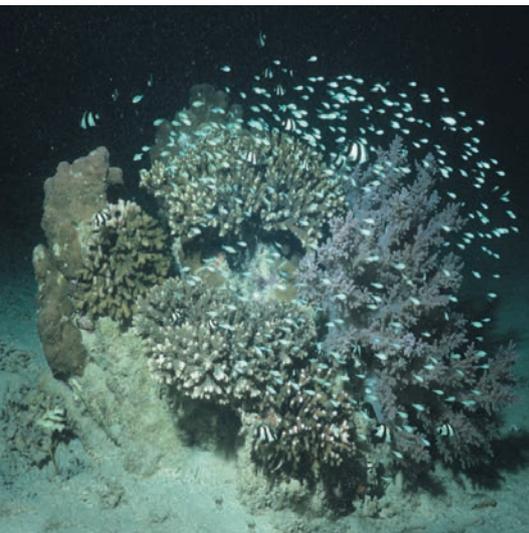


Impacts des déversements d'hydrocarbures sur l'environnement marin

Lignes directrices relatives aux bonnes pratiques
en matière de gestion des accidents et du personnel
d'intervention d'urgence



IPIECA

Association Internationale de l'industrie pétrolière pour la Protection de l'Environnement

Level 14, City Tower, 40 Basinghall Street, London EC2V 5DE, Royaume-Uni

Téléphone : +44 (0)20 7633 2388 Télécopieur : +44 (0)20 7633 2389

Courriel : info@ipieca.org Internet : www.ipieca.org



Association internationale des producteurs d'hydrocarbures et de gaz (IOGP)

Bureau de Londres

Level 14, City Tower, 40 Basinghall Street, London EC2V 5DE, Royaume-Uni

Téléphone : +44 (0)20 7633 0272 Télécopieur : +44 (0)20 7633 2350

E-mail: reception@iogp.org Internet : www.iogp.org

Bureau de Bruxelles

Boulevard du Souverain 165, 4th Floor, B-1160 Bruxelles, Belgique

Téléphone : +32 (0)2 566 9150 Télécopieur : +32 (0)2 566 9159

Courriel : reception@iogp.org Internet : www.iogp.org

Rapport 525 de l'Association internationale des producteurs d'hydrocarbures et de gaz (IOGP)

Date de publication : 2015

© IPIECA-IOGP 2015 Tous droits réservés.

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, stockée dans un système d'extraction ou transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, électronique, mécanique, photocopie, par enregistrement ou autre, sans le consentement écrit préalable de l'IPIECA.

Exonération de responsabilité

Bien que tous les efforts possibles aient été fournis pour assurer l'exactitude des informations contenues dans cette publication, ni l'IPIECA, ni l'IOGP, ni aucun de leurs membres passés, présents ou futurs ne garantissent leur exactitude ou n'assument la responsabilité d'une quelconque utilisation prévisible ou imprévisible de cette publication, même en cas de négligence de leur part. Par conséquent, ladite utilisation se fait aux risques et périls du destinataire, avec la convention que toute utilisation par le destinataire constitue un accord avec les conditions de cet avertissement. Les informations contenues dans cette publication ne prétendent pas constituer des conseils professionnels de différents contributeurs de contenu, et ni l'IPIECA, ni l'IOGP ni ses membres n'acceptent quelque responsabilité que ce soit pour les conséquences de l'utilisation ou la mauvaise utilisation de la présente documentation. Ce document peut fournir des indications qui viennent compléter les exigences de la législation locale. Cependant, rien dans les présentes n'est destiné à remplacer, modifier, abroger ou autrement déroger à ces exigences. En cas de conflit ou de contradiction entre les dispositions de ce document et la législation locale, les lois applicables prévaudront.

Impacts des déversements d'hydrocarbures sur l'environnement marin

Lignes directrices relatives aux bonnes pratiques
en matière de gestion des accidents et du personnel
d'intervention d'urgence

Préface

Cette publication fait partie de la série des Guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP, qui résume les opinions actuelles en matière de bonnes pratiques sur des sujets variés relatifs à la préparation et à l'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures. Cette série vise à harmoniser les pratiques et les activités du secteur, à informer les parties prenantes et à servir d'outil de communication pour promouvoir la sensibilisation et l'éducation.

Cette série met à jour et remplace la célèbre « Oil Spill Report Series » de l'IPIECA, publiée entre 1990 et 2008. La série de guides couvre des sujets qui sont applicables aux activités d'exploration comme de production, ainsi qu'aux activités de transport maritime ou terrestre.

La révision de la série est entreprise dans le cadre du programme de collaboration de l'IOGP-IPIECA (JIP) en matière de préparation et d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures « Oil Spill Response Joint Industry Project ». Le JIP a été créé en 2011 pour valoriser les enseignements en matière de préparation et d'intervention contre les déversements d'hydrocarbures de la marée noire d'avril 2010 dans le golfe du Mexique.

Les guides IPIECA de la série d'origine seront progressivement retirés à mesure que les titres de cette nouvelle série seront publiés, au cours des années 2014-2015.

Remarque sur les bonnes pratiques

Les « Bonnes pratiques » dans le contexte du JIP sont l'énoncé de lignes directrices, de pratiques et de procédures internationalement reconnues qui permettront à l'industrie du pétrole et du gaz de garantir des niveaux de performance acceptables en matière de santé, de sécurité et d'environnement.

Les bonnes pratiques pour un sujet particulier seront amenées à évoluer au fil du temps à la lumière des innovations technologiques, de l'expérience pratique et de l'amélioration des connaissances scientifiques, ainsi que des changements politiques et sociaux.

Table des matières

Préface	2	Impacts des déversements d'hydrocarbures sur la vie marine et la faune associée	20
Introduction	4	Le plancton	20
Ecosystèmes marins et hydrocarbures	4	Le benthos	21
Objectif du document	6	Les poissons et les ressources halieutiques	26
Les hydrocarbures dans l'environnement marin	7	Les mammifères marins	30
Composition et propriétés des hydrocarbures	7	Les reptiles marins	33
Le devenir des hydrocarbures	9	Les oiseaux	34
<i>Évaporation</i>	10	Les habitats littoraux et côtiers	37
<i>Étalement et dérive</i>	10	Gestion de la lutte contre les déversements d'hydrocarbures et impacts potentiels	39
<i>Dissolution</i>	11	Analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction de options de luttes envisagées (NEBA)	40
<i>Dispersion</i>	11	Les bénéfices et les impacts de l'application de dispersants	41
<i>Émulsification</i>	11	Evaluation des dommages causés par un déversement d'hydrocarbures – principales activités	44
<i>Sédimentation</i>	12	Bibliographie	46
<i>Immersion</i>	12	Manuels et documents d'orientation	46
<i>Arrivage à la côte</i>	13	Littérature sur le devenir et les effets des hydrocarbures	47
<i>Photo-oxydation</i>	14	Sites internet utiles	51
<i>Biodégradation</i>	14	Remerciements	52
Impacts écologiques et régénération des écosystèmes	15		
Exposition aux hydrocarbures et mécanismes d'action	15		
Facteurs influençant l'impact des hydrocarbures	17		
<i>Saisonnalité</i>	17		
<i>Fonctions écologiques des espèces-clés</i>	17		
<i>Facteurs liés au mode de vie</i>	18		
<i>Etat de santé et antécédents</i>	18		
Impacts à long terme et régénération des écosystèmes	18		

Introduction

Ecosystèmes marins et hydrocarbures

L'environnement marin est un réseau dynamique et diversifié d'habitats et d'espèces, liés par des processus écologiques et physiques complexes qui interagissent avec les hommes et leurs activités à plusieurs niveaux. Les habitats marins et les communautés qui y sont associées sont souvent regroupés en écosystèmes, par ex. la pleine mer, les grands fonds, les récifs coralliens, les marais salants, les côtes rocheuses etc., bien qu'ils soient tous connectés et que les impacts frappant un écosystème puissent affecter les autres. La structure et la fonction des écosystèmes constituent des propriétés importantes lors de l'évaluation des impacts. Les nombreux bénéfices que l'homme tire de ces habitats et de ces communautés sont qualifiés de services écosystémiques. Les bénéfices les plus évidents sont les poissons, les fruits de mer et les autres aliments que nous consommons, ainsi que les bénéfices récréatifs et esthétiques offerts par la mer. En outre, de nombreuses communautés côtières ont tissé des liens culturels et spirituels étroits avec la mer. Cependant, il existe de nombreux autres services moins évidents.

Le plancton marin évoluant au sein de vastes zones situées en pleine mer joue un rôle primordial dans la sauvegarde de notre atmosphère transférant le carbone vers les fonds-marins. La pleine-mer et les grands fonds abritent également de nombreux poissons que nous capturons pour nous nourrir, et dont l'abondance et la productivité augmentent significativement dans les eaux moins profondes et à proximité des zones côtières. Les zones côtières humides et certains écosystèmes marins, y compris les marais salants, les mangroves, les forêts de laminaires et les herbiers marins sont particulièrement productifs, fournissant la plupart des substances organiques qui apportent les nutriments aux écosystèmes d'eaux peu profondes

Les services écosystémiques de l'environnement marin ; il est de l'intérêt de tous de préserver une mer propre, productive et saine.



voisins. Ils fournissent également les nutriments et constituent un abri pour les poissons juvéniles et de nombreuses autres espèces, ils protègent nos côtes des tempêtes et des inondations et captent les sédiments et les déchets organiques qui ruissellent des terres. Les mangroves et les récifs coralliens fournissent également des matériaux de construction, alors que de plus en plus de produits pharmaceutiques sont développés en puisant dans la grande diversité des espèces marines.

La biodiversité (c'est-à-dire la diversité de la vie) est en elle-même une caractéristique précieuse de ces écosystèmes dans la mesure où elle accroît la complexité des réseaux trophiques et des autres processus écologiques, qui à son tour renforce la résilience aux impacts naturels et anthropogéniques. La plupart des réseaux trophiques marins intègrent un ensemble de producteurs primaires (c'est-à-dire les plantes et les algues, et notamment les phytoplanctons, qui puisent leur énergie de la lumière du soleil ou des organismes qui utilisent l'énergie chimique des cheminées hydrothermales), de bactéries (se nourrissant principalement de carbone organique dissous), d'herbivores (zooplancton, invertébrés benthiques et certains poissons), de carnivores, de prédateurs, de parasites (une grande variété d'animaux) et de décomposeurs (principalement les bactéries et les mycètes). La biodiversité et les autres services écosystémiques sont pris en compte par les systèmes réglementaires nationaux et internationaux qui reconnaissent la nécessité de conserver et protéger les habitats et espèces importantes. Ceci inclut l'identification des zones protégées.

Les huiles minérales (par exemple le pétrole) sont issues de substances végétales et animales datant de millions d'années qui se sont transformées au fil du temps sous l'action de la chaleur et de la pression souterraine. Sur de nombreux sites, ces réservoirs souterrains d'hydrocarbures sont connectés à la surface par des formations géologiques telles que des failles ou des dômes salins, alors que dans certaines zones des suintements surviennent à travers les fonds marins. Ces suintements naturels de pétrole se produisant dans tous les océans du monde entier depuis des millions d'années, des organismes marins ont développé des mécanismes moléculaires leur permettant de détoxifier ces substances et de les intégrer à la chaîne alimentaire. Un niveau naturel d'hydrocarbures *pétrogéniques* (voir l'encadré 1 à la page 7) existe dans l'eau de mer et dans les sédiments des fonds marins ; il est plus important dans certaines zones que dans d'autres, en fonction de la prévalence des suintements d'hydrocarbures. Depuis la révolution industrielle, à ces niveaux naturels se sont ajoutés les émissions aériennes et les apports provenant des eaux de ruissellement ou du transport maritime. Le Conseil national de recherche des Nations-Unies a estimé qu'environ la moitié des apports annuels en hydrocarbures dans les océans du monde sont d'origine anthropiques, alors que l'autre moitié est générée naturellement par les suintements.

Les déversements d'hydrocarbure d'envergure sont rares mais peuvent avoir des effets importants et durables. Les impacts des déversements d'hydrocarbures varient d'impacts minimes (par exemple à la suite de déversements d'hydrocarbures légers en haute-mer) avec des effets non mesurables ou peu mesurables durant seulement quelques heures ou quelques jours, jusqu'à des impacts significatifs (par exemple, un grand nombre d'hydrocarbures lourds pénétrant les habitats protégés des zones humides) avec des effets à long-terme. Les déversements d'envergure sont susceptibles de causer des dommages plus importants que les déversements mineurs ; cependant, le niveau de l'impact varie considérablement en fonction du type d'hydrocarbure et d'accident, des conditions locales (comme la saison, les conditions météorologiques et la localisation) et des ressources présentes.

Le développement de l'exploration pétrolière dans les environnements polaires ou en eaux profondes présente de nombreux défis pour la lutte contre les déversements d'hydrocarbure et pour la science. Les plantes et les animaux évoluant dans des écosystèmes d'eau froide tendent à vivre plus longtemps et à croître plus lentement que ceux évoluant dans des climats et des eaux plus chaudes, le rythme de nombreux processus biologiques y étant relativement lent. La persistance des hydrocarbures, qui constitue un facteur essentiel dans la régénération des habitats, est également susceptible d'augmenter à des latitudes plus élevées. Ainsi, on suppose souvent que la régénération à la suite d'un déversement d'hydrocarbures nécessitera plus de temps, cependant de nombreux facteurs sont à prendre en considération. Des études ont montré que les microorganismes présents dans les écosystèmes d'eau froide peuvent entraîner une dégradation rapide des hydrocarbures en l'absence d'autres conditions limitantes.

La lutte contre la pollution aux hydrocarbures est conçue de manière à éliminer la contamination par les hydrocarbures, favoriser leur biodégradation et éviter la contamination des zones les plus sensibles de l'écosystème. La lutte peut toutefois causer d'autres dommages à l'environnement. Dans certaines situations, il sera nécessaire de faire des compromis et d'évaluer les bénéfices écologiques et économiques de chaque option de lutte. Les analyses des risques environnementaux et la gestion de la lutte s'appuient sur des considérations scientifiques, y compris les décisions en ce qui concerne le choix des techniques de lutte. Notre connaissance est étayée par l'ensemble des observations issues de l'étude des marées noires survenues par le passé ou dans le cadre des recherches expérimentales.

Objectif du document

L'objectif du présent document est de fournir un aperçu de la façon dont les déversements d'hydrocarbures peuvent affecter les ressources et fonctions écologiques marines et de la vitesse de régénération de ces ressources et fonctions. S'appuyant sur des preuves scientifiques documentées, y compris des références à des études précises, ce document est destiné à la communauté chargée de la lutte, qui se compose des opérateurs, des gouvernements, des entreprises et du public.

La première section, intitulée *Les hydrocarbures dans l'environnement marin*, décrit les propriétés des hydrocarbures et des processus physiques affectant les hydrocarbures importants pour l'impact sur l'écologie marine. L'accent est mis sur les propriétés et les processus qui affectent la persistance de l'hydrocarbure, dans la mesure où ils sont les plus susceptibles d'avoir un impact sur les effets à long terme.

La section sur les *Impacts écologiques et régénération des écosystèmes* propose une description générale des mécanismes et facteurs qui ont une incidence sur les impacts des déversements d'hydrocarbures sur les ressources marines et sur leur vitesse de régénération.

La troisième section, *Impacts des déversements d'hydrocarbures sur la vie marine et la faune associée*, décrit certains des impacts les plus courants des déversements d'hydrocarbure sur les formes de vie associées aux différents écosystèmes et inclut des références à des études de cas pertinentes.

La section intitulée *Gestion de la lutte contre les déversements d'hydrocarbure et leurs impacts potentiels* analyse les bonnes pratiques actuelles en matière de lutte contre les déversements et les méthodes permettant de réduire les dommages environnementaux (c'est-à-dire d'optimiser les bénéfices environnementaux et économiques des techniques de lutte).

La cinquième section, intitulée *Évaluation des dommages générés par le déversement d'hydrocarbure – principales activités*, synthétise certaines des principales approches et les exigences clés en matière d'évaluation des dommages, ainsi que les activités de suivi nécessaires à la description de la régénération.

Enfin, la section *Bibliographie* fournit une liste des références les plus importantes et des publications pertinentes.

La série de Guides de bonnes pratiques (GPG) de l'IPIECA-IOGP intègre un certain nombre de titres qui pourraient intéresser le lecteur et notamment le GPG intitulé *Impacts des déversements d'hydrocarbures sur le littoral* (IPIECA-IOGP, 2015a) qui détaille le devenir et les effets des déversements d'hydrocarbures en mer sur les ressources côtières. D'autres titres connexes abordent des thèmes comme l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de luttes envisagées (IPIECA-IOGP, 2015b) et l'utilisation des dispersants, en surface (IPIECA-IOGP, 2015c) ou dans les fonds marins (IPIECA-IOGP, 2015d). Pour un exposé des impacts des déversements d'hydrocarbures sur les terres/les rives d'eau douce et notamment celles des lacs et des rivières, veuillez consulter le Guide de bonnes pratiques de lutte en eaux intérieures. (IPIECA-IOGP, 2015e).

Les hydrocarbures dans l'environnement marin

Composition et propriétés des hydrocarbures

Les pétroles bruts sont des mélanges complexes d'hydrocarbures, ainsi que d'autres composés (voir Encadré 1) et éléments dont du soufre et d'autres oligoéléments en quantités moindres. Les produits raffinés, de l'essence au bitume, sont également principalement composés d'hydrocarbures et sont produits à partir de pétroles bruts suivant différents procédés de raffinage afin d'obtenir les propriétés chimiques et physiques désirées.

Les hydrocarbures peuvent être classifiés en différentes catégories en fonction de leur structure chimique, mais les caractéristiques les plus importantes au regard de leur devenir l'environnement marin est le poids moléculaire, le point d'ébullition (en principe étroitement liés), leur solubilité dans l'eau ainsi que leur biodisponibilité (également étroitement liées). Les composés aux poids moléculaires les plus bas présentent en principe les points d'ébullition les plus bas et demeurent volatils à des températures ambiantes basses. Un grand nombre de ces composés peut présenter une toxicité aiguë (voir l'encadré 2 à la page 9) ; cependant, à la surface de la mer ou sur la côte, ils s'évaporent si vite que leur contribution aux impacts marins est en principe négligeable. Déversés dans les eaux profondes, leur contribution au niveau de toxicité sera alors plus importante, même si ces composés de faible poids moléculaire se biodégradent, en principe, rapidement. À l'opposé, les hydrocarbures de poids moléculaire élevé (par ex. les asphaltènes, un composé essentiel du bitume) présentent un point d'ébullition élevé, sont résistants à la biodégradation et très persistants. Ils peuvent en outre être chroniquement toxiques mais sont en généralement moins biodisponibles en raison de leur faible niveau de solubilité dans l'eau. Une grande variété d'hydrocarbures se situe entre ces deux extrêmes, la plupart étant susceptible d'avoir un impact biologique.

Encadré 1 Types et groupes d'hydrocarbures

Hydrocarbures : les véritables hydrocarbures contiennent seulement du carbone et de l'hydrogène. Les pétroles bruts contiennent en outre d'autres composés organiques, principalement à base de carbone et d'hydrogène, mais aussi d'azote, de soufre et d'oxygène. Dans le cadre du présent document, le terme hydrocarbure est utilisé de manière générique pour désigner tous ces composants organiques.

Hydrocarbures aromatiques : ils sont les principaux responsables de la toxicité des hydrocarbures et possèdent plusieurs cycles benzéniques :

- Le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et les xylènes (composés BTEX) possèdent un cycle benzénique et sont relativement solubles dans l'eau, tout en demeurant très volatils (point d'ébullition très bas).
- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) possèdent deux ou plusieurs cycles benzéniques :
 - le naphthalène et ses dérivés alkylés sont des composés bicycliques et affichent une solubilité dans l'eau et une volatilité modérées;
 - les composés à trois et quatre cycles sont peu solubles dans l'eau et ne sont pas volatils (point d'ébullition élevé) ; et
 - les composés à cinq ou plusieurs cycles sont insolubles dans l'eau et présentent un point d'ébullition élevé.

Groupes d'hydrocarbures 1 à 5 : l'industrie pétrolière classe les hydrocarbures en cinq groupes en fonction de leur densité, du groupe 1, correspondant à une densité très faible (<0,8) (par exemple le kérosène) au groupe 5, correspondant à une densité très élevée (≥1.0) (par exemple le bitume). Ce classement s'avère très utile lorsque l'on parle du devenir et de la persistance des hydrocarbures déversés.

Les composés pétrogéniques, pyrogènes et biogènes : ils sont directement dérivés des hydrocarbures minéraux, de la combustion incomplète des combustibles fossiles et des processus biologiques.

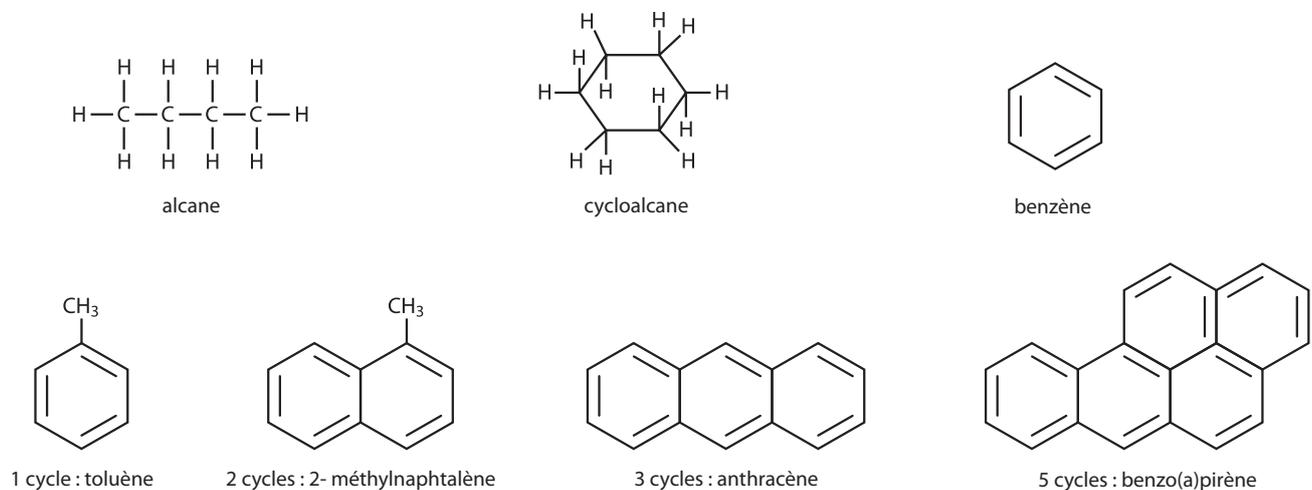
L'évaluation de la toxicité des composés hydrocarbonés (voir encadré 2 à la page 9) n'est pas une tâche facile et dépend de nombreux facteurs. Cependant, les hydrocarbures aromatiques, en particulier les HAP, ont tendance à présenter une toxicité plus élevée que les autres groupes d'hydrocarbures. Leurs concentrations (totale ou par composés) sont souvent analysées et surveillées dans l'eau, les sédiments ou les tissus animaux en tant qu'indicateurs de contamination toxique. De nombreux composés aromatiques de faible poids moléculaire présentent une solubilité dans l'eau et donc une disponibilité biologique relativement élevées, mais aussi une faible persistance. Ceux-ci peuvent être à l'origine de la plupart des effets narcotiques générant des effets aigus. Plus préoccupant sont certains HAP au poids moléculaire moyen, moins solubles, plus persistants et tellement toxiques que les petites quantités devenant biologiquement disponibles sont susceptibles de causer des effets chroniques à long terme. Même les composés aromatiques de masse moléculaire élevée, tels que les asphaltènes, sont susceptibles de générer des effets chroniques sur un organisme en cas d'exposition assez longue à un résidu bitumeux.

Les HAP peuvent s'introduire dans l'environnement marin depuis de nombreuses sources et pas uniquement dans le cas de déversements d'hydrocarbures. Les dépôts atmosphériques de particules, générés par la combustion incomplète du charbon, d'hydrocarbures ou de nombreux autres matériaux, représentent un apport important de HAP *pyrogènes* aux écosystèmes naturels.

Les propriétés d'un hydrocarbure dépendent de ses composés. Les principales propriétés physiques sont la densité (ou la masse volumique), la viscosité, le point d'écoulement (la température au-dessus duquel il s'écoulera); les propriétés chimiques clés demeurent la teneur en composés aromatiques, la teneur en paraffines ainsi que la teneur en asphaltènes. Les hydrocarbures légers présentent une faible densité et une faible viscosité et contiennent souvent un fort taux de molécules aromatiques, si bien qu'ils sont souvent très toxiques mais peu persistants dans la plupart des environnements. Les hydrocarbures bruts lourds et les carburants présentent une densité relativement élevée et seront vraisemblablement persistants, tout en demeurant toxiques au regard de leur composition. Toutes ces propriétés sont susceptibles d'évoluer après le déversement de l'hydrocarbure. (voir *Le devenir des hydrocarbures* aux pages 9 – 14).

Les définitions des termes liés à la toxicologie sont présentées dans l'encadré 2, à la page suivante. Cependant, il convient de noter que les principaux effets environnementaux des déversements d'hydrocarbures découlent principalement de l'engluement et l'étouffement des végétaux et des animaux, notamment dans les habitats côtiers, plutôt que de la toxicité de l'hydrocarbure.

Image 1 Exemples de la structure des composés chimiques des hydrocarbures bruts



Encadré 2 Toxicologie

Vulnérabilité et sensibilité aux hydrocarbures : la vulnérabilité désigne la probabilité qu'une ressource soit exposée à l'hydrocarbure. La sensibilité implique que la ressource a été exposée à l'hydrocarbure et désigne l'effet relatif à une telle exposition. Ainsi, un récif corallien en eau profonde pourra être sensible mais non vulnérable à un déversement d'hydrocarbure en surface, alors que des algues évoluant sur une côte rocheuse seront vulnérables mais non sensibles.

La **toxicité** désigne le potentiel ou la capacité d'une substance à avoir des effets nuisibles sur des organismes vivants ; la toxicité aquatique est l'effet des agents chimiques sur les organismes aquatiques. Lorsqu'une substance est potentiellement toxique, l'organisme en question et son exposition à la substance seront pris en compte.

L'**exposition** est la résultante de la **durée** de l'exposition à l'agent chimique et de la **concentration** de l'agent chimique.

La **voie d'exposition** est la façon dont l'organisme est exposé à la substance, y compris l'ingestion (directement ou dans les aliments), l'absorption via les branchies ou le contact avec la peau.

L'**intensité** d'un effet toxique dépend de la sensibilité d'un organisme aux agents chimiques, mais est également fonction de la concentration et de la durée d'exposition à l'agent chimique.

Toxicité Aiguë et Chronique : la toxicité aiguë implique des effets néfastes sur un organisme à l'occasion d'une exposition unique ou de courte durée. La toxicité chronique est la capacité d'une substance ou d'un mélange de substances à avoir des effets négatifs sur une période prolongée, la plupart du temps dans le cadre d'une exposition répétée ou durable, couvrant parfois l'intégralité du cycle de vie de l'organisme exposé. Les effets aigus et chroniques peuvent être de faible ou de forte intensité, cependant, la chronicité sous-entend souvent des effets de faible intensité subtils et difficiles à détecter.

La **biodisponibilité** désigne la mesure dans laquelle un agent chimique est disponible à l'absorption par un organisme biologique et, dans le cas des déversements d'hydrocarbures, ceci est généralement étroitement lié au niveau de toxicité et la vitesse de biodégradation.

Il y a **bioaccumulation** lorsqu'un organisme absorbe une substance toxique dans ses tissus à une vitesse supérieure à celle à laquelle la substance est éliminée.

Les **effets létaux et sublétaux** : un effet léthal entraîne la mort d'un organisme, alors qu'un effet subléthal implique une atteinte aux fonctions biologiques ou à la santé, par ex. à la croissance, à la capacité de reproduction ou à l'état de la peau.

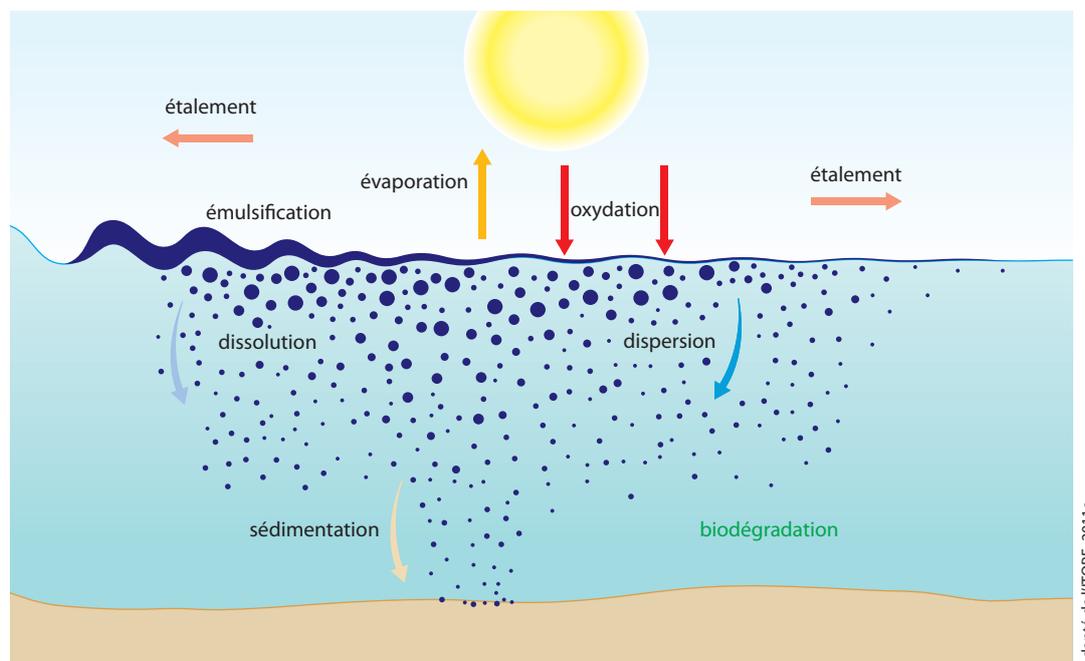
Biomarqueur : ce terme peut être utilisé de deux façons différentes, chacune étant pertinente dans le présent document :

- i) une mesure, biochimique subléthale ou physiologique, utilisée comme un indicateur d'exposition d'un animal à un contaminant (par ex. les HAP) ; ou
- ii) un composé hydrocarboné, décelé dans un hydrocarbure qui a été à l'origine produit par des organismes vivants et demeurant relativement intact (parfois appelé « fossile moléculaire »), utilisé dans le cadre des analyses d'hydrocarbures afin de caractériser de manière unique (ou prélever « l'empreinte digitale ») l'hydrocarbure en question.

Le devenir des hydrocarbures

Dès son déversement dans l'environnement marin, l'hydrocarbure est soumis à de nombreux processus naturels, connus sous le nom de « vieillissement », qui modifient rapidement et progressivement ses propriétés et redistribuent la plupart de ses composés dans les autres compartiments de l'environnement. L'importance de chaque processus sur le devenir de l'hydrocarbure est fonction du lieu du déversement (les conditions environnementales) et du type d'hydrocarbure (les propriétés chimiques et physiques décrites aux pages 7 – 8). Le mécanisme et l'amplitude des effets écologiques sont influencés de manière significative par le devenir de l'hydrocarbure. Les principaux processus de vieillissement sont décrits dans les pages 10 à 14.

Figure 2 Les processus de vieillissement de l'hydrocarbure



Adapté de l'ITOPF, 2011 a

Évaporation

La plupart des hydrocarbures frais, non vieillis, contiennent une part d'hydrocarbures de faible poids moléculaire qui possèdent un point d'ébullition bas (par ex. les alcanes de moins de 12 atomes de carbone et les composés BTEX). Lorsque déversés en mer ou sur la côte, l'évaporation de ces hydrocarbures dans l'atmosphère sera immédiate, sous l'effet de la température ambiante et des circulations d'air. Ces processus augmentent progressivement la viscosité de l'hydrocarbure déversé, mais réduisent aussi le volume et la toxicité aiguë de l'hydrocarbure résiduel. Dans le cas où l'hydrocarbure demeurerait à la surface pendant plusieurs heures ou plusieurs jours, le processus de vieillissement pourrait laisser un résidu collant dont la toxicité serait relativement faible. La proportion de l'hydrocarbure résiduel varie d'une absence totale d'hydrocarbure à la quantité initiale d'hydrocarbure déversée. Par exemple, 10 tonnes d'essence déversée dans une mer tropicale pendant un paisible jour d'été (25 °C) s'évaporeront complètement en moins de trois heures ; en mer arctique, elles s'évaporeront en l'espace de six heures lors d'une paisible journée d'hiver (5 °C) ; cependant, dans les mêmes conditions, un carburant lourd (par ex. Bunker C) perdra respectivement seulement 20 % et 15 % de son volume, après quatre jours d'évaporation (source : NOAA, 2015).

Étalement et dérive

Un hydrocarbure déversé à la surface de la mer s'étalera, même sans aucun mouvement résultant des marées ou du vent. La vitesse d'étalement dépend du point d'écoulement et de la viscosité : les hydrocarbures légers s'étaleront très rapidement, quelle que soit la température de la mer, alors que les hydrocarbures lourds s'étaleront plus lentement et resteront épais plus longtemps, notamment dans les mers froides, qui constituent des environnements réduisant la vitesse de dispersion (voir ci-dessous). Les organismes vivants en surface ou les animaux remontent à la surface pour respirer sont particulièrement vulnérables à l'égard d'un déversement d'hydrocarbures ; en outre, la vitesse et la direction des vents et des marées auront une incidence sur l'étendue de la nappe d'hydrocarbures.

Si la plupart des hydrocarbures ont tendance à s'étaler et à se déplacer, ils se fragmentent également très rapidement, entraînant un morcellement et la formation de nombreuses nappes. L'épaisseur d'une nappe d'hydrocarbure est souvent très irrégulière, avec des fragments recouverts de couches épaisses d'hydrocarbures séparées par des zones plus grandes recouvertes par une fine couche d'hydrocarbure (irisation) ou des eaux propres.

Dissolution

Alors que la plupart des hydrocarbures présentent une faible solubilité dans l'eau (y compris les eaux de mer) et peuvent ainsi être définis comme insolubles, certains des hydrocarbures aromatiques les plus légers, comme le benzène et le toluène, sont relativement solubles. Ainsi, lorsque l'hydrocarbure est déversé en mer, une faible proportion est dissoute ; la quantité et la vitesse de dissolution dépendent de la composition et de la viscosité de l'hydrocarbure. La *fraction soluble dans l'eau* a un impact qui n'est pas proportionnel sur les organismes marins, dans la mesure où elle est plus biodisponible que les autres hydrocarbures, et souvent sa toxicité aiguë est plus élevée. Des concentrations élevées en hydrocarbures de ce type sont généralement limitées aux eaux à proximité immédiate du déversement, la dilution rapide intervenant de manière horizontale et verticale. La biodégradation des hydrocarbures solubles dans l'eau est généralement rapide.



Cette photographie montre un déversement d'hydrocarbures durant la guerre du Golfe en 1991, s'étalant au sud du Koweït, sous l'influence des vents et des marées. La plupart des hydrocarbures s'échouèrent sur les plages d'Arabie Saoudite, certains d'entre eux à plus de 500 kilomètres de la source. Les processus de vieillissement modifient progressivement les propriétés des hydrocarbures.

Dispersion

L'action des vagues ou les autres formes d'agitation de l'hydrocarbure sur (ou dans) l'eau, entraîneront la formation de gouttelettes d'hydrocarbures qui se mélangeront à la colonne d'eau ; plus l'agitation sera importante, plus la probabilité de mélange sera élevée. Dans la plupart des cas, que les hydrocarbures soient déversés en surface au fond ou sur la côte, la majeure partie sera au final dispersée. Les plus grosses gouttelettes mélangées à la colonne d'eau remontent rapidement à la surface ; alors que les petites gouttelettes, moins dynamiques, ne remontent pas à la surface ; elles se dispersent horizontalement et verticalement dans la colonne d'eau. L'étendue et la profondeur du mélange dépendent de l'action des vagues et des courants existants. Ce processus peut éventuellement exposer les organismes vivants en profondeur à la contamination. Cependant, comme pour les hydrocarbures dissous, les concentrations en hydrocarbures dispersés sont plus élevées à proximité immédiate du déversement, qu'il s'agisse d'une nappe en surface ou d'un panache dans les fonds marins, et diminuent rapidement alors que l'hydrocarbure se disperse au loin de la source. Dans le cas d'une nappe en surface, la flottabilité des gouttelettes d'hydrocarbures implique que la dispersion verticale vers les eaux profondes sera plus lente que la dispersion horizontale, et les concentrations élevées seront généralement limitées à quelques mètres en deçà de la surface de l'eau. Les gouttelettes d'hydrocarbures dispersées ont une grande surface de contact ce qui facilite la biodégradation par l'action des microbes (voir la page 14). L'efficacité de la biodégradation des gouttelettes d'hydrocarbures constitue un des avantages essentiels de l'utilisation des dispersants chimiques qui favorisent le processus de dispersion naturelle.

Émulsification

Les plus grosses gouttelettes d'hydrocarbures dispersés remonteront rapidement à la surface et pourront piéger des gouttelettes d'eau de mer à l'intérieur de la nappe pour former une émulsion d'eau dans l'hydrocarbure. La plupart des hydrocarbures incorporent ainsi progressivement de l'eau lorsqu'ils sont mélangés dans des conditions de forte énergie (dans des mers modérées ou agitées). Plus l'action de mélange sera importante, plus l'eau sera incorporée à l'émulsion, entraînant ainsi une augmentation du volume de l'émulsion ; dans certains cas, le volume de l'émulsion pourra atteindre jusqu'à cinq fois le volume initial d'hydrocarbures déversés.

Les émulsions peuvent être stables ou instables, et peuvent présenter des caractéristiques physiques différentes de l'hydrocarbure initialement déversé. Les émulsions stables ont généralement de fortes teneurs en eau (parfois supérieures à 70 %) et sont en outre très visqueuses. Elles peuvent demeurer stables pendant plusieurs semaines et sont familièrement baptisées « mousse au chocolat » (ou seulement « mousse ») en raison de leur consistance et de leur couleur typiquement d'un brun rougeâtre. La formation d'une mousse stable peut réduire significativement la vitesse de dispersion et les autres processus de transformation. Dans des conditions calmes et chaudes, par exemple après un déversement sur la plage, un phénomène de démixtion peut se produire, la mousse se décompose alors à nouveau en hydrocarbures et en eau, mais certaines émulsions restent néanmoins très persistantes. Une émulsion instable peut se décomposer après plusieurs jours, ou ne peut persister que 24 heures. Les émulsions instables conservent en principe la couleur de l'hydrocarbure d'origine, soit brune foncée ou noire.

Sédimentation

Le devenir et les effets des hydrocarbures dispersés dépendent significativement de la quantité d'éléments solides en suspension (les sédiments fins et les autres particules) dans la colonne d'eau. Les gouttelettes d'hydrocarbures dispersés peuvent adhérer aux éléments solides en suspension, leurs caractéristiques physiques sont alors modifiées. Les gouttelettes dispersées par un agent chimique ont un potentiel d'adhésion moindre que les gouttelettes dispersées mécaniquement, du moins jusqu'à la biodégradation du dispersant. Les particules solides en suspension sont susceptibles de se déposer sur les fonds marins, où elles seront accumulées dans des zones de dépôts sous l'action de la sédimentation ou bien elles seront transportées sous forme d'agrégats flottants (floculation) de particules souillées, ou bien une combinaison des deux. Dans les situations les plus défavorables, lorsque les concentrations en gouttelettes d'hydrocarbures et en sédiments en suspension sont élevées, un dépôt important de particules contaminées pourrait entraîner une pollution significative des sédiments du fond marin ; ces particules sont susceptibles de persister pendant des années et d'avoir des effets durables. Ce cas s'est produit dans deux estuaires de la côte nord-ouest de la France à la suite du déversement d'hydrocarbures consécutif au naufrage de l'*Amoco Cadiz* survenu en 1978 (voir la page 25). Heureusement, de telles conditions sont peu probables et la plus grande proportion des hydrocarbures est largement dispersés et se biodégrade avant de s'incorporer aux sédiments des fonds marins. Cependant, la présence de floculations de particules souillées (des matériels floculant formés par l'agrégation de l'hydrocarbure en suspension et des particules des sédiments) pourrait exposer les animaux filtreurs des fonds marins à des concentrations élevées en hydrocarbures.

Immersion

L'immersion est souvent traitée avec la sédimentation (décrite ci-dessus), cependant, d'un point de vue écologique il s'agit d'un phénomène très différent dans la mesure où il ne produit pas de panaches ou de floculations de particules souillées. On assiste à un phénomène d'immersion lorsque l'hydrocarbure déversé est plus dense que l'eau de mer ; ce phénomène peut conduire à des accumulations très persistantes reposant sur les fonds marins et finissant parfois par s'enfouir. La zone impactée par l'immersion est généralement plus

petite que celle affectée par la sédimentation des hydrocarbures dispersés. Cependant, les hydrocarbures immergés peuvent être responsables de l'étouffement et de la destruction des habitats. Il existe peu de hydrocarbures aussi denses, même après vieillissement. Cependant, il existe quelques hydrocarbures de densité très élevée, comme les hydrocarbures de catégorie 5 (voir l'encadré 1) et d'autres encore dont la densité est susceptible d'augmenter avec le vieillissement, et qui peuvent aller jusqu'à l'immersion dans certaines conditions. Par exemple, le sable soufflé par le vent est parfois susceptible de se déposer sur l'hydrocarbure flottant

Sur certaines côtes de la Louisiane, durant le sinistre du puit de Macondo, survenu en 2010 dans le golfe du Mexique, les hydrocarbures se sont mélangés au sable dans la zone de déferlement, pour orner des nappes de pétrole immergées dans les zones subtidales peu profondes et la zone intertidale inférieure.



entraînant son immersion, alors que des couches d'eau douce à la surface de la mer à proximité de rivières ou de glaces flottantes sont susceptibles de réduire la densité de l'eau de mer permettant ainsi l'immersion de l'hydrocarbure. Les résidus des hydrocarbures brûlés sont dans certaines conditions plus lourds que l'eau de mer et sont alors susceptibles de couler. Même si de telles circonstances sont plutôt rares, il arrive que les hydrocarbures arrivent à la côte, sur des plages de sables, et se mélangent avec celui-ci dans la zone de déferlement, entraînant ainsi la formation de boulettes et de plaques susceptibles de s'immerger dans la zone subtidale, peu profonde, à proximité de la plage. Ici aussi, ce phénomène peut perdurer et constituer une source persistante (chronique) de contamination. La toxicité des hydrocarbures est alors significativement neutralisée car piégés dans la matrice bitumeuse et donc sa biodisponibilité est réduite.

Arrivage à la côte

Les processus décrits ci-dessus réduisent progressivement la quantité d'hydrocarbure présent en surface ; ainsi, il est possible qu'une quantité nulle ou faible d'hydrocarbure atteigne la côte à la suite d'un déversement d'hydrocarbure offshore. Cependant, la plupart des déversements moyens ou d'envergure résultent en une pollution de la côte, susceptible d'avoir une incidence sur un large éventail d'habitats et d'espèces présent en-dessous (zones infra et intertidale) et parfois en dessus du niveau de marée haute (zone supratidale).

Les processus naturels, qu'ils soient physiques ou chimiques, poursuivront l'altération des hydrocarbures et continueront de l'éliminer progressivement ; cependant la vitesse d'élimination varie significativement en fonction de différents facteurs. La persistance sera plus élevée dans les sites protégés des vagues et des courants. Cependant, même une des vagues de faible énergie suffira à éliminer de l'hydrocarbure. Des résidus qui demeurent pendant plus d'un an ou deux se retrouvent généralement uniquement dans les environnements abrités ou sur les sites dans lesquels ils ont été profondément enfouis. Pour plus d'informations sur le devenir des hydrocarbures arrivant à la côte, consulter le Guide de bonnes pratiques de l'APIECA-IOGP sur les impacts des déversements d'hydrocarbures sur les côtes (APIECA-IOGP, 2015a).



*Dans certaines situations, les processus naturels peuvent éliminer très rapidement les hydrocarbures échoués sur les côtes. La photographie ci-dessous présente une côte exposée aux vagues à Milford Haven, au Pays de Galles, sur laquelle un hydrocarbure brut, déversé à la suite du naufrage du *See Empress* en 1996, a emprisonné du sable et des pierres pour atteindre une épaisseur de plusieurs centimètres à certains endroits. Deux mois après (en haut à droite), la majorité de l'hydrocarbure a été éliminé sous l'action des vagues et des opérations manuelles de nettoyage; en l'espace d'une année, l'hydrocarbure a été complètement éliminé. Dans d'autres situations (à droite), l'hydrocarbure arrivé à la côte peut persister pendant plusieurs années, comme le montre cet épais résidu goudronneux issu d'un déversement dans le golfe Persique.*



Photo-oxydation

Les hydrocarbures exposés aux rayons ultraviolets (UV) peuvent être oxydés par réaction photochimique pour former d'autres composés. Il s'agit souvent d'une composante mineure du processus de vieillissement ; cependant, les HAP y sont particulièrement sensible. Les études de laboratoire de certains composés ont permis d'établir que les produits ainsi générés peuvent être plus toxiques que les composés d'origine, notamment car ils sont plus solubles dans l'eau. Cette biodisponibilité accrue augmente aussi leur potentiel de biodégradation. La mesure dans laquelle les rayons ultraviolets agissent sur les hydrocarbures et leur niveau général de toxicité dans l'environnement naturel fait actuellement l'objet de recherches.

Biodégradation

Les bactéries marines ont évolué pour produire des enzymes leur permettant d'utiliser les hydrocarbures issus des pétroles bruts comme source d'alimentation. En métabolisant les hydrocarbures, elles grandissent et se multiplient, mais deviennent aussi une source d'alimentation pour les autres organismes. À travers ce processus naturel, la majorité des hydrocarbures issus d'un déversement se biodégradent, l'énergie et les matériaux qu'ils contiennent étant alors intégrés à la chaîne alimentaire. La dégradation requiert un niveau approprié d'oxygène, des nutriments et des oligo-éléments ; sa vitesse dépend principalement du rapport entre la surface et le volume d'hydrocarbure. Ainsi les gouttelettes finement dispersées se dégraderont rapidement alors qu'une nappe épaisse ou une flaque d'hydrocarbure sur la côte se dégradera plus lentement. Les grosses molécules d'hydrocarbures ne sont pas facilement biodégradables et peuvent persister pendant plusieurs années ; elles comprennent en outre certains HAP qui peuvent s'avérer toxiques mais présentent un niveau faible de solubilité dans l'eau et, dès lors, un niveau très réduit de disponibilité biologique. Certains des hydrocarbures les plus lourds, comme les asphaltènes (utilisés pour produire l'asphalte des routes) sont si résistants à la biodégradation qu'une plaque bitumeuse, bien qu'inerte, est susceptible de persister pendant des centaines d'années. Les bactéries qui peuvent dégrader les hydrocarbures sont présentes partout, même si elles ne le sont pas toujours dans de grandes proportions ; ainsi, un certain temps pourrait être nécessaire afin qu'elles se multiplient en quantité suffisante pour que leur activité devienne notable. Les vitesses de biodégradation sont susceptibles d'être réduites par les concentrations de nutriments disponibles dont les micro-organismes ont besoin pour se multiplier et se développer. Le manque d'oxygène peut également constituer un facteur limitant dans certaines situations, notamment dans les sédiments limoneux ou argileux. Les températures basses réduisent la vitesse de biodégradation, même si ce phénomène n'est pas forcément marqué. Les études récentes conduites dans les eaux profondes du golfe du Mexique montrent que des températures stables de 5°C conviennent aux bactéries qui pourront dégrader rapidement l'hydrocarbure si celui-ci est dispersé de manière appropriée.

Impacts écologiques et régénération des écosystèmes

Exposition aux hydrocarbures et mécanismes d'action

Comme décrit dans les sections précédentes, les hydrocarbures déversés sont susceptibles de se répandre vers plusieurs habitats et sous différentes formes. Dans certaines situations rares et graves, les dépôts lourds et persistants dans la zone côtière ou sur les fonds marins peuvent entraîner la destruction durable de certains habitats naturels, mais l'exposition à l'hydrocarbure peut avoir beaucoup d'autres effets. Les organismes pourront, en fonction du lieu et de leur mode de vie, être exposés à l'hydrocarbure par différentes voies, et le mécanisme d'action pourra également varier. Qu'il s'agisse des animaux ou des plantes vivant ou évoluant à la surface de la mer ou sur la côte, les impacts les plus importants résulteront probablement de l'engluement, l'étouffement physique ; cependant, ils pourront être exposés et affectés de bien d'autres façons. Par exemple : les animaux respirant en milieu aérien pourraient inhaler des hydrocarbures volatils ou ingérer des hydrocarbures en se nourrissant ou lors du toilettage ; certains animaux et certaines plantes pourront absorber des hydrocarbures par voie transcutanée ou via d'autres surfaces ; en outre, de nombreux animaux ont des muqueuses sensibles qui réagiront à un contact direct avec les hydrocarbures. Dans la colonne d'eau, les hydrocarbures dissous pourront être absorbés via les branchies ou les autres tissus exposés, alors que les gouttelettes dispersées d'hydrocarbure pourraient être captées et avalées par les animaux filtreurs. Les animaux et plantes qui vivent à la surface des fonds marins en eau peu profonde (epibiontes) pourraient également être exposés à des hydrocarbures dissous et dispersés ; cependant, en cas d'incorporation de l'hydrocarbure au sédiment, il deviendra disponible à un éventail plus large d'animaux vivant dans les sédiments.

Les effets de l'engluement ou de l'étouffement physique sur les organismes peuvent consister en une aptitude réduite à s'alimenter, à se déplacer, à respirer ou à se reproduire ou à une perte de leur habilité à maintenir la température corporelle. Les hydrocarbures inhalés, ingérés, absorbés ou entrant d'une manière ou d'une autre en contact avec les tissus internes de l'organisme, généreront toute une série d'effets. La toxicité chimique des hydrocarbures est susceptible de générer des dommages et une perturbation du fonctionnement des parois cellulaires et des fonctions cellulaires au niveau moléculaire. Une dose (quantité ou concentration) et une durée d'exposition à des hydrocarbures toxiques assez élevées pourraient entraîner la mort de l'organisme ; dans le cas contraire, l'organisme pourrait subir certains effets sublétaux ou demeurer indemne. Les invertébrés marins exposés aux hydrocarbures sont généralement temporairement léthargiques et cesseront de se nourrir. En outre, ils ne réagiront pas normalement aux stimuli. Ceci pourrait provoquer la mort si l'animal s'isole de son habitat naturel ou est ingurgité par des prédateurs. Les effets sublétaux des déversements d'hydrocarbures qui ont été étudiés sur certains animaux incluent des effets sur la croissance, la capacité à se reproduire (mobilité des spermatozoïdes, taux d'éclosion), l'activité physiologique (taux d'alimentation et réaction aux stimuli), la détérioration des tissus (par ex. ulcères de la peau, malformations chez les larves) et dommages génétiques (par ex. ADN altéré)

Ces dernières années, les études en éco-toxicologique des cellules et des systèmes biochimiques des animaux et des plantes ont permis l'identification d'un certain nombre d'indicateurs d'effets sublétaux, baptisés *biomarqueurs*, qui pourraient indiquer une exposition de l'animal à des contaminants spécifiques y compris les HAP. Par exemple : le niveau d'activité du système enzymatique cellulaires qui protège la cellule en dégradant les agents chimiques potentiellement néfastes (un indicateur largement analysé) ; la présence de déchets de HAP dans la bile ; et le niveau de stabilité de certains organites cellulaires qui sont impliqués dans la detoxification. En révélant le degré d'exposition, ces biomarqueurs peuvent



Ces patelles sont léthargiques suite à leur exposition à un hydrocarbure à toxicité aiguë lors du naufrage du Sea Empress en 1996 à Milford Haven, au Pays de Galles. Leur population a été significativement réduite, provoquant un effet « domino » sur l'ensemble de la communauté des côtes rocheuses. Pour plus d'informations sur les impacts des déversements d'hydrocarbures sur les côtes, voir IPIECA-IJOGP, 2015a.

être utilisés dans le monitoring environnemental comme un système d'alerte précoce en cas d'impact environnemental potentiel. Dans l'étude des déversements d'hydrocarbures, ces méthodes peuvent fournir des preuves supplémentaires en sus des études écologiques et écotoxicologiques afin de décrire la portée et l'ampleur des effets. Cependant, d'autres circonstances sont susceptibles de déclencher ces mêmes biomarqueurs, si bien que le niveau des biomarqueurs seul ne constitue pas une preuve irréfutable de l'exposition à l'hydrocarbure. En outre, la preuve de l'exposition n'implique pas nécessairement un dommage.

La plupart des connaissances que nous détenons sur les effets toxicologiques (létaux et sublétaux) sont issues des études de laboratoire dans le cadre desquelles les animaux et les plantes sont conservés dans des conditions contrôlées avec différents types et concentrations d'hydrocarbures. Si la contribution de telles études est précieuse, il est important de garder à l'esprit qu'il est pratiquement impossible de reproduire exactement les conditions réelles du terrain, notamment l'habitat, les processus écologiques et la dilution continue de l'hydrocarbure au fil du temps. Il est dès lors très difficile de quantifier les effets toxicologiques en conditions réelles, et l'interprétation de leur signification écologique représente une tâche encore plus difficile. Un certain nombre de modèles informatiques ont été développés, exploitant des données issues du terrain et du laboratoire, afin de décrire l'intensité et l'échelle géographique des effets toxicologiques dans l'environnement marin. Les résultats validés correspondent parfois aux données empiriques, cependant, il convient de rester prudent et de comprendre les limites des modèles avant de tirer des conclusions.

La mesure dans laquelle un animal, une plante ou un habitat sera affecté par engluement ou étouffement physique dépendra de la quantité d'hydrocarbure qui le recouvre, ainsi que d'autres facteurs décrits ci-dessous. De même, la dose et la durée d'exposition aux hydrocarbures constituent des facteurs critiques ayant un impact sur l'intensité des effets toxiques que les hydrocarbures peuvent avoir sur un organisme. Les concentrations en hydrocarbures dispersés en-dessous d'une nappe de surface peuvent atteindre des niveaux qui pourraient s'avérer hautement toxiques dans le cas où elles persisteraient ; cependant, la durée est généralement courte dans la mesure où les nappes se déplacent et l'hydrocarbure dispersé se dilue. Les concentrations en hydrocarbures dans les sédiments d'une côte polluée pourraient demeurer élevées pendant une période plus longue dans certaines zones. Les concentrations en hydrocarbures dans les mares résiduelles de la zone intertidale contenant des plaques persistantes d'hydrocarbure vieilli, pourront être basses, cependant, l'exposition chronique pourra persister pendant des années. Chaque situation aura des effets variés sur chaque organisme et, selon l'intensité et de la répartition de la contamination, les effets sur chaque individu pourront conduire ou non à un impact au niveau de la population ou à la perte de services écosystémiques. De tels impacts dépendent en outre des caractéristiques de la population, de son comportement et des liens et échanges en son sein. Tous ces facteurs contribuent à la résilience de la population. Pour plus d'informations à ce sujet, voir IPIECA-IOGP, 2015a.

Outre ses effets directs décrits ci-dessus, l'hydrocarbure est susceptible de générer des effets indirects. Un déversement d'hydrocarbures entraînant une réduction de la population d'une certaine espèce pourrait avoir des conséquences sur les populations d'autres espèces évoluant dans le même réseau trophique, en amont ou en aval. De même, la niche écologique laissée vacante par les espèces impactées pourrait être occupée par des espèces dites opportunistes, les cadavres constituant une source d'alimentation à court terme pour les autres animaux. Les interactions écologiques complexes au sein des communautés peuvent ainsi générer beaucoup d'effets du même genre (voir la section sur les *Impacts sur la vie marine et la faune associée* aux pages 20 – 38) Il est également possible que les effets indirects des déversements d'hydrocarbures aient un impact à plus haut niveau sur l'écosystème, toutefois cette possibilité est toujours en cours d'évaluation.

Facteurs influençant l'impact des hydrocarbures

Il est évident que les impacts d'un déversement d'hydrocarbures dépendent significativement des circonstances du déversement. Le volume du déversement constitue un facteur parmi d'autres et n'est pas forcément le plus important. La source et le type d'hydrocarbure, l'énergie des vagues, la profondeur de l'eau, la quantité de sédiment dans l'eau, les vents et les marées, la température et la distance entre le déversement et la côte constituent les facteurs qui détermineront si l'impact sera négligeable ou s'il sera significatif pour de nombreuses ressources. La combinaison de ces facteurs physiques et chimiques déterminera en outre quels habitats seront exposés à l'hydrocarbure et sous quelle forme, par ex. une nappe d'hydrocarbure à la surface de l'eau, un nuage de gouttelettes d'hydrocarbure dans la partie supérieure de la colonne d'eau, un panache de particules contaminées dans la zone benthique, un panache d'hydrocarbures s'élevant depuis le fond marin, une pollution aux hydrocarbures sur la côte.

Dans les environnements marins, de nombreuses espèces tendent à se regrouper au niveau des interfaces : entre la terre et la mer (côtes), l'air et l'eau (surface de l'eau), ou là où l'eau rencontre la glace. L'hydrocarbure tend également à se concentrer au niveau de ces interfaces. Si les hydrocarbures atteignent la côte, d'autres facteurs environnementaux incluant l'action des vagues, la pente, le type de substrat et la présence d'éléments retenant les hydrocarbures joueront également un rôle important. Leur influence sur la persistance des hydrocarbures sur la côte constituera l'un des facteurs les plus importants à l'égard des impacts à long terme. Ceci est décrit plus en détails dans IPECA-IOGP, 2015a.

Outre ces facteurs environnementaux, de nombreux facteurs écologiques et biologiques ont également un impact sur la sensibilité, la résilience et le capacité de récupération de chaque espèce. Beaucoup de ces facteurs peuvent avoir des conséquences sur les communautés et les écosystèmes. Des exemples sont fournis par la section *Impacts sur la vie marine et la faune associée* dans les pages 20 – 38

Saisonnalité

Le comportement et la biologie (migration, reproduction et d'alevinage) des espèces varient en fonction des saisons, notamment dans les régions tempérées et polaires. Cette saisonnalité est susceptible d'affecter significativement leur vulnérabilité à l'hydrocarbure déversé. La saisonnalité correspond souvent à la présence ou l'absence ou à des regroupements de certaines espèces, parfois à des stades de vie déterminés, dans une zone ou un habitat particulier, à un moment spécifique de l'année. Comme les œufs et les juvéniles tendent à être plus sensibles que les adultes (en partie car ils présentent un rapport surface sur volume plus important), les regroupements saisonniers de ces stades sont susceptibles d'être vulnérables aux déversements.



©Michael Haferkamp, 2002
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AlleAle_2.jpg

Ci-dessous : le mergule nain, comme la plupart des oiseaux arctiques, a une biologie et un comportement très saisonniers. Il migre au nord vers l'Extrême-Arctique au printemps en larges colonies afin de se reproduire et de se nourrir des petits crustacés de la banquise. En hiver, il migre au sud vers le Nord de l'Océan Atlantique.

Fonctions écologiques des espèces-clés

Comme mentionné en *Introduction*, certaines espèces jouent un rôle important dans l'écologie de leur environnement. Certaines espèces (par ex. les mangroves, les plantes de marécages et les coraux) créent un habitat dont les autres espèces dépendent. Les autres espèces peuvent jouer un rôle clé en qualité de prédateurs, d'herbivores, de charognards ou d'animaux fouisseurs (retournant les sédiments des fonds marins). Un effet relativement faible sur l'une de ces espèces (parfois appelées espèces clé de voûte) pourrait avoir une incidence sur le reste de la communauté.

Facteurs liés au mode de vie

Certaines caractéristiques biologiques peuvent influencer sur la capacité des espèces à récupérer son fonctionnement et son développement normal après un déversement d'hydrocarbure. Cela inclut la longévité (durée de vie), la stratégie et la capacité reproductive (notamment le nombre de petits), la mobilité/le potentiel de dispersion (par ex. les juvéniles planctoniques), le taux de croissance, le mode d'alimentation et la distribution géographique. Ainsi, si un déversement affectait la population d'une espèce vivant longtemps, à croissance lente, produisant peu de petits par année et confinée sur un espace réduit, le processus de régénération à la suite d'un impact même modeste pourrait s'avérer lent. Par ailleurs, la population d'une espèce aux caractéristiques opposées récupérerait plus rapidement, même si de nombreux animaux étaient tués par l'hydrocarbure. De telles espèces sont dites résilientes. Certaines espèces affichant de telles caractéristiques peuvent être opportunistes, et tirent alors profit des conditions de stress qui désavantagent les espèces moins résilientes pour coloniser rapidement et dominer les habitats. En effet, l'augmentation notable de la population de ces espèces indique la présence d'un impact. À la disparition de la contamination et la recolonisation par les espèces affectées, la communauté retrouvera progressivement son équilibre naturel, passant parfois par une série d'étapes successives. Les espèces opportunistes (traitées de manière détaillée dans la section suivante) incluent les algues vertes éphémères sur les côtes rocheuses et certaines espèces de vers polychètes dans les communautés de sédiments.

Etat de santé et antécédents

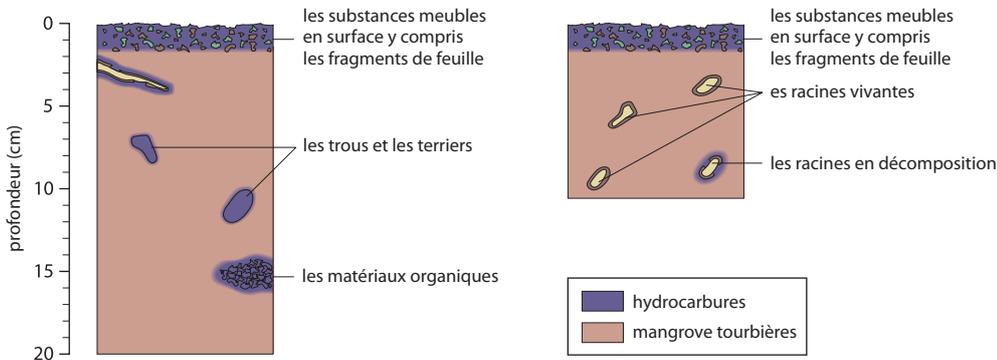
Les individus, les populations et même les communautés et les écosystèmes, qui sont déjà soumises à d'autres sources de stress pourraient subir de plein fouet les effets du déversement d'hydrocarbures. Il s'agit de la notion « d'impact cumulatif ». Par exemple, les espèces d'oiseaux de mer migratoires seront plus sensibles aux effets de la contamination s'ils ne se sont pas remis de conditions météorologiques difficiles durant leur voyage. De nombreux déversements d'hydrocarbures dans un même lieu pourraient en outre réduire progressivement l'état général et la résilience des communautés et de l'écosystème, générant des impacts à plus long terme.

En outre, certaines espèces sont tout simplement plus résistantes à une pollution aux hydrocarbures que d'autres, du fait de leur anatomie, leur physiologie, leur comportement et les autres aspects plus complexes de leur propre biologie. Consultez les pages 20 – 38 pour voir des exemples.

Impacts à long terme et régénération des écosystèmes

Nonobstant les impacts de déversements multiples sur le même site (voir *Santé et état*, ci-dessus), la majorité des déversements d'hydrocarbures sont de faible ampleur et ont des conséquences limitées. En outre, l'envergure, l'ampleur et la durée des impacts écologiques de la majorité des déversements d'hydrocarbure notables sont limitées, avec peu d'effets identifiables plus d'un ou deux ans. Même dans le cas de déversements significatifs, la plupart des habitats et des populations marines qui ont été exposés à l'hydrocarbure se rétablissent rapidement, les impacts à long terme se limitant à des zones relativement petites. Les impacts à long terme sont principalement causés par les hydrocarbures persistants, en particulier sous forme de résidus lourds ou incorporés aux sédiments argilo-limoneux et au sein d'habitats abrités, protégés de l'action des vagues. Lorsque les hydrocarbures ne sont pas persistants, c'est le cas dans la plupart des zones affectées par le déversement, la régénération sera en général rapide et seulement limitée par la vitesse des processus naturels. Les autres facteurs potentiellement responsables d'effets à long-terme potentiels incluent des opérations de lutte superflues (par ex. les dommages physiques aux habitats à la suite des activités de nettoyage), la mortalité élevée d'espèces à forte longévité (les espèces qui nécessitent beaucoup de temps pour se reproduire et retrouver leur niveau de population avant déversement) et les autres facteurs qui débouchent sur un recrutement lent de population affectée (par ex. les populations qui sont isolées au plan géographique). Des exemples sont fournis dans la section suivante.

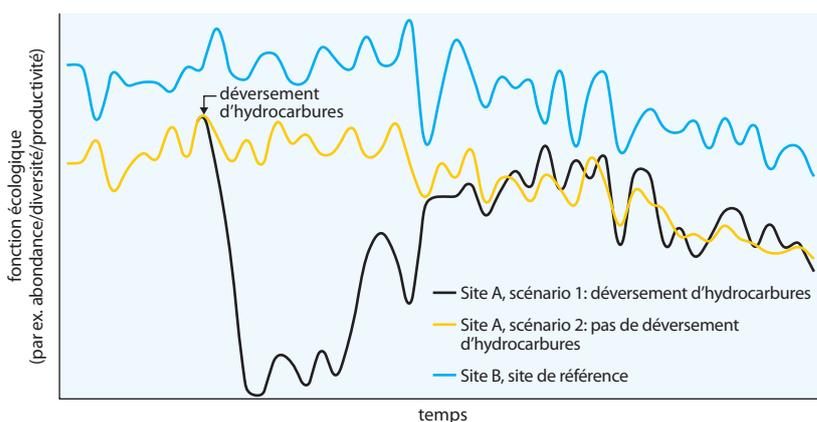
Image 3 Deux échantillons prélevés dans une mangrove à la suite d'un déversement sur une raffinerie au Panama en 1986



L'hydrocarbure déversé par une raffinerie au Panama a affecté les mangroves et pénétré les sédiments. Cette contamination persistante est devenue une source de pollution chronique impactant un récif corallien situé à proximité pendant plusieurs années.

Peu importe l'ampleur et l'intensité de l'impact, la régénération naturelle surviendra, bien que la question de la durée du processus se pose encore dans de nombreuses situations. Si l'identification des premières étapes de la régénération ne pose, en principe, aucun problème, la description précise des étapes suivantes s'avère plus compliquée. Dans la plupart des cas, il sera difficile de définir quand la régénération sera terminée, les scientifiques étant traditionnellement prudents dans leur analyse. L'absence de définition généralement acceptée de la phase de *recupération* ou de *régénération* constitue un problème majeur. Traditionnellement, et dans une large mesure aujourd'hui encore, les populations et communautés ont été décrites en termes d'abondance et/ou de biomasse de chaque espèce identifiable. Il est dès lors logique de décrire tout simplement la *régénération* comme le retour aux abondances préexistantes ou aux niveaux de biomasse pour chaque espèce. Cependant, les ressources biologiques et les nombreux facteurs environnementaux qui caractérisent les habitats biologiques évoluent constamment et de manière imprévisible. Pour cette raison, il se peut qu'une ressource endommagée ne puisse revenir à l'état dans lequel elle se trouvait avant le déversement ; de même, il est impossible de prédire exactement dans quel état se trouverait la ressource si elle n'avait pas été impactée par le déversement. Les définitions actuelles de la régénération renvoient souvent à la fonction écologique et/ou à la fonction écosystémique des espèces/de la population/ de la communauté dans son environnement au sens large. Deux fonctions de ce type, largement reconnues comme étant primordiales pour les communautés et les écosystèmes sont la biodiversité (la variété de la vie) et la productivité (la quantité de matière biologique générée par unité de temps).

Image 4 Exemple de fluctuations naturelles de la fonction écologique sur deux sites voisins et les impacts potentiels d'un déversement d'hydrocarbures, et les processus de régénération correspondants.



Les sites A et B possèdent des caractéristiques environnementales différentes, si bien que les mesures de la fonction écologique ne peuvent être comparées directement à un moment précis ; cependant, les tendances générales de la fonction sont similaires, permettant ainsi une évaluation de la régénération.

Impacts des déversements d'hydrocarbures sur la vie marine et la faune associée

Le plancton

Le plancton inclut les micro-organismes (bactérie, etc.), le phytoplancton (les algues microscopiques, souvent unicellulaires) et le zooplancton (de petits crustacés principalement, mais aussi les méduses et d'autres animaux), ainsi que les spores, les œufs et les larves d'autres plantes et animaux (algues, invertébrés et poissons). La densité en plancton est la plus élevée dans les eaux côtières, où les concentrations de nutriments sont suffisamment élevées pour soutenir leur croissance, et est proche des populations d'adultes. Cette biomasse importante et diffuse constitue la base de nombreux réseaux trophiques marins.

Les organismes planctoniques sont relativement sensibles aux effets toxiques d'une exposition aux hydrocarbures, en particulier aux fractions solubles dans l'eau et aux petites gouttelettes d'hydrocarbures ; en outre, des études de laboratoire ont décrit un large éventail d'effets aigus, chroniques et sublétaux sur diverses espèces et à divers stades de vie. Cependant, la plupart des études sur les communautés planctoniques naturelles en mer ont permis de mettre en évidence un retour rapide à des densités et des compositions de communauté normales, une fois que les concentrations en hydrocarbures dans l'eau sont revenues à un niveau normal. Leur capacité à récupérer si rapidement est due à un cycle de vie court, à la production d'un grand nombre d'œufs et de juvéniles, à une distribution sur de grandes surfaces et à une des circulations d'eau rapides. Peu d'études ont décrit des effets sur les densités d'espèces planctoniques durant plus de quelques jours ou quelques semaines. Par exemple, les études qui ont suivi le naufrage du pétrolier soviétique *Tsesis* en 1977, au cours duquel 1 000 tonnes de fioul moyennement lourd ont été déversées en mer Baltique, ont permis de mettre en évidence que la biomasse de zooplancton avait diminué sensiblement à proximité de l'épave pendant les premiers jours suivant le déversement, pour se restaurer naturellement dans un délai de cinq jours. La contamination du zooplancton par les hydrocarbures a été observée pendant plus de trois semaines ; selon certaines théories, une brève augmentation de la biomasse de phytoplancton et de la production primaire dans la zone touchée résultaient d'une diminution de l'alimentation du zooplancton.

Les inquiétudes à l'égard de certaines espèces et stades de vie vulnérables demeurent. Certaines espèces de poissons se composent de populations génétiquement isolées qui fraient dans des lieux précis et pondent des œufs ou des larves planctoniques potentiellement vulnérables. Si un déversement d'envergure avait lieu dans la même zone et en même temps que le frai ou le développement post-frai, une mortalité importante chez les œufs ou les larves pourrait être constatée. Eu égard à la grande quantité d'œufs produits par la plupart des poissons et la faible proportion devant survivre afin de maintenir les stocks adultes, il est peu probable qu'un déversement puisse avoir un impact significatif sur la population de poissons. Un exemple récent révélateur de telles préoccupations concerne le thon rouge de l'Atlantique Nord dans le golfe du Mexique; ils se reproduisent dans une zone qui chevauche partiellement la zone maritime contaminée par le pétrole déversé

Plancton de taille différente. Ceux évoluant à proximité de la surface sont vulnérables et sensibles à des concentrations élevées d'hydrocarbures sous une nappe de pétrole. Cependant, durant la plupart des déversements d'hydrocarbures, l'exposition du plancton est de courte durée et la régénération rapide.



Wellcome Images



lors de l'explosion du puits de *Macondo* en 2010, et pondent des œufs qui flottent en surface. Des études de laboratoire menées en Australie ont montré que les hydrocarbures peuvent affecter le développement des embryons de thon rouge du Sud, suggérant ainsi un mécanisme d'action potentiel. Cependant, les résultats des études sur le terrain traitant du thon rouge de l'Atlantique Nord dans le golfe du Mexique ne font état d'aucune preuve mettant en évidence cet effet.

Le benthos

Les sédiments, composés de mélanges variés d'argiles, de limons, de sable et de graviers, constituent la majorité des habitats sous-marins dans les zones offshore, alors que la roche-mère et les blocs rocheux sont plus courants près des côtes. La diversité des habitats y est aussi importante que sur terre. Certains habitats sont dominés, voire formés par certaines espèces ou certains groupes d'espèces, par exemple les forêts de varech, les herbiers marins, les lits de moules et les récifs coralliens.

Les algues et herbiers ne se trouvent que dans des eaux relativement peu profondes où il y a suffisamment de lumière (c'est-à-dire à quelques dizaines de mètres tout au plus), alors que les communautés animales peuvent La vulnérabilité aux hydrocarbures des communautés vivan dans les fonds marins en cas de déversements en surface dépend principalement de la profondeur de l'eau, les concentrations en hydrocarbures dissous ou dispersés issu de la nappe de surface qui seraient significatives pour l'écologie ne parviennent que très rarement en deçà de 10 mètres. En outre, il est rare que des concentrations élevées demeurent sur des zones spécifiques des fonds marins pendant longtemps. Lors de la dérive et du vieillissement de la nappe, l'éventualité d'atteindre des concentrations en hydrocarbures pouvant avoir des effets toxiques au niveau des fonds marins, même peu profonds, diminue au fil du temps. Par exemple, pendant la guerre du Golfe de 1991, les hydrocarbures déversés au nord du golfe Persique se sont déplacés vers le sud dans les eaux saoudiennes pour passer directement au-dessus des récifs coralliens peu profonds, sans effets visibles.vivre à toutes les profondeurs.

Les déversements au fond, en eaux profondes, sont susceptibles de générer des impacts plus importants sur les fonds marins, en fonction des circonstances. À l'occasion du déversement d'hydrocarbures issu du puits de *Macondo* dans le golfe du Mexique, des dispersants chimiques ont été appliqués au niveau de la tête du puits afin de favoriser la dispersion et augmenter la biodégradabilité de l'hydrocarbure. Les études ont montré que les courants d'eau profonde ont transporté les gouttelettes d'hydrocarbures au-dessus des fonds marins sur plusieurs kilomètres. Cependant, les concentrations en hydrocarbures étaient faibles ; un suivi minutieux du panache sous-marin a permis de déceler des niveaux d'hydrocarbures volatils à un maximum de 1,2 ppm (parties par million) à un peu plus d'un kilomètre de la tête de puits, et <0,1 ppm au-delà de 20 km de distance.

Les forêts de varech et les herbiers marins poussent aussi dans les eaux peu profondes et se caractérisent par une importante diversité biologique et une productivité très élevée. Les plantes ne sont pas particulièrement sensibles à des concentrations élevées d'hydrocarbures ; cependant, la plupart des animaux qui vivent dans ces habitats le sont, y compris les poissons juvéniles.





Les habitats des fonds marins à des profondeurs inférieures à 10 – 20 mètres ne sont pas ou sont peu vulnérables aux hydrocarbures dispersés issus de déversement de surface.

Les profondeurs sous-marines renferment aussi une grande diversité de la vie marine. Si elle n'est pas vulnérable aux déversements d'hydrocarbure, elle pourrait être potentiellement exposée aux hydrocarbures issus des déversements sub-superficiels.

À ce titre, les semi-volatils (composés organiques qui peuvent s'évaporer, quoique lentement, à température ambiante) présentaient des concentrations <0,5 ppm au maximum et <0,01 ppm au-delà de 10 km de distance. Si les poissons et les communautés benthiques peuvent donc avoir été exposés à des concentrations élevées, peu d'éléments prouvent que le pétrole dispersé pourrait contaminer les sédiments des fonds marins. Des études en laboratoire et les preuves empiriques montrent que si des dispersants n'avaient pas été utilisés, la plus grande quantité d'hydrocarbure serait remontée à la surface et l'exposition des fonds marins aurait ainsi été réduite, générant cependant des impacts plus importants sur les ressources de surface et côtières. Une analyse des bénéfices écologiques et économiques des différentes options de lutttes (voir la section intitulée *Gestion de la lutte contre le déversement d'hydrocarbure et impact potentiel* aux pages 39 à 43) a permis d'établir que le compromis était judicieux, bien qu'il n'existe pas de consensus sur le sujet. Les événements qui pourraient contaminer le plancher océanique en eaux profondes sont notamment les déversements d'hydrocarbures lourds qui, en vieillissant, peuvent s'immerger comme décrit aux pages 12-13.

Dans le cas peu probable de concentrations élevées en hydrocarbures dans la colonne d'eau jusqu'au fond, tous les organismes directement exposés seront vulnérables, y compris les plantes et les animaux qui vivent sur le plancher océanique, connus sous le nom d'*épifaune benthique*, et les animaux fouisseurs qui créent des circulations d'eau dans leurs terriers ou sur leurs tissus aux fins d'alimentation ou d'irrigation. La plupart des autres animaux qui vivent dans les sédiments seront partiellement protégés, sauf si l'hydrocarbure pénétraient les sédiments de manière significative, ce qui ne se produit que dans des circonstances particulières (voir *Sédimentation* à la page 12).

L'épifaune benthique en eaux peu profondes peut être vulnérable à des concentrations en hydrocarbures à proximité du fond. Cependant, une grande partie de cette faune sera relativement insensible à des concentrations même élevées dans la mesure où la durée d'exposition est généralement brève. Les effets des hydrocarbures sur les macroalgues, comme le varech et les nombreuses autres espèces qui dominent les substrats solides dans les eaux peu profondes sont limités, en raison de leur revêtement mucilagineux qui résiste à l'absorption des hydrocarbures. De nombreux invertébrés sessiles survivront à ces concentrations élevées sans conséquence apparente, y compris ceux se nourrissant par filtration ou capturant les particules de la colonne d'eau et de fait en contact direct avec les gouttelettes d'hydrocarbures, comme les éponges et les ascidies. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces animaux sont exposés à une concentration élevée d'hydrocarbures sur une courte durée (tel que mentionné dans la section sur les *Impacts*



NOAA/MBARI

écologiques et régénération des écosystèmes, aux pages 15-19), qui n'est pas létale. Les moules fournissent un autre exemple : elles prélèvent des hydrocarbures depuis la colonne d'eau et l'accumulent dans leurs tissus, tout en demeurant résistantes à ses effets toxiques. Un certain nombre d'effets sublétaux sur la croissance, la reproduction et d'autres effets sur les tissus ont été constatés, cependant, une fois l'hydrocarbure éliminé et les tissus nettoyés (un processus appelé dépuración, qui peut nécessiter des mois) elles en ressortiront indemnes, avec aucun effet visible à l'échelle de la population.

Néanmoins, certains groupes d'animaux évoluant dans les fonds marins sont sensibles à des expositions même très courtes ou à des concentrations relativement faibles d'hydrocarbures dans l'eau, en particulier les bivalves fouisseurs et les petits crustacés nommés amphipodes

Certains bivalves filtreurs qui vivent dans les sédiments à proximité des côtes vont réagir à une exposition aux hydrocarbures dans l'eau en s'éjectant du sédiment. À la suite de plusieurs déversements côtiers, un grand nombre de bivalves affectés, par exemple des coqueaux et des coques, ont été rejetés sur la côte, pour se regrouper ensuite le long du rivage. Certains bivalves peuvent vivre pendant de nombreuses années, voire des décennies ; en outre, si une proportion notable de leur population périssait, la récupération de la population pourrait nécessiter un certain temps. D'autres animaux vivants dans les sédiments qui génèrent un courant d'eau dans leurs terriers, comme les spatangoïdes et les corystes, se sont échoués sur les plages à la suite de déversements d'hydrocarbure.



Certains amphipodes (dont il existe un grand nombre d'espèces, adaptées à une grande variété d'habitats) sont également filtreurs, de nombreuses études faisant état d'impacts au niveau de la population, liés à un déversement d'hydrocarbures. Certains amphipodes sont souvent utilisés dans le cadre d'études sur la toxicité des sédiments, dans la mesure où ils constituent de bons indicateurs de contamination. Les amphipodes évoluant dans les eaux peu profondes des zones tempérées et tropicales ont en principe une courte durée de vie, donnant naissance à plusieurs générations par an ; la récupération de leurs populations est ainsi très rapide. Cependant, durant le déversement d'hydrocarbure de l'*Amoco Cadiz* survenu en 1978, une chute très importante et relativement localisée des densités jusqu'ici très élevées d'un amphipode (*Ampelisca*) a été observée ainsi qu'un changement significatif dans la communauté. Le retour à des densités d'amphipodes et des structures communautaires identiques à celles avant le déversement a pris 15 ans.

Des impacts sur les populations d'amphipodes et des bivalves fouisseurs situés à proximité des côtes ont été observées après plusieurs déversements côtiers ; cependant, peu d'effets ont pu être observés sur les communautés benthiques. Dans une certaine mesure, ceci pourrait être dû aux difficultés logistiques inhérentes à l'échantillonnage et à la conservation des données avant le déversement nécessaire pour la comparaison. Ce n'était cependant pas le cas lors du naufrage du *Sea Empress* survenu en 1996 dans le sud-ouest du Pays de Galles, Royaume-Uni où un certain nombre de programmes de surveillance étaient déjà mis en œuvre sur ce site depuis de nombreuses années. Environ la moitié des 72 000 tonnes d'hydrocarbure brut déversées a été naturellement et chimiquement dispersée, et les études menées sur les fonds marins indiquent une réduction significative de la densité de petits crustacés (amphipodes et cumacés) à proximité de l'épave. Aucun autre effet notable sur les communautés benthiques n'a été observé cependant. Certains suivis écologiques indiquent une tendance nette à la régénération des amphipodes dans les cinq ans après le

Un grand nombre de coqueaux, de palourdes et d'autres animaux fouisseurs se sont éjectés d'eux-mêmes des sédiments subtidiaux après une exposition à des concentrations élevées d'hydrocarbures lors du naufrage du Sea Empress en 1996. Certains se sont échoués sur les plages situées à proximité.

Un grand nombre d'organismes vivants dans les eaux peu profondes ont péri sous l'effet du fioul domestique naturellement dispersé suite au naufrage du North Cape en 1996.

déversement, avec des densités similaires aux niveaux pré-déversement en 2000. Un grand nombre de bivalves et d'oursins-cœur se sont échoués sur les plages, les études post-déversement indiquaient cependant qu'une part importante de la population avait survécu. Il n'existait aucune preuve de contamination persistante par l'hydrocarbure brut ; cependant de récentes études scientifiques des sédiments des fonds marins menées à Milford Haven ont permis de constater l'existence de concentrations de fioul lourd également déversé lors du naufrage du pétrolier. À ce jour, aucune étude n'a été menée pour évaluer si ces concentrations présentent une toxicité chronique.



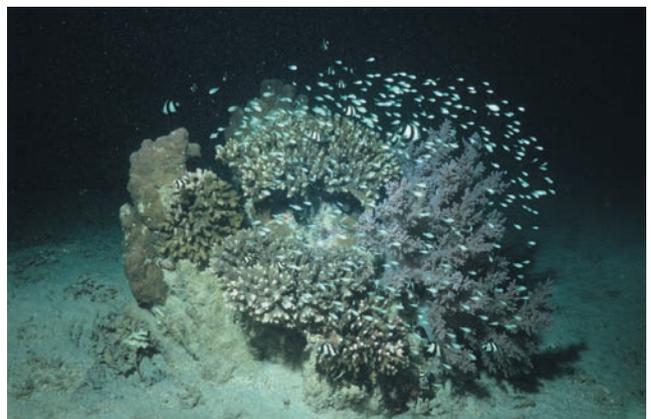
Dr Erich Gundlach, E-Tech

D'autres organismes benthiques ont pu être significativement impactés par certains déversements, où la combinaison de fortes concentrations et longue durée ont été la cause d'une mortalité significative. L'exemple a eu lieu avec le *North Cape*, un chaland-citerne qui s'est échoué sur la côte de Rhodes Island, aux États-Unis, en 1996, déversant environ 3 100 mètres cubes de fioul domestique, un produit relativement léger. Un grand nombre de homards juvéniles, des palourdes et d'autres espèces ont péri après avoir été exposés à des concentrations élevées d'hydrocarbure naturellement dispersées. La plupart des impacts ont été observés dans les zones côtières, à seulement quelques mètres de profondeur. Les homards adultes n'ont pas été affectés de manière significative car ils ont migré vers des eaux plus profondes en vue de l'hiver lorsque le déversement est survenu ; dès lors, la production de larves de homards censée soutenir la récupération de la populationne devait pas être affectée.

Néanmoins, avec près de trois millions de homards juvéniles échoués, près d'un cinquième ayant entre deux et sept ans, la période de récupération était estimée à plusieurs années. Bien qu'un programme de repeuplement ait été mis en place, les études ont montré que la récupération serait plus compliquée que prévu en raison de la surexploitation halieutique et d'autres impacts. La récupération des populations de palourdes était également annoncée comme difficile et nécessitant plusieurs années, et un programme de restauration pour des espèces variées étant alors mis en place.

Les récifs coralliens tropicaux peuvent former de vastes zones où la biodiversité est importante dans les eaux peu profondes, ces organismes sont à la fois vulnérables et sensibles aux déversements d'hydrocarbures.

Des récifs coralliens tropicaux ont également été impactés dans certains cas, les effets à long terme se faisant ressentir dans les zones où la mortalité des coraux était élevée. Si la sensibilité varie selon les espèces de corail, la plupart semblent néanmoins ne pas être sensibles aux pics de concentrations en hydrocarbures. Les récifs situés à plus de 10 mètres de profondeur ne sont pas susceptibles d'être exposés aux hydrocarbures lors du passage d'une nappe de surface générant des impacts significatifs. Parfois, ce sont d'autres invertébrés associés aux récifs qui sont plus impactés que le corail lui-même, alors que dans d'autres cas, aucun impact significatif n'est observé. Un des déversements tropicaux les mieux étudiés est survenu en 1986 dans une raffinerie de



Panama, où 38 000 tonnes d'hydrocarbures brut moyen ont été déversés d'un réservoir de stockage, affectant les récifs coralliens des eaux intertidales peu profondes. Les coraux ont subi des dommages importants jusqu'à des profondeurs d'eau d'environ six mètres, la régénération s'avérant lente en raison des apports constants chroniques d'hydrocarbures provenant de sédiments souillés dans une mangrove située à proximité.

Dans le cadre de l'étude TROPICS menée en 1984, des essais à grande échelle ont été réalisés pour comparer les effets des hydrocarbures dispersés chimiquement avec ceux des hydrocarbures non dispersés. Les résultats à court terme (un an) ont montré une diminution de la couverture corallienne, et des populations d'autres invertébrés et de poissons territoriaux sur le site où les hydrocarbures ont été dispersés. Une diminution moins intense de la couverture corallienne a également été constatée à court terme sur le site où les hydrocarbures n'ont pas été dispersés. L'étendue de la couverture corallienne a par la suite augmenté sur les deux sites. À l'inverse, les impacts à long terme sur les mangroves, dans le site où les hydrocarbures n'ont pas été dispersés sont bien plus graves.

Lorsque des quantités significatives d'hydrocarbures se mélangent aux sédiments, ou lorsque des résidus immergés d'hydrocarbures forment une couche sur le fond marin, ceux-ci peuvent persister pendant des années dans la mesure où la biodégradation est ralentie due à une carence en oxygène. La toxicité de l'hydrocarbure peut affecter la faune benthique, et les hydrocarbures immergés d'hydrocarbure peuvent également constituer un obstacle à la colonisation. Avec le temps, la toxicité diminuera alors que les hydrocarbures se dégradent. Un niveau de toxicité résiduelle pourra néanmoins perdurer sous la surface. Le déversement d'hydrocarbures lors du naufrage de l'*Amoco Cadiz* en 1978 constitue le cas le plus grave jamais répertorié. Les concentrations en hydrocarbures dans les sédiments argileux de deux estuaires ont atteint des niveaux si élevés, qu'une espèce de vers polychètes opportunistes ont dominé l'écosystème pendant plusieurs années avant que la toxicité des sédiments ne finisse par retomber. Les hydrocarbures ont également causé la détérioration de tissus ainsi que d'autres effets sublétaux sur une espèce de poissons plat, effets toujours visibles huit ans après. D'autres exemples peuvent être cités, avec des concentrations dans les sédiments moins importantes et des impacts plus légers : les herbiers en eaux peu profondes impactés par le naufrage de l'*Exxon Valdez* en 1989, et les sédiments plus profonds (30 mètres) impactés par le naufrage du *Tsesis* en 1977 en mer Baltique. Des exemples d'impacts liés à des hydrocarbures immergés ont été constatés en 1991 lors du naufrage du *Haven* au large de Gênes, en Italie, où de grandes quantités de résidus de brûlage générés par l'explosion et l'incendie du navire se sont déposés sur les fonds marins en formant une couche solide ensuite partiellement colonisés par l'épifaune benthique. Des études ont également permis de mettre en évidence des effets toxiques sublétaux dans les tissus des poissons plats prélevés dans cette zone. Malgré tout, cet exemple n'est pas représentatif de l'impact des résidus du brûlage in-situ contrôlé. Dans ce cas, l'hydrocarbure flottant est contenu et brûlé sur des zones plus étendues, ce qui limite la concentration en résidus dispersés qui pourraient atteindre les sédiments.

Les communautés benthiques arctiques se différencient significativement de celles des mers chaudes : la proportion des espèces à longue durée de vie et à croissance lente y est plus élevée. En l'absence d'étude de cas, il est difficile de faire des prévisions fiables sur les impacts des hydrocarbures dans de tels habitats. Cependant, les études des communautés benthiques, menées à l'occasion du déversement d'hydrocarbures de Baffin Island (voir page 42), ont permis d'observer que les effets des hydrocarbures dispersés ou non dispersés étaient limités, avec aucun effet visible sur le site le plus touché après deux ans. Certains auteurs considèrent que les communautés benthiques des mers polaires pourraient être plus sensibles aux hydrocarbures que ceux des climats tempérés. Toujours est-il qu'en cas d'impact, la régénération de ces communautés pourrait s'avérer plus long en raison de la lenteur des processus écologiques. Une étude, menée sur le déversement de diesel lors du naufrage du *Nella Dan* en 1987 dans la zone australienne de l'Antarctique, a montré que ce déversement a provoqué des mortalités élevées au sein des communautés d'invertébrés des habitats rocheux des eaux intertidales et subtidales peu profondes. Les communautés intertidales se sont régénérées rapidement. Mais les communautés inféodées aux algues ont présenté des impacts à plus long terme. Sept ans après le déversement, la structure de la communauté inféodée aux algues, sur les sites gravement contaminés, présentait des niveaux modérés de régénération, notamment pour les espèces sensibles.

De même, la régénération des communautés benthiques en eaux profondes, caractérisées par des espèces à longue durée de vie, pourrait prendre beaucoup de temps. Les études conduites dans le golfe du Mexique à la suite du blowout du puits de *Macondo* en 2010 ont permis d'identifier des zones à proximité de la tête du puits où les sédiments étaient contaminés durant la première année, et où la diversité au sein des communautés benthiques était réduite et où subsistait un faible nombre de coraux d'eau froide en mauvais état. Toutefois, la plupart des coraux d'eau froide n'ont pas été affectés par l'incident, les preuves n'étant aujourd'hui pas assez nombreuses pour tirer des conclusions définitives sur les effets à long terme ou des conclusions générales sur les impacts des déversements sous-marins sur les fonds marins.

Les poissons et les ressources halieutiques

La présente section traite des poissons et de certains crustacés et mollusques capturés dans le cadre de la pêche. Les crustacés et mollusques, présents en grande quantité dans les communautés benthiques, sont traités ci-dessus. Relativement peu d'espèces de poissons différentes sont capturées pour les besoins de la pêche commerciale, cependant ces espèces jouent un rôle dans un ou plusieurs réseaux trophiques de l'écosystème. La plupart, mais non l'ensemble des poissons pourront être classés dans l'une des trois catégories écologiques suivantes – pélagique, benthiques ou démersaux :

- Les poissons *pélagiques*, qui incluent les anchois, le hareng, le thon et le calmar, vivent en eau libre, se nourrissent habituellement de planctons et d'autres petits poissons et ont tendance à être très mobile. Une grande partie de ces espèces sont migratoires, se déplaçant vers différentes zones au fil des saisons ou des stades de leur cycle de vie.
- Les poissons *démersaux*, comprenant la morue, le sébaste, le labre et beaucoup de requins. Ils évoluent principalement à proximité des fonds marins où ils se nourrissent ; cependant, ils peuvent également évoluer plus haut dans la colonne d'eau. Ils ne sont pas aussi mobiles que les espèces pélagiques ; alors que certaines sont migratoires, la plupart d'entre elles passent de longues périodes dans la même zone.
- Les poissons *benthiques*, qui incluent les poissons plats, les poissons-chats, le grondin et de nombreux coquillages, évoluent dans les fonds marins. Ils nagent que très rarement vers les eaux moins profondes. Ils sont généralement moins actifs que les poissons pélagiques et démersaux et sont attachés à une zone particulière.

Un autre classement écologique différencie les poissons anadromes des poissons catadromes qui incluent le saumon, l'esturgeon et l'anguille et qui migrent respectivement vers les eaux douces ou les mers pour se reproduire. Ces classements sont particulièrement utiles lorsqu'il s'agit d'analyser la vulnérabilité dans différents cas de déversement d'hydrocarbures.



Comme décrit précédemment pour des organismes benthiques, la probabilité qu'un poisson ou un crustacé soit exposé à des hydrocarbures dissous ou dispersés dans l'eau lors d'un déversement en surface, dépend largement de la profondeur à laquelle il évolue. Pour cette raison, de nombreux pays permettent seulement l'application de dispersants chimiques sur une nappe de surface dans les zones où la profondeur de l'eau est supérieure à 10 – 20 mètres, sans qu'il soit nécessaire de réaliser des études détaillées sur certaines ressources marines. La raison est que la dispersion des hydrocarbures dans les eaux profondes ne devrait pas affecter les populations de poissons ou les autres ressources évoluant dans ces zones ; par exemple, les espèces benthiques et démersales évoluent à des profondeurs plus élevées que là où les concentrations élevées d'hydrocarbure peuvent se rencontrer ; de leur côté, les poissons pélagiques évitent les eaux de surface pour ne pas s'exposer au risque de prédation par les oiseaux. Ils sont si mobiles qu'une exposition prolongée à des concentrations élevées en hydrocarbures demeure peu probable. En outre, certaines études sur des saumons en migration contaminés et des essais en laboratoire ont permis d'établir que les poissons peuvent détecter (en utilisant les récepteurs sensoriels de leur ligne latérale le long de leurs flancs) les eaux contaminées par les hydrocarbures et les éviteront. Cependant, certaines observations indiquent que d'autres stimuli pourraient neutraliser ces capacités d'évitement. Quelle qu'en soit la raison, la probabilité d'une mortalité des poissons lors d'un déversement d'hydrocarbures en eau libre est limitée, que des dispersants chimiques soient appliqués ou non. Aucune étude ne rapporte une mortalité significative de poissons dans les zones offshore, et seules de très rares études y font référence dans les zones côtières.

Comme mentionné dans la section sur les organismes benthiques (pages 21 – 26), les éruptions incontrôlées de puits (blowout) survenant au fond pourraient exposer les poissons des eaux profondes aux hydrocarbures, le potentiel d'effets toxiques demeurant inconnu. En outre, nos connaissances sur la biologie des poissons d'eaux profondes et leur réaction à la contamination par hydrocarbures demeurent limitées. Le suivi environnemental lié au blowout en eau profonde de *Macondo* en 2010 a permis l'observation d'un panache sous-marin environ 300 m au-dessus du fond, où la concentration en hydrocarbures s'élevait à environ 1 ppm à 1 km de la tête du puits et à <0.1 ppm à 20 km, aussi, ces niveaux se sont maintenus durant tout le déversement. Les données sur les effets d'un déversement d'hydrocarbures en milieu arctique sur les poissons sont trop limitées pour tirer des conclusions sur la vulnérabilité relative et leur potentiel de récupération. Les études toxicologiques, montrent que les espèces arctiques nécessitent de plus longues périodes pour présenter des symptômes liés à l'exposition aux hydrocarbures, cependant leur sensibilité demeure similaire à celles des espèces des régions tempérées.

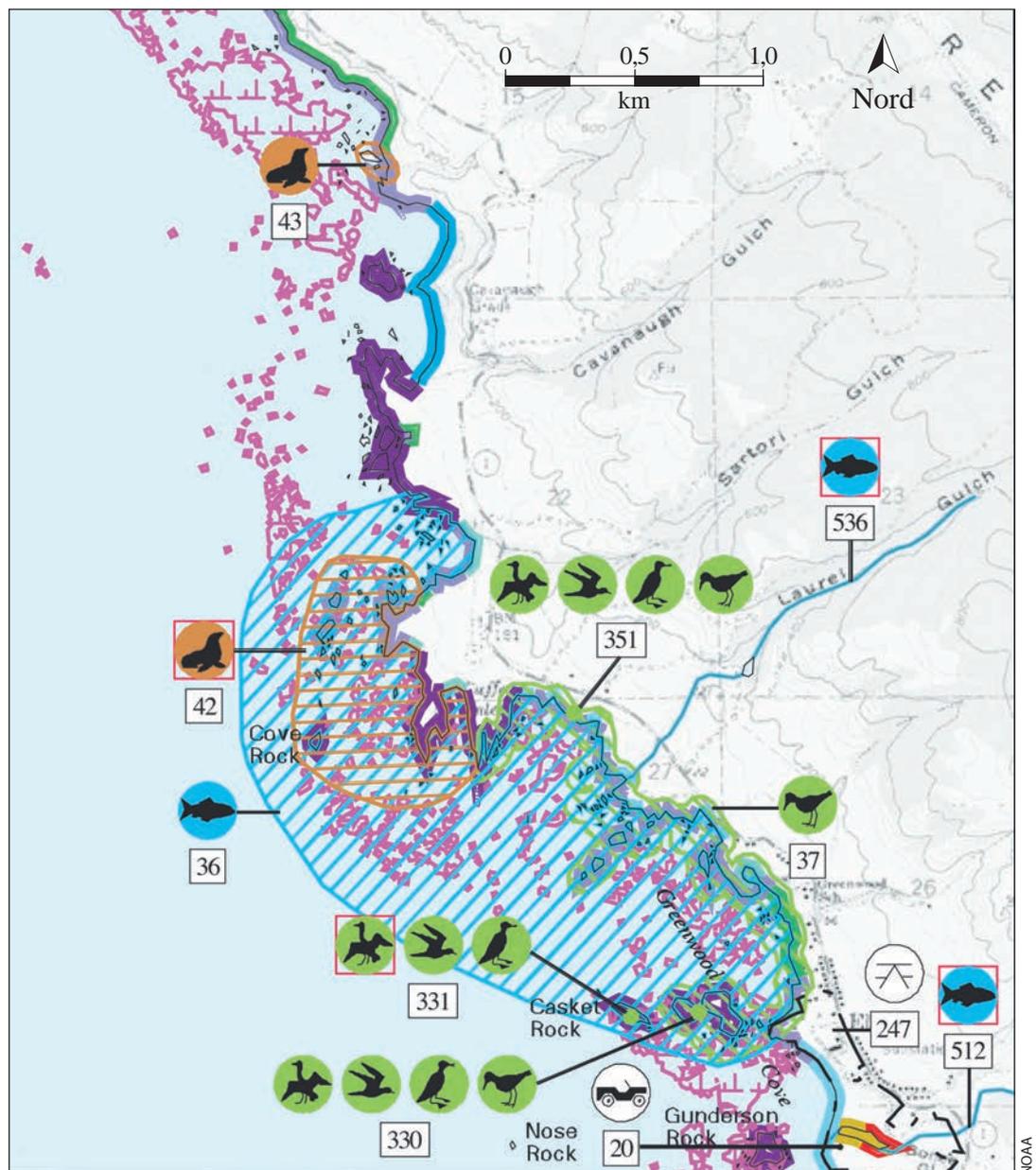
Le risque d'exposition sera plus élevé dans le cas où le déversement surviendrait dans des eaux peu profondes mais aussi lorsque la vitesse de dilution des concentrations d'hydrocarbure est réduite, par exemple dans les lagons, les estuaires et les baies. D'autres facteurs, décrits dans la section sur le devenir des hydrocarbures (pages 9 à 14) agiront également sur les concentrations disponibles en hydrocarbures dissous ou dispersés. De nombreuses espèces de poissons démersaux et benthiques évoluent dans des habitats aux eaux peu profondes, alors que d'autres ne migrent vers ces eaux peu profondes que pour se reproduire et/ou frayer. Certaines espèces sont territoriales, notamment pendant la période de reproduction, si bien qu'il est très peu probable qu'elles migrent même si elles en ont la possibilité. Un grand nombre d'espèces migratoires traversera des habitats côtiers en eaux peu profondes à certains moments de l'année, les rendant d'autant plus vulnérables à un déversement qui surviendrait pendant ces périodes. Les juvéniles de nombreux poissons, y compris les nombreuses espèces commerciales, sont concentrés dans les habitats des eaux peu profondes comme les herbiers marins, les forêts de varech et les mangroves, où la nourriture est abondante et où ils peuvent se cacher des prédateurs. Ces zones de reproduction sont mises en évidence sur les cartes de vulnérabilité aux déversements d'hydrocarbure afin de favoriser leur protection par les décideurs lors de la mise en place de la lutte. Les tests de toxicité effectués en laboratoire ont montré que les œufs, les larves et les juvéniles de poissons, à l'instar de ceux des autres animaux, sont généralement plus sensibles à des hydrocarbures que les adultes.

Chaque stade de vie de la plupart des espèces de poisson évolue dans un habitat spécifique. Les poissons juvéniles de nombreuses espèces passent les premiers mois de leur vie dans les habitats végétaux en eaux peu profondes (<10 mètres) afin d'éviter les prédateurs. Ces zones seront vulnérables aux nappes d'hydrocarbures en surface.



Un déversement côtier générant des concentrations élevées et durables d'hydrocarbures dans les eaux côtières présente un risque plus élevé de produire des effets toxiques sur les ressources halieutiques. De tels déversements sont survenus en 1969 lors du naufrage de la barge *Florida* à Buzzards Bay, dans le Massachusetts, qui a eu lieu lors d'une tempête, entraînant le déversement de 570 tonnes de fioul domestique de type 2 dans les eaux côtières peu profondes et provoqua une mortalité massive de petits poissons (non-commerciaux) et d'invertébrés évoluant dans les fonds marins. Le naufrage de l'*Amoco Cadiz* en 1978, en Bretagne, en France, a entraîné le déversement de 221 000 tonnes d'hydrocarbures légers dans les eaux

Image 5 Une carte de sensibilité environnementale du nord de la Californie. La zone bleue hachurée est une zone connue pour accueillir des sébastes juvéniles – pour plus d'informations, consultez le site internet de la NOAA sur les cartes d'indice de sensibilité environnementale (ESI)



côtières et une mortalité massive de labres et de lançons. Les études sur les populations de poissons ont montré que l'intégralité d'une classe d'âge de carrelets et de soles juvéniles (tous deux des poissons plats) a péri dans au moins une zone ; il n'existe cependant aucune preuve d'impacts subséquents sur les ressources halieutiques. Le naufrage du *North Cape* en 1996, décrit à la page 24, a aussi provoqué des cas de mortalité de poissons.

Aucun des déversements ci-dessus et aucun des autres déversements décrits dans la littérature disponible, n'ont eu d'impacts substantiels sur les stocks de poissons commerciaux. Ce n'est guère étonnant, même dans l'hypothèse catastrophique d'un déversement d'hydrocarbures d'envergure coïncidant avec un frai isolé géographiquement, il est très peu probable qu'une part importante des stocks adultes s'expose à une dose létale d'hydrocarbures. Même s'il est très probable qu'un nombre important d'œufs, de larves ou de juvéniles périssent, la stratégie reproductive des poissons tolère des pertes importantes de jeunes adultes. Ainsi toute réduction du nombre de jeunes adultes passera ne sera pas détectée compte tenu des fluctuations naturelles de la population.

Cependant, le sort du hareng du Pacifique à la suite du naufrage de l'*Exxon Valdez* survenu en 1989 en Alaska a conduit à la théorie selon laquelle les déversements d'hydrocarbures pourraient avoir des impacts graves sur les ressources halieutiques. Le hareng du Pacifique pond ses œufs sur des lits de varech dans les eaux peu profondes des zones côtières, et certaines de ces zones de reproduction ont été exposées à des hydrocarbures déversés lors du naufrage de l'*Exxon Valdez*. Quatre années plus tard, alors que cette génération atteignait l'âge adulte, les stocks de harengs ont chuté, le déversement d'hydrocarbures fut considéré par beaucoup comme en étant la principale cause. De nombreuses années de recherche ont permis d'établir que les maladies et l'alimentation appauvrie en constituaient néanmoins la principale cause et que le déversement d'hydrocarbures n'avait eu aucun effet significatif.

Les impacts des déversements d'hydrocarbures sur les populations localisées de poissons ou de crustacés moins mobiles n'ont été que rarement décrits. Cependant, le retour à l'état normal est en principe rapide à moins que le recrutement ne soit lent, que les espèces vivent longtemps ou que la contamination par les hydrocarbures persiste. Par exemple, des concentrations élevées en hydrocarbures lors du naufrage du *Braer* en 1993 ont causé la mort de tous les petits poissons territoriaux côtiers (motelle et loquette) à proximité du site de l'épave ; cependant, un an plus tard la recolonisation avait commencé. À la suite du déversement survenu en 1991 lors de la Guerre du Golfe, les stocks de crevettes d'Arabie Saoudite ont chuté de 25 % par rapport à leur niveau d'avant-guerre, du fait de l'échec de la reproduction. Le déversement a été considéré comme la cause principale, cependant le mécanisme de l'échec n'a pu être déterminé, bien que beaucoup de théories aient été émises. Cet effet fut localisé, dans la mesure où les pêcheries du Koweït ont enregistré de bons résultats en 1992 et 1993. En revanche, des études conduites après le blowout du puit de *Macondo* en 2010 dans le golfe du Mexique, dans les herbiers marins situés dans les eaux côtières peu profondes, ont montré que les hydrocarbures n'avaient eu aucun effet sur beaucoup de juvéniles. Cependant certaines études montrent qu'ils auraient bénéficié de la fermeture de la pêche. Lors de cet accident, l'efficacité de la lutte sous-marine et offshore a contribué de manière significative à la protection des populations de poissons dans les eaux côtières peu profondes.



La mortalité du labre résultait de concentrations trop élevées d'hydrocarbure dans l'eau à proximité de l'épave à l'occasion du naufrage du Braer en 1993.

Les effets sublétaux de l'hydrocarbure sur les poissons et les crustacés ont été décrits dans le cadre d'expériences en laboratoires et sur des prélèvements réalisés dans les zones affectées par les déversements d'hydrocarbures. Les effets décrits expérimentalement comprennent : des impacts variés sur la reproduction (par ex. l'éclosion des œufs, la survie larvaire et les anomalies dans le développement larvaire), sur les fonctions physiologiques (par ex. les vitesses de nage ou d'alimentation), sur la détérioration des tissus (par ex. des maladies cutanées et le nombre de globules rouges), sur les biomarqueurs de l'exposition et sur bien d'autres encore. Cependant, il convient de garder à l'esprit que les études de laboratoire ne sauraient reproduire de manière précise les concentrations en hydrocarbures et les durées d'exposition existantes sur le terrain, et que seulement une faible partie des effets mentionnés ont pu être identifiés sur le terrain après des déversements. Les biomarqueurs de l'exposition à l'hydrocarbure ont pu être décelées sur de nombreuses espèces à la suite de nombreux déversements. Mais les lésions graves sur des poissons sont limitées à la détérioration des tissus des poissons plats et d'autres poissons benthiques, chroniquement exposés à des résidus d'hydrocarbures persistants. Par exemple, des études récentes sur de petit poissons killi (cyprinodontes ovipares) des marais salés pollués par la marée noire de *Macondo* en 2010 ont permis de collecter certaines observations des effets sur la morphologie des tissus. Cependant, une autre étude n'a fait état d'aucune différence dans la composition, l'abondance et la taille des espèces des poissons des marais salés entre les sites contaminés et les sites non-contaminés de Louisiane, deux ou trois ans après le déversement.

Des impacts indirects sur les populations de poissons comme la disponibilité réduite des aliments ont également été considérés, notamment si les proies principales (par ex. les amphipodes) d'une espèce ou d'un stade de vie était gravement affectée par un déversement. De tels impacts n'ont pas été décrits ou identifiés du fait de l'existence de variations naturelles. En outre, il est probable que de tels impacts, s'ils survenaient, demeureraient limités.

S'agissant des pêcheries, une des plus grandes inquiétudes lors d'un déversement d'hydrocarbures concerne le potentiel d'altération de la chair des poissons, situation dans laquelle les hydrocarbures absorbés par les tissus du poisson ou du crustacé sont perceptibles au goût ou à l'odorat (tainting). L'altération de la chair est perceptible à des niveaux de concentration très bas dans les tissus. Elle génère un goût très désagréable rendant le poisson immangeable et donc impropre à la commercialisation. Cela peut engendrer des pertes économiques mais ne saurait affecter les populations ou les fonctions écologiques. Les hydrocarbures sont en principes métabolisés par les poissons en quelques jours ou quelques semaines, les stocks perdant alors le goût et l'odeur d'hydrocarbures. Ce processus demande plus de temps pour les poissons gras comme le saumon. En ce qui concerne les crustacés et les mollusques, qui ne sont pas en mesure de métaboliser rapidement les hydrocarbures, le processus s'avérera plus lent et l'altération pourrait persister pendant des mois voire des années.

Les mammifères marins

Les mammifères marins, y compris les cétacés (baleines et dauphins), les phoques, les lamantins et les loutres, sont des animaux difficiles à étudier en raison de la réticence compréhensible des chercheurs à les capturer ou de leur nuire de quelque façon dans le cadre de la collecte d'informations. Les données empiriques sur les effets des déversements d'hydrocarbure sont donc limitées, beaucoup s'appuyant sur l'observation à distance et l'analyse des cadavres. Cependant, s'agissant des mammifères marins, le nombre de cadavres identifiés pouvant être raisonnablement attribués aux impacts des déversements d'hydrocarbures est faible. La plupart des études les plus détaillées sur les mammifères marins ont été réalisées en Alaska après le naufrage de l'*Exxon Valdez* en 1989.

L'exposition aux hydrocarbures liquides en surface ou sur la côte constitue le principal risque, et les mammifères marins les plus vulnérables à un déversement sont les loutres de mer et, dans une moindre mesure, les phoques. Même de petites quantités d'hydrocarbures souilleront rapidement la fourrure des loutres et réduiront ses propriétés isolantes et son imperméabilité. L'animal tentant de faire sa toilette pourra aussi ingérer de



La vulnérabilité des épaulards, des dauphins et des autres cétacés aux déversements d'hydrocarbure est plutôt faible.

l'hydrocarbure, ce qui pourrait provoquer des dommages internes. À la suite du sinistre de l'*Exxon Valdez*, au moins mille loutres de mer ont été souillées et 871 cadavres collectés. Le rétablissement de la population s'est avéré compliqué car, à l'instar de tous les autres mammifères, la population régionale se composait de nombreuses populations locales, chaque population présentant ses propres dynamiques sociales et démographiques, et étant soumis à des facteurs environnementaux localisés. Certaines populations locales se sont rétablies après seulement quelques années, alors que d'autres ont eu besoin de plus de temps ; dans au moins une zone, les populations ont diminué pour des raisons moins évidentes, qui peuvent ne pas être liées au déversement. Les preuves recueillies dans le cadre de l'étude des biomarqueurs à la suite d'exposition continue de loutres aux HAP, et ce jusqu'à neuf ans après le déversement, ont été mises en relation par certains chercheurs à la présence de résidus persistants d'hydrocarbures dans la zone intertidale. Cependant, ces résidus ne présentaient plus une toxicité et une biodisponibilité suffisante pour avoir un effet écologique significatif. Les loutres ont également été une source d'inquiétudes dans le cadre d'autres déversements, par exemple en 1993 lors du naufrage du *Braer* dans les îles Shetland. Cependant, les impacts identifiés dans le cadre de ce déversement étant relativement limités. Les populations européennes de loutres pourraient s'avérer moins vulnérables aux déversements en mer dans la mesure où elles évoluent principalement en eau douce.



À gauche : beaucoup de loutres vivent sur la côte, leur fourrure s'imprègne facilement des hydrocarbures, à la surface de l'eau ou sur la côte.

Les phoques, les lions de mer et les autres pinnipèdes ne comptent pas sur une longue fourrure pour s'isoler ; néanmoins, la plupart des phoques ont des poils courts qui peuvent être souillés par les hydrocarbures. Leurs corps, particulièrement ceux des espèces restant la plupart du temps dans l'eau, est dès lors relativement insensible aux hydrocarbures. Tous les pinnipèdes passent cependant au moins un certain temps sur la côte, souvent regroupées en échoueries bien implantées, où ils seront plus vulnérables à tout hydrocarbure arrivant à la côte. Une souillure grave par un hydrocarbure visqueux pourrait ainsi affecter gravement tout individu ayant eu la malchance d'être touché. Les cadavres englués d'un petit nombre de phoques, et notamment de nouveau-nés, ont été signalés lors de plusieurs déversements, leur nombre étant néanmoins insuffisant pour avoir des effets significatifs sur les populations. Dans certains cas, les autopsies ont permis d'établir que les



Ci-dessous : les pinnipèdes, comme ces otaries à fourrure de Nouvelle-Zélande, se hissent sur les côtes pour se reposer entre les périodes d'alimentation.



Les nouveau-nés de certaines espèces de phoques passent plusieurs jours ou semaines sur la côte avant d'être prêts à nager et sont potentiellement vulnérables à tout hydrocarbure arrivant à la côte.

animaux étaient déjà morts pour d'autres raisons, avant d'avoir été souillés par l'hydrocarbure. Un effet subléthal plus courant des déversements d'hydrocarbures sur les pinnipèdes résulte de l'exposition des zones sensibles de la peau (muqueuses) aux hydrocarbures encore frais présents à la surface de l'eau. Des cas d'animaux présentant une inflammation des yeux et du nez ont été signalés après un certain nombre de déversements, bien que l'incidence naturelle des maladies respiratoires puisse compliquer l'interprétation. Le déversement d'hydrocarbures du *San Jorge* en 1997 en Uruguay a provoqué la contamination d'une importante colonie de phoques à fourrure, générant une inquiétude au sujet des impacts et des perturbations potentielles résultant des techniques agressives de nettoyage du littoral. Bien que le déversement ait entraîné la mort d'environ 5 000 nouveau-nés, cette mortalité demeurerait dans les limites de la mortalité naturelle. Le recours à des techniques de nettoyage basiques a permis de réduire le risque de contact supplémentaire entre l'hydrocarbure et les animaux mais aussi les mouvements de panique (lors desquels les phoques adultes peuvent écraser et tuer les nouveau-nés) résultant de la présence humaine (Mearns *et al.*, 1999).

Les baleines et les dauphins ont été observés à proximité de nombreux déversements d'hydrocarbure, les preuves d'impacts sur les animaux étant limitées et surtout circonstancielles. Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas eu d'impacts, mais que ceux éventuellement générés ont été si négligeables qu'ils n'ont pu être détectés. Les voies potentielles d'exposition à l'hydrocarbure sont similaires à celles des pinnipèdes, c'est-à-dire le contact avec la peau, le contact avec les muqueuses (yeux et évent), l'inhalation d'hydrocarbures, l'engluement des structures nécessaires à l'alimentation (baleines à fanons), l'ingestion d'hydrocarbures lors de l'alimentation et l'ingestion de proies contaminées. Alors que certains envisagent des scénarios se traduisant par un impact significatif via ces voies d'exposition, la probabilité qu'un tel scénario se produire demeure réduite. Des expériences ont montré que la peau des cétacés est insensible au contact avec les hydrocarbures ; en outre, aucune atteinte au processus naturel de guérison des lésions de la peau n'a été constatée. Les preuves expérimentales semblent aussi indiquer que la structure des fanons qui pourraient être bouchés dans les situations les plus défavorables, finiront par s'auto-nettoyer rapidement. La probabilité qu'un cétacé se nourrissant (même les baleines à fanons), ingère une quantité d'hydrocarbure suffisante pour causer des dommages sublétaux à son système digestif ou constituer une charge toxique pour son corps est faible ; en outre, les autopsies de cétacés n'ont pas permis de déceler des hydrocarbures dans leurs intestins. De même, la quantité d'hydrocarbures ingérés par les proies ne sera pas suffisante pour être toxique pour un cétacé et devrait être métabolisée rapidement. Certains HAP peuvent s'accumuler dans les tissus des baleines avant d'être éventuellement métabolisés, comme c'est le cas pour tous les vertébrés. Enfin, l'inhalation de vapeurs d'hydrocarbures et leur entrée en contact avec les muqueuses pourraient survenir près de la source, lors d'un déversement de surface, lorsque l'hydrocarbure est encore frais et les concentrations d'hydrocarbures volatils temporairement élevées. Cependant, la probabilité qu'un cétacé soit exposé à une dose suffisante pour provoquer un impact toxique demeure faible.

La preuve la plus solide établissant que les déversements d'hydrocarbures peuvent provoquer des cas de mortalité chez les mammifères marins a été publiée à la suite du naufrage de l'*Exxon Valdez* en 1989. Les chercheurs étudiant les familles d'épaulards (orques) ont signalé des réductions notables (33 % et 41 %) de la population de deux familles qui ont été observées à proximité du déversement. Le suivi continu a permis d'établir que la population des deux familles n'a pas augmenté contrairement aux autres familles évoluant en Alaska. Cependant, d'autres chercheurs ont émis des doutes sur la probabilité d'effets directement imputables aux hydrocarbures et ont suggéré qu'une combinaison d'autres effets, incluant la chasse, l'âge et d'autres contaminants, constitue une cause plus probable. Ce débat n'a permis d'établir aucune conclusion précise. Plus récemment, des recherches menées en Louisiane ont fait état de problèmes de santé au sein d'une population de dauphins vivant dans l'une des baies affectées par des hydrocarbures déversés en 2010 à la

suite du blowout du puits de *Macondo*, suggérant que le déversement serait à l'origine des effets décrits. Cependant, au moment de la rédaction du présent guide, les preuves étayant une telle thèse étaient encore limitées. Les critiques ont relevé plusieurs facteurs de confusion, soulignant en outre l'absence de voie d'exposition probante et le défaut de mécanisme via lequel les hydrocarbures déversés auraient pu causer les effets décrits.

Les autres mammifères qui seraient potentiellement exposés à la suite d'un déversement d'hydrocarbures incluent les dugongs, les lamantins et les ours polaires. Il n'existe pas de données empiriques sur leur vulnérabilité, leur sensibilité et leur potentiel de rétablissement, bien que les rares preuves disponibles soulèvent certaines préoccupations. Les dugongs et les lamantins évoluent dans les eaux peu profondes et se déplacent lentement ; ils seront donc vulnérables et pourraient s'avérer sensibles.

Les perturbations causées par les activités de lutte, notamment le trafic maritime et le bruit qu'il engendre, pourraient affecter le comportement de certains mammifères marins, ou pourraient augmenter le risque de blessure consécutive aux collisions avec les bateaux, dans le cas où le déversement surviendrait à proximité des zones d'alimentation ou de reproduction.

Les reptiles marins

Les tortues sont potentiellement vulnérables aux hydrocarbures notamment lorsqu'elles entrent en contact avec celui-ci à la surface de la mer ou sur la côte. Hors de la période de nidification, les adultes et juvéniles passent peu de temps à la surface. Ils doivent néanmoins remonter à la surface à des intervalles réguliers pour respirer l'air dont ils ont besoin. Lorsqu'elles évoluent en surface, elles s'exposent à un risque de contamination et, dans les situations les plus défavorables, pourraient être engluées. Cependant, il existe peu d'éléments établissant la sensibilité de leur peau. Les tortues ne se rassemblent pas et sont réparties sur des zones vastes, si bien qu'il est peu probable que les impacts soient visibles au niveau de la population. Elles sont exposées à un risque plus élevé durant la saison de nidification, lorsque les femelles adultes se rendent sur la côte, le plus souvent pendant la nuit, et se hissent jusqu'à la partie supérieure de la plage de sable pour pondre leurs œufs. Leur activité est résolument saisonnière, avec un nombre important de femelles retournant sur la même plage, à la même période. Les nids sont profondément enfouis dans le sable, si bien que les œufs



À la sortie de leur nid, lorsqu'elles se dirigent vers la mer, les tortues récemment écloses sont vulnérables aux hydrocarbures ayant contaminé la plage.

sont bien protégés contre toute contamination moins intense qu'une contamination aux hydrocarbures légers frais, les nouveau-nés étant cependant plus vulnérables. L'éclosion et les déplacements des nouveau-nés sur la plage se font de manière à réduire les pertes causées par la prédation ; cependant, ceci les rendra plus vulnérables à la contamination dans le cas où leur déplacement coïnciderait avec un déversement. Les juvéniles sont bien plus sensibles à la toxicité de l'hydrocarbure que les adultes, dans la mesure où ils passent plus de temps à la surface de la mer et sont donc susceptibles d'avaloir de petites boulettes de résidus. Des cas de mortalités de tortues ont été reportés après certains déversements d'hydrocarbure, leur autopsie permettant de déceler des hydrocarbures et des boulettes de résidus dans leurs intestins. Les effets au niveau de la population locale seraient théoriquement possibles en cas d'impact grave sur le site de nidification des tortues durant la saison de nidification. Cependant, aucun effet de ce type n'a encore été reporté.

Environ 450 tortues vivantes, principalement des tortues de Kemp, contaminées par l'hydrocarbure ont été recueillies en mer durant le blowout du puits de *Macondo* en 2010, alors qu'un nombre bien plus important a été affecté. La plupart ont été conduites vers des centres de nettoyage en vue de leur réhabilitation et leur libération ultérieure. Au moment de la rédaction de ce guide, nous ignorons encore si le déversement a eu des impacts durables significatifs sur les populations de tortue dans le golfe du Mexique.

Les autres reptiles comprennent les iguanes marins, les crocodiles, les alligators et les serpents des mers, évoluant à la surface de l'eau, dans les eaux peu profondes ou sur la côte. Il existe des voies d'exposition potentielles aux hydrocarbures, cependant, les informations sur les effets des hydrocarbures demeurent limitées en raison du faible nombre d'études.

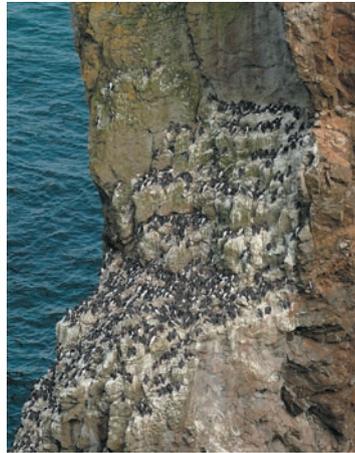
Les oiseaux

Les hydrocarbures peuvent affecter les oiseaux via trois voies de contamination, c'est-à-dire par le contact direct avec les plumes, qui peut conduire à l'hypothermie et réduire leur capacité à se déplacer ou s'alimenter etc. ; via l'ingestion d'hydrocarbures lors du lissage ou de la consommation d'aliments contaminés ; ou via le transfert de la contamination aux œufs ou aux jeunes pouvant réduire le taux de survie. Les images bouleversantes d'oiseaux morts ou en détresse, dont le plumage est recouvert d'hydrocarbures, sont souvent associées aux déversements d'hydrocarbure ; la mortalité d'oiseaux ont à de nombreuses reprises atteint plusieurs dizaines de milliers d'individus. Comme le nombre de cadavres et d'oiseaux souillés comptabilisés est inévitablement sous-estimé, notamment lorsque le déversement est distant de la côte, l'impact réel ne peut être précisément estimé. Cependant, certaines données sont disponibles dans le cadre des programmes de suivi mis en œuvre dans certaines zones. Les recherches consacrées aux effets sublétaux les moins perceptibles, y compris les impacts chroniques des hydrocarbures, nous ont, au cours des dernières années, fourni de nombreuses informations.

La vulnérabilité et la sensibilité des oiseaux et des populations d'oiseaux varient significativement en fonction des espèces et des stades de vie. Leur vulnérabilité étant dans une grande mesure fonction du temps qu'ils passent à la surface de l'eau. De nombreux oiseaux de mer, comme les sternes, les fous, les puffins et les oiseaux de rivage comme les huîtres, les courlis et les pluviers, passent peu ou pas de temps assis sur l'eau. Les pertes provoquées par les déversements d'hydrocarbures sur les populations locales de ces espèces, sont réduites. Cependant, les alcidés (de la famille des alcidés, qui comprennent notamment les guillemots et les pingouins), les canards de mer et les grèbes, passent la majeure partie de leur temps sur l'eau, et seront dès lors bien plus susceptibles d'être contaminés dans le cas où une nappe de surface surviendrait dans la zone dans laquelle ils évoluent. Les populations de ces espèces qui se rassemblent sur l'eau sur des sites particuliers et à des

Les oiseaux qui nagent à la surface de l'eau sont vulnérables aux nappes d'hydrocarbures. De nombreux oiseaux de mer se rassemblent, notamment durant leur période de reproduction, et un déversement, même limité, pourrait entraîner une mortalité élevée s'il survenait à ce moment et dans cette zone.





Les alcidés comme les macareux et les guillemots (à l'extrême gauche et au centre), passent beaucoup de temps sur l'eau et sont donc vulnérables et sensibles aux nappes d'hydrocarbures. Certains alcidés font leur nid au sein de grandes colonies et se rassemblent sur l'eau à certaines périodes de l'année. Les colonies de manchots (à l'extrême gauche) sont également très vulnérables aux déversements d'hydrocarbure.

périodes spécifiques de l'année sont dès lors mises en évidence sur les cartes de vulnérabilité aux hydrocarbures. Un exemple notable est le rassemblement d'alcidés à en période de reproduction, en particulier au début du printemps avant que les oiseaux adultes ne retournent dans les zones de nidification, et à la fin de la période de reproduction lorsque les juvéniles incapables de voler et les adultes en cours de mue préparent leur migration vers le large. Certains canards de mer et de grèbes se rassemblent avant de migrer depuis les sites de reproduction estivaux de haute latitude vers les sites hivernaux les plus chauds et vice versa, ainsi que sur des sites de ravitaillement en cours de migration. Un grand nombre de macreuses, un canard de mer, s'arrête pour se nourrir dans la baie de Carmarthen, sur la côte sud du pays de Galles, au printemps et à l'automne. La baie a été gravement touchée lors du naufrage du *Sea Empress* en février 1996, juste avant le début de la période de migration, 4700 macreuses ayant été contaminées. Ceci représentait environ la moitié de la population de macreuses présente dans la baie à cette époque, et environ 5 % de la population présente au Royaume-Uni durant cet hiver. Le suivi annuel des macreuses mis en œuvre au mois de novembre de chaque année a permis de constater une diminution de leur population sur les deux premières années, et un retour aux niveaux d'avant le déversement après trois ans. Il a en outre été constaté qu'elles se nourrissaient dans les zones touchées par le déversement, indiquant également la présence d'un stock suffisant de bivalves et de vers disponible pour leur alimentation.

La plupart des études conduites après le déversement ont fait état d'un rétablissement des populations régionales d'oiseaux aux niveaux précédant le déversement dans les cinq années suivant un incident grave, même si des impacts à long terme ont également été signalés. Pour toutes les espèces donnant naissance à un

En bas à gauche : ces échassiers, comme cette huitrier, ne reposent pas sur l'eau et sont donc moins vulnérables à un contact direct avec des hydrocarbures. Les pertes sont en principe relativement basses et le rétablissement rapide.

En bas à droite : des aigrettes et d'autres oiseaux perchés sur un piège à poissons contaminé dans la baie de Guanabara, près de Rio de Janeiro.





Certains oiseaux de mer, comme la sterne tara, nichent et se perchent dans des zones potentiellement vulnérables aux activités de lutte.

ou deux oisillons par couple reproducteur et par année, il est probable que la récupération de l'espèce à la suite d'une mortalité importante nécessitera beaucoup de temps à moins que les conditions environnementales (habitats, disponibilité des aliments, pression de la prédation etc.) ne soient idéales. Les impacts à long terme sur l'évolution des populations d'espèces déjà menacées soulèvent de nombreuses inquiétudes. Deux espèces de guillemots (le guillemot de Kittlitz et le guillemot marbré) ont été affectées par le sinistre de l'*Exxon Valdez* survenu en 1989, 1 100 carcasses ayant été récupérées. Au moment du déversement, le guillemot de Kittlitz était déjà inscrit sur la liste rouge de l'UICN, les deux espèces étant plus récemment classées comme menacées à la suite des baisses de leurs populations. Le déversement a eu un impact modeste mais écologiquement significatif sur les populations régionales des deux espèces. Il est devenu rapidement évident que d'autres facteurs ont eu un impact significatif, en outre, il est difficile de savoir si la mortalité importante liée au déversement a généré des effets résiduels.

La récupération des populations d'oiseaux demeure en outre tributaire de certains comportements complexes spécifiques à chaque espèce. Les facteurs les plus importants sont notamment le regroupement en sous-populations, l'instinct territorial, les oiseaux retournant chaque année sur le même site et les oiseaux hors de la période de reproduction. Ces facteurs peuvent ralentir la récupération d'une population dans une région comptant de nombreux sites de nidification vacants, alors que la population d'une zone voisine pourrait se rétablir rapidement et les sites de nidification être rapidement réoccupés. Il se peut qu'il n'y ait aucun effet visible sur les cycles de reproduction dans la mesure où les sites laissés vacants seront immédiatement occupés par les oiseaux en attente.

Les expériences réalisées ont montré que la contamination des oeufs par les hydrocarbures pourrait réduire les taux de survie des embryons et de succès de l'éclosion. Selon certaines théories, ceci pourrait avoir un impact potentiel sur les populations d'oiseaux. Cependant, les observations sur le terrain suggèrent que celui-ci aurait une importance écologique réduite. D'autres études ont montré que de faibles quantités d'hydrocarbures, y compris les irisations, sur un plumage d'oiseau pourraient détériorer la structure des plumes et leurs fonctions, et notamment leur propriété imperméable. Il est peu probable qu'une contamination limitée du plumage puisse causer directement la mort, cependant, les oiseaux pourraient consacrer beaucoup de temps à se nettoyer en se lissant les plumes. Ceci implique une perte du temps qui pourrait être consacré à d'autres activités ainsi qu'une ingestion d'hydrocarbures. Certaines espèces, comme de nombreuses mouettes, sont dotées de systèmes digestifs résistants, alors que d'autres sont sensibles même à des quantités limitées d'hydrocarbures. Les effets potentiels résultants de l'ingestion d'hydrocarbures sont nombreux et peuvent être mortels, en fonction de la quantité ingérée et de sa toxicité. Un certain nombre d'études ont décrit les effets sur les fonctions du système digestif, les lésions aux organes, les risques d'anémie, les effets sur la reproduction y compris la ponte des oeufs et le succès de l'éclosion. Alors que les oiseaux métaboliseront et décomposeront tôt ou tard les contaminants des hydrocarbures, les HAP risqueront de s'accumuler dans leurs tissus pendant une certaine période, provoquant des effets immunologiques. Il est cependant peu probable que les effets sublétaux de l'ingestion persistent pendant plus d'une saison.

Des pélicans bruns en convalescence après avoir été nettoyés, dans le cadre des opérations de lutte contre un déversement d'hydrocarbure survenu à Coatzacoalcos, au Mexique, en 2005.



Les hydrocarbures peuvent également être ingérés au cours de l'alimentation, cela concerne notamment les oiseaux se nourrissant de moules ou d'autres bivalves, qui concentrent les contaminants dans leur tissus, et les charognards et les rapaces attirés par les oiseaux morts ou mourant sur la côte. Il s'agit d'une cause potentiellement significative de mortalité pour certaines espèces ; cependant, il est peu probable que les effets sublétaux persistent sauf en présence d'une source chronique de contamination. Les résidus persistants d'hydrocarbure qui se retrouvent sur les côtes fréquentées par les oiseaux pourraient résulter en une exposition chronique via une ingestion des proies contaminées. Les études faisant suite à la pollution de l'*Exxon Valdez* en 1989 ont établi un lien entre les indicateurs biochimiques d'une exposition (biomarqueur)

aux hydrocarbures sur certains oiseaux et des résidus persistants d'hydrocarbures sur certaines côtes rocheuses. Il est plus probable pour les huîtres de Bachman et les canards arlequins, qui cherchent à se nourrir sur les blocs rocheux intertidaux, d'être exposés chroniquement aux hydrocarbures via l'ingestion de proies contaminées. Cependant, d'autres études ont montré que les apports provenant de telles sources ont été réduits à des niveaux très bas en l'espace de deux ou trois ans et que les risques de conséquences écologiques significatives demeuraient réduits. La population locale du canard arlequin est revenue à son niveau d'avant le déversement en 1993 ; si la population d'huîtres de Bachman a bien diminuée, aucune différence n'a été constatée en 1991 en termes de succès de la reproduction dans les zones contaminées et dans les zones non contaminées.



©Peter Massas, 2010
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Historionicus_historionicus_drake_Barnegat.jpg

Des effets indirects sur les populations d'oiseaux via la disponibilité des aliments ont été suggérés pour certaines espèces après certains déversements, cependant, il ne s'agit que d'une hypothèse applicable aux pires scénarios. Si une réduction significative et localisée des ressources alimentaires consommées par les oiseaux est possible, le caractère localisé et la grande fragmentation d'un déversement d'hydrocarbures rendent très peu probable un tel impact sur une portion significative de la zone où les oiseaux s'alimentent. Les perturbations inhérentes aux opérations massives de nettoyage pourraient néanmoins affecter le comportement des oiseaux vivant dans les zones humides et dès lors réduire leur capacité à se nourrir normalement. Par temps froid, les réserves d'énergie des oiseaux, et notamment des espèces migratoires, pourraient déjà être significativement réduites.

Les habitats littoraux et côtiers

Les impacts des déversements d'hydrocarbures sur les côtes sont traités plus en détails dans le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP étudiant cette problématique (IPIECA-IOGP, 2015a). Les points les plus importants sont résumés ci-dessous.

Les côtes accueillent une grande variété d'habitats, chacun se caractérisant par sa propre communauté de végétaux et d'animaux. La plupart des côtes les plus abritées, au substrat argilo-limoneux, sont dominées par les plantes, et notamment les marais salants, les halophytes ou les mangroves, en fonction du climat. Les algues prévalent sur les côtes rocheuses abritées, alors que les invertébrés dominent sur les côtes exposées aux vagues. Dans les régions polaires, de nombreuses côtes sont plus désertiques que celle des régions tempérées, en raison de la présence de la banquise, alors que les récifs coralliens bordent certaines côtes tropicales. De nombreux oiseaux, poissons et mammifères occupent les habitats côtiers en raison de la disponibilité de la nourriture, des substrats, des nutriments et des abris qu'ils offrent.

Les habitats et espèces côtiers seront vulnérables à tout déversement côtier, cependant, comme mentionné précédemment, la gravité de l'impact et la vitesse de régénération dépendront largement de la persistance et de l'état de vieillissement de l'hydrocarbure au moment de l'impact, ce qui est étroitement lié à l'exposition aux vagues (voir page 17). Ainsi, les impacts sur les côtes exposées sont généralement de courte durée dans la mesure où l'hydrocarbure est éliminé rapidement par l'action des vagues, la régénération des espèces affectées étant fonction des processus écologiques naturels. En revanche, l'élimination naturelle des hydrocarbures dans des zones abritées sera plus lente et, dans certaines zones, où le substrat intertidal est argilo-limoneux et dominé par des marais et des mangroves, les résidus d'hydrocarbures pourront persister pendant des années, générant des impacts durables. Une persistance à long terme des hydrocarbures a pu être constatée dans les marais salants et les côtes de Buzzards Bay, au Massachusetts, souillés par l'accident du chaland *Florida* survenu en 1969 ; les marais salants de Magellan Strait, au Chili, souillés par l'accident du *Metula* survenu en 1974 ; et les zones intertidales protégées ou les marais halophytes de la côte du Golfe en Arabie Saoudite, souillés par les déversements survenus durant la guerre du Golfe en 1991. Des résidus sont présents dans certaines parties de

Canard arlequin se nourrissant de moules et d'autres invertébrés sur les côtes. Si les proies étaient contaminées par des hydrocarbures, le canard pourrait être affecté chroniquement. La mesure dans laquelle cela a eu un impact sur les populations de canards arlequins de la baie du Prince William après le sinistre de l'Exxon Valdez survenu en 1989 fait toujours débat.

Exemples de côtes souillées (en haut à gauche, puis dans le sens des aiguilles d'une montre) ; côte rocheuse ; sédiment ; mangrove ; et marais salant.



ces côtes encore aujourd'hui, notamment en Arabie Saoudite. Chacun représente une petite partie de la quantité déversée, et une petite partie de la zone qui a été initialement souillée. En outre, les résidus d'hydrocarbures développent généralement une croûte de toxicité réduite ou qui demeure indisponible à la plupart des organismes vivant dans ces zones tout en étant résistante à la dégradation.

Alors que toutes les espèces intertidales peuvent potentiellement être affectées par la contamination aux hydrocarbures, certaines sont plus sensibles que d'autres. La majorité des algues, par exemple, est naturellement protégée par un mucus qui résiste aux hydrocarbures, alors que les plantes des marais salants seront plus facilement étouffées et les mangroves périront sous l'action des hydrocarbures visqueux qui recouvrent une part significative des lenticelles sur leurs racines aériennes. La sensibilité de nombreux animaux intertidaux est identique à celle des animaux benthiques exposés à un hydrocarbure dans l'eau (voir *Le benthos* aux pages 21 – 26), cependant, le contact physique direct constitue une voie d'exposition supplémentaire susceptible de neutraliser les mécanismes d'alimentation, de bloquer les terriers et d'engendrer une exposition à des concentrations élevées d'hydrocarbure sur une période relativement longue avec des effets sublétaux et létaux potentiels. C'est le cas notamment de la patelle, un type de gastéropode courant sur les côtes rocheuses dans de nombreuses régions : les études ont montré que même des petites quantités d'hydrocarbure frais sur les parties inférieures des patelles pourrait les rendre léthargiques et provoquer leur décollement des rochers, après quoi ils périront sous les effets de la dessiccation ou la prédation. Dans le cas de certains déversements, cela a entraîné des réductions dramatiques des populations locales suivies d'une croissance rapide des algues vertes opportunistes (pour des exemples, voir IPIECA-IOGP, 2015a). La recolonisation des patelles par des larves planctoniques survient rapidement, cependant, la régénération complète de la communauté survient en général dans les deux ou trois années suivantes, et pourrait nécessiter cinq ans voire plus dans des cas rares de contamination importante.

Les crabes fouisseurs, peuplant la plupart des côtes tropicales et subtropicales, notamment dans les mangroves. Les déversements d'hydrocarbure ont des impacts graves sur ces populations, et de plus, leurs terriers constituent une voie supplémentaire de pénétration des hydrocarbures dans les sédiments, y laissant des résidus persistants.

Gestion de la lutte contre les déversements d'hydrocarbures et impacts potentiels

Les opérations de lutte constituent un processus à plusieurs dimensions qui peut inclure des opérations à grande échelle, et potentiellement de nombreux impacts sur l'environnement marin. La lutte peut changer significativement la manière dont certaines ressources marines sont gérées au niveau local, comme par exemple la fermeture temporaire de la pêche ou l'interruption d'autres activités. Les enseignements tirés des interventions passées ont montré que les traitements inappropriés (« traitement » est ici utilisé pour désigner toutes les techniques de nettoyage) sont susceptibles de causer des dommages et que de nombreux impacts potentiels ont été associés au déploiement d'un grand nombre d'intervenants, de véhicules et de navires. Cependant, des enseignements essentiels ont été tirés et des approches, des techniques, des technologiques, des méthodes de gestion et de planification modernes ont été mis en place pour mener à bien les opérations de lutte. L'exigence d'avoir en continu accès à du personnel formé et expérimenté devra également être prise en compte, et les plans de lutte contre les déversements d'hydrocarbures comprennent désormais des plans de formation. Les guides de bonnes pratiques, y compris ceux disponibles dans le cadre de la présente série, fournissent des informations sur la planification, la gestion des déversements et l'usage approprié des différentes techniques de traitement. Bien que de nombreux enjeux demeurent, les techniques de luttes appropriées permettront de réduire significativement les impacts d'un déversement d'hydrocarbures.

La plupart des impacts les plus graves liés aux opérations de lutte sont la conséquence d'opérations de nettoyage des côtes inappropriées. Outre l'élimination des hydrocarbures qui constitue un aspect positif, certaines méthodes de nettoyage peuvent générer des impacts à long terme et devront être déployées avec soin. Les dommages potentiels peuvent inclure l'élimination ou la perturbation des substrats, les dommages aux systèmes racinaires des plantes, la mobilisation des hydrocarbures vers les sédiments, la dérive des hydrocarbures vers d'autres habitats et les dommages aux habitats voisins utilisés pour accéder aux zones contaminées. Les facteurs principaux qui déterminent l'ampleur de l'impact sont le type d'habitat, l'intensité des activités de nettoyage et la longévité des espèces affectées. Les habitats qui sont le plus sensibles aux dommages physiques sont les habitats sédimentaires abrités dominés par la végétation – comme les marais ou les mangroves. Les impacts potentiels des opérations de nettoyage de la côte sont traités en détails dans le Guide de bonnes pratiques de l'PIECA-IOGP sur les impacts des déversements d'hydrocarbures sur les côtes (PIECA-IOGP, 2015a).



De nombreuses zones marécageuses, comme ces marais salants contaminés lors de la fuite d'un pipeline en 1989, se développent sur un substrat argilo-limoneux qui est exposé à un risque de piétinement lors des opérations de nettoyage.



Un exemple de brûlage in-situ. Pour plus d'informations sur ce thème, voir IPIECA-IOGP 2015f.

Les techniques de lutte offshore pouvant avoir des impacts potentiels sur l'environnement marine incluent l'usage de dispersants (voir page 41 – 42) et le brûlage contrôlé in situ. Cette dernière technique a été utilisée sur des nappes offshore où il était possible maintenir une épaisseur de nappe suffisante pour entretenir la combustion, y compris sur la glace. Cette méthode génère d'importantes quantités de fumées, avec un impact potentiel sur la qualité de l'air- Les fumées se dissipent rapidement et ne semblent pas avoir d'impacts significatifs lorsque le brûlage est correctement mis en œuvre. Les résidus de combustion peuvent flotter ou couler en fonction des caractéristiques de l'hydrocarbure. Les études ont montré que les résidus brûlés sont moins toxiques que les hydrocarbures vieillis pour l'environnement aquatique ; cependant, lorsqu'ils coulent (par exemple comme mentionné à la page 25 s'agissant des impacts de l'accident du Haven survenu en 1991 en Italie), ils sont susceptibles d'étouffer les organismes benthiques par contact direct. En outre, les métaux lourds et les HAP de masse moléculaire élevée persistants

dans ces résidus pourraient être à l'origine d'une toxicité chronique. Cependant, il a été observé qu'ils sont principalement emprisonnés à l'intérieur de la matrice de résidus et présentent donc une faible biodisponibilité. Pour plus d'informations, consultez le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur le brûlage contrôlé in situ (IPIECA-IOGP, 2015f).

Les activités de restauration environnementale seront considérées comme les dernières étapes d'une opération de lutte. En cas de régénération naturelle des habitats gravement touchés, un renforcement de ces processus via des activités de restauration pourrait s'avérer nécessaire si la vitesse naturelle de réhabilitation était considérée comme trop lente. Des méthodes de restauration ont été utilisées avec succès sur certains habitats comportant des espèces dominantes responsables de la structure de l'habitat, comme les marais salés ou les mangroves. Ce thème est traité en détails dans IPIECA-IOGP, 2015a. Les opérations de restauration des récifs coralliens et des herbiers marins se sont également révélées fructueuses.

Les autres opérations de lutte contre les déversements pouvant avoir un impact sur l'environnement marin sont traitées dans les Guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur la préparation et la lutte en cas de faune contaminée (IPIECA-IOGP, 2014a) et les techniques d'évaluation de la pollution du littoral (SCAT) (IPIECA-IOGP, 2014b).

Analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction de options de luttes envisagées (NEBA)

Au cours des opérations de lutte, de nombreuses décisions sont prises par le personnel de gestion de l'urgence, celle-ci consistant entre autres à choisir les stratégies qui permettront d'éliminer ou de traiter les hydrocarbures et de réduire la menace et/ou le préjudice global à l'égard des ressources affectées. Le choix de certaines de ces techniques pourraient avoir des répercussions majeures sur l'environnement et les ressources socio-économiques. L'analyse des bénéfices écologiques et économiques (NEBA) est un processus qui compare de manière objective les bénéfices et les impacts potentiels des opérations de lutte et de nettoyage par rapport à une attitude passive. Parfois, il sera nécessaire de prendre des décisions sur la base de compromis entre différentes considérations environnementales et socio-économiques. Cependant, l'objectif premier sera de réduire les impacts à long terme en identifiant les situations qui pourraient déboucher sur une persistante de l'hydrocarbure et en évaluant les techniques de lutte disponibles pour réduire le risque. Dans le cadre d'un NEBA, aucun outil ou aucune méthode ne saurait être appliqué à toutes les situations ; cependant, les principales étapes d'évaluations peuvent être synthétisées comme présenté dans le tableau 1, conformément au Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur l'usage du NEBA dans la mise en place des stratégies de lutte (IPIECA-IOGP, 2015b).

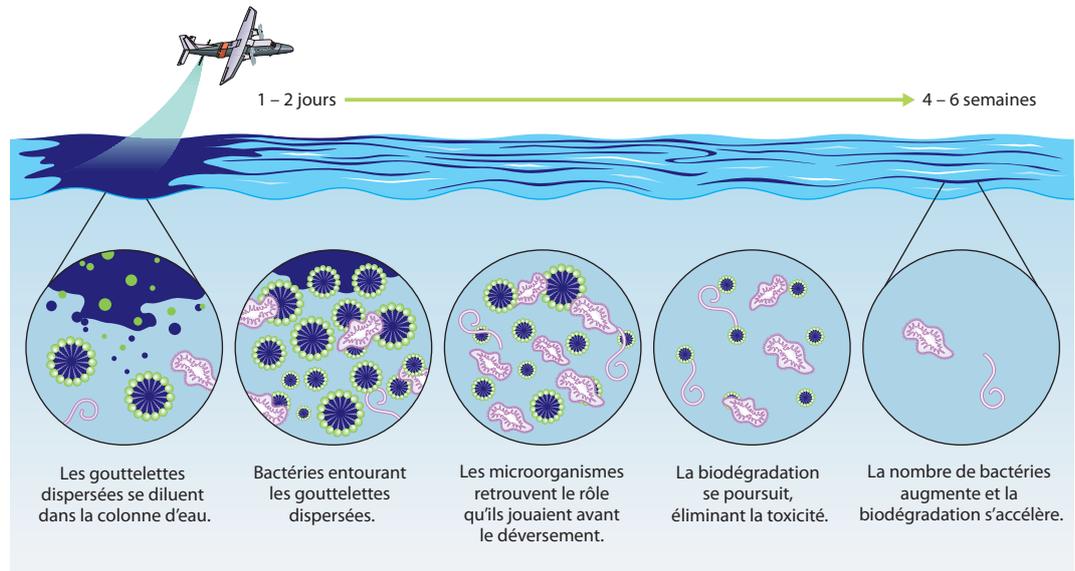
Table 1 Les principales étapes d'un NEBA mis en place dans le cadre d'un processus de planification d'urgence

Étape NEBA	Description
Évaluer les données	La première étape consiste à analyser le lieu du déversement et de sa dérive potentielle sous l'influence des courants et du vent – plusieurs modèles de trajectoires des déversements d'hydrocarbure pourront être utilisés à cette fin. Il pourra également être utile de savoir comment un hydrocarbure « vieillira » durant sa dérive. Il s'agit d'un des volets de l'évaluation des données disponibles.
Prédire les résultats	La seconde étape consiste à évaluer les éléments qui seront affectés par l'hydrocarbure déversé en l'absence de toute intervention. Ceci pourra inclure les ressources écologiques offshore, côtières et littorales, ainsi que les ressources socio-économiques. L'efficacité et la possibilité de mise en œuvre des stratégies de lutte devront également être évaluées. Ce point traite des techniques de lutte, des modalités pratiques de leur utilisation et de la quantité d'hydrocarbures qu'elles permettront de récupérer ou de traiter. Dans le cas où les zones menacées comprendraient des habitats côtiers sensibles aux hydrocarbures, la lutte contre le déversement d'hydrocarbure en mer visera à empêcher que l'hydrocarbure n'atteigne ces habitats. L'expérience passée permettra de déterminer quelles techniques d'intervention seront les plus efficaces. Les aspects pragmatiques et opérationnels devront constituer une partie importante du processus NEBA appliqué à toutes les techniques d'interventions viables.
Équilibrer les compromis	Les avantages et les inconvénients des possibles stratégies de lutte seront pris en compte et évalués et pondérés en fonction de leurs impacts écologiques et socio-économiques afin de comprendre et d'équilibrer les compromis
Sélectionner les meilleures options	Le processus abouti à l'adoption de la ou les technique(s) de lutte tendant à réduire l'impact potentiel d'un déversement sur l'environnement, et à promouvoir la régénération et la restauration rapides des zones impactées.

Les bénéfices et les impacts de l'application de dispersants

Les dispersants sont des agents chimiques qui, lorsqu'ils sont appliqués de manière appropriée sur un hydrocarbure flottant, favoriseront sa dispersion sous forme de petites gouttelettes dans la partie supérieure de la colonne d'eau, permettant ainsi une réduction de la quantité de l'hydrocarbure en surface. L'hydrocarbure dispersé est rapidement dilué à des niveaux affichant un faible risque de toxicité et favorisant la biodégradation (voir *Le devenir des hydrocarbures* aux pages 9 – 14). Les études ont également montré que les dispersants réduisent l'adhésion des hydrocarbures aux sédiments, aux rochers et aux organismes vivants. En réduisant de manière significative la quantité d'hydrocarbure en surface, les dispersants permettent de réduire le risque de contamination par contact direct des organismes vivant en surface, sur les côtes etc. Ils permettent aussi de réduire, et ce de manière significative dans certaines situations, le risque de voir les résidus d'hydrocarbures persister dans l'environnement. Ces deux effets, notamment le dernier, permettront de réduire le potentiel d'impacts à long terme. Cependant, en favorisant la dispersion et la dilution des hydrocarbures dans la partie supérieure de la colonne d'eau, les dispersants génèrent temporairement des concentrations élevées d'hydrocarbures. La réalisation d'une NEBA pour l'utilisation de dispersants devra alors à évaluer si cette méthode de lutte permet de réduire de manière significative l'hydrocarbure en surface, si cette quantité réduite en surface permet de réduire significativement la persistance des hydrocarbures et leurs impacts sur la faune ou les habitats en surface ou sur la côte, etsi une concentration élevée d'hydrocarbure dans l'eau présente un risque pour les poissons, les crustacés et les autres organismes aquatiques. Les dispositions légales en matière de dispersants pré-autorisent généralement l'utilisation de produits approuvés dans les eaux profondes (par ex. entre 10 et 20 mètres) ; une autorisation spécifique sera requise pour leur utilisation dans les eaux peu profondes, dans le cas où l'on considère que les bénéfices seraient supérieurs aux impacts.

Image 6 Le processus classique de biodégradation des hydrocarbures dispersés suite à l'application de dispersant

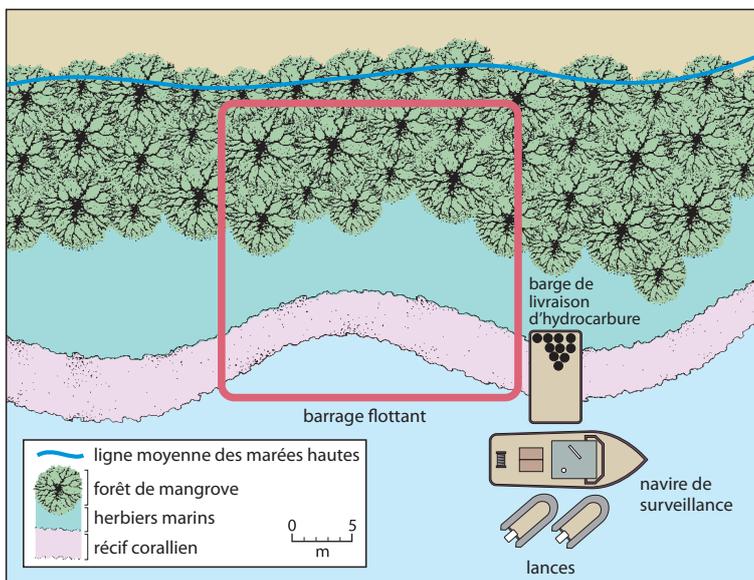


L'image 6 illustre le processus de biodégradation des hydrocarbures à la suite de l'application de dispersants sur une nappe de surface.

Trois expériences sur le terrain, à grande échelle, ont été réalisées dans les années 1980 afin de comparer les effets des hydrocarbures dispersés par voie chimique et ceux non dispersés dans les zones près des côtes – à savoir en Arctique et dans des climats tempérés et tropicaux. La première a été réalisée sur l'île de Baffin (Baffin Island Oil Spill ou BIOS, 1980-83) mis en oeuvre à l'Est de l'Arctique, au Canada. La seconde expérience intitulée expérience de Searsport (1981) a été réalisée dans le Maine, sur la côte Nord-Est des États-Unis La

troisième expérience a été réalisée dans le cadre de l'étude TROPICS (1984) sur la côte caraïbe du Panama (voir l'image 7). Chaque étude incluait l'état des lieux des habitats et des communautés avant et après le déversement ainsi que les mesures des concentrations en hydrocarbures dans les eaux, les sédiments et le biote. Outre les différences d'habitats (des côtes recouvertes par la glace et aux fonds marins jusqu'aux mangroves et aux récifs coralliens), les trois expériences se différenciaient aussi par leurs objectifs et leur conception. Cependant, elles ont toutes permis de conclure que l'application de dispersants est en mesure de réduire le niveau de contamination et qu'il n'engendre pas d'impact subtidal majeur ou de contamination persistante des sédiments. Le suivi à long-terme s'est prolongé pendant plusieurs années après les études, notamment dans le cadre de l'étude TROPICS, les enquêtes les plus récentes faisant état d'une persistance des hydrocarbures et des impacts associés sur les mangroves, jusqu'à 25 ans après, dans les zones affectées par l'hydrocarbure non dispersé.

Image 7 L'étude TROPICS menée en 1984 a permis d'établir l'existence de bénéfices potentiels inhérents à l'usage de dispersants





ITOPF

L'utilisation de dispersants constituait un facteur majeur pour la réduction du volume et de l'étendue géographique de la contamination de la côte à la suite du naufrage du Sea Empress survenu en 1996.

À l'occasion du naufrage du *Sea Empress* survenu en 1996, l'application de dispersants à grande échelle a favorisé la dispersion d'une partie importante des 72 000 tonnes d'hydrocarbure brut léger. Il a été estimé qu'environ la moitié de l'hydrocarbure a été dispersée dans la colonne d'eau, comparé à environ un cinquième ou moins en l'absence d'application de dispersants. Les concentrations élevées en hydrocarbures dans l'eau ont généré des impacts sur les organismes benthiques (voir les pages 21 à 26) ; cependant, la régénération de ces ressources s'est avérée rapide sans contamination persistante des sédiments subtidiaux. Il a été estimé que la combinaison de la dispersion naturelle et chimique a permis de prévenir l'arrivée à la côte de 120 000 tonnes d'émulsion, au lieu des 10 000 – 15 000 tonnes qui se sont effectivement échouées. L'application de dispersant a joué un rôle important dans la réduction de la quantité d'hydrocarbure arrivée à la côte et de son étendue géographique.

L'application sous-marine de dispersants constitue une technique relativement innovante utilisée pendant l'accident du puits *Macondo* survenu en 2010 dans le golfe du Mexique. Elle a permis de disperser une grande quantité d'hydrocarbure qui dans le cas contraire aurait atteint la surface et aurait eu des impacts plus importants sur les organismes vivant à la surface ou sur les côtes. Les études sur le devenir des hydrocarbures dans la colonne d'eau montrent que la biodégradation par les bactéries a été rapide, réduisant de manière significative le risque de persistance de résidus dans l'eau ou les sédiments. Les recherches sur le devenir des hydrocarbures déversés se poursuivent.

Pour plus d'informations sur ce thème, consultez les Guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur l'application de dispersants, en surface ou sous-marine ; voir respectivement IPIECA-IOGP 2015c et 2015d.

Evaluation des dommages causés par un déversement d'hydrocarbures – principales activités

Les déversements d'hydrocarbures en mer peuvent constituer des événements d'envergure qui peuvent générer des impacts environnementaux et affecter la vie de nombreuses personnes. Il est donc compréhensible qu'ils suscitent l'intérêt du public et des institutions, curieux de connaître l'étendue des dommages et la durée de récupération. De nombreux pays ont adopté des lois et une politique qui requièrent l'évaluation de l'impact sur les ressources halieutiques commerciales et les pêcheries, ainsi que sur la qualité de l'air, de l'eau et des sédiments, sur les sites naturels protégés, les espèces protégées et la santé humaine. Cependant, les programmes de suivi de la qualité environnementale mis en place par les agences publiques dans le cadre des évaluations courantes, ne semblent pas adaptés aux pollutions d'envergure. Les documents d'orientation sur les évaluations des dommages causés par les déversements d'hydrocarbure sont disponibles dans certains pays et certaines régions, de plus l'Organisation maritime internationale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement ont rédigé conjointement un document d'orientation international (IMO/UNEP, 2009). Certaines des exigences fondamentales sont décrites ci-dessous.

Avant le déversement, généralement peu voire pas de données sur les communautés marines touchées sont disponibles. Les biologistes entreprennent dès lors de collecter des informations sur les zones contaminées le plus tôt possible, dans le cadre de l'évaluation de l'impact.



L'acquisition de données de référence de bonne qualité avant tout déversement pourra s'avérer compliquée sur les plans logistiques et financiers. La première priorité consiste à collecter des données sur le niveau de contamination par les hydrocarbures avant le déversement. Dans la plupart des cas, il est possible de prélever des échantillons d'eau, de sédiment et de certains organismes (notamment pour les espèces commerciales) sur la trajectoire prévue de l'hydrocarbure, avant qu'ils ne soient impactés. Il est également important d'effectuer des prélèvements d'hydrocarbures à la source lorsqu'il est frais en début d'incident, ainsi qu'à des intervalles réguliers dans différents habitats, au fil de son vieillissement. Des procédures rigoureuses en matière d'échantillonnage des hydrocarbures et des hydrocarbures dans l'eau, les sédiments et les organismes vivants, seront mises en place afin de s'assurer de l'absence de contamination provenant d'autres sources. En outre, le traitement et le transport des échantillons vers les laboratoires d'analyse devront respecter les procédures en matière de traçabilité. Il sera utile d'identifier et d'avoir accès aux données pré-existantes sur la zone. Les données environnementales seront consultables depuis des outils en ligne comme la Bibliographie géo-spatiale marine de l'IPIECA (<http://mgb.ipieca.org>).

Les données biologiques de l'état de référence avant déversement et avant l'apparition des impacts sont également précieuses, notamment lorsqu'elles sont collectées ou mises à jour moins d'un an avant le déversement. Toutefois, les fluctuations naturelles pour de nombreuses populations et communautés peuvent s'avérer significatives, si bien que des données anciennes peuvent avoir une valeur limitée. Pour les espèces touchées par des changements durables, il conviendra en outre d'utiliser des références qui prennent en compte ces changements. Des photographies récentes, d'habitats et de communautés remarquables, notamment les images aériennes de marais ou de mangroves, prises à partir d'un point fixe avant le

déversement et avant l'apparition des impacts, seront également précieuses.



Les informations sur la répartition et la concentration en hydrocarbures, au cours du déversement, seront essentielles dans le cadre de l'évaluation des impacts, afin de fournir les preuves de l'exposition. Elles seront recueillies dans le cadre d'opérations de reconnaissance aérienne, de programmes d'échantillonnage (tel que mentionné ci-dessus, y compris les prélèvements dans la colonne d'eau, sur la côte et dans les fonds marins) et des

La cartographie de la répartition des hydrocarbures déversés constitue un aspect essentiel de l'évaluation du dommage. La plupart de ces opérations pourront être réalisées par reconnaissance aérienne. Les photographies aériennes des communautés contaminées peuvent en outre fournir des informations précieuses sur leur taille et leur état.

programmes de suivi de la pollution côtière. Ces dernières seront généralement conduites en utilisant la Technique d'évaluation de la pollution du littoral en vue du nettoyage (SCAT), qui est avant tout conçue pour fournir un support opérationnel aux interventions sur la côte mais aussi afin de fournir des informations précieuses sur l'exposition probable aux hydrocarbures de la faune côtière. Pour plus d'informations sur le SCAT, consultez l'IPIECA-IOGP, 2014b. Les nombreuses études sur les conséquences écologiques sont nécessairement limitées à de petites zones. Des informations à grande échelle sur la répartition des hydrocarbures pourraient s'avérer plus représentatives.

Certaines des preuves les plus manifestes qu'il y a eu un impacts lié au déversement d'hydrocarbures sur la faune et les plantes sont transitoires et incluent la mortalité de la faune, l'arrivage à la côte des bivalves, la végétation noircie ou décolorée et la colonisation par les organismes opportunistes. Des enregistrements et des photographiques pourront être effectués à la survenance de ces effets et avant leur disparition. Les animaux morts pourront être recueillis puis conservés de manière appropriée afin d'être analysés ultérieurement. Pour plus d'informations sur la préparation et la lutte à l'occasion d'un incident affectant la faune, consultez le Guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur la préparation et la lutte en cas de faune contaminée (IPIECA-IOGP, 2014a).



Documenter les observations de la faune impactée constitue un volet important de l'évaluation des dommages. Cette tortue contaminée a été retrouvée par le personnel d'intervention durant le sinistre de l'Estrella Pampeana survenu en 1999 en Argentine.

La définition d'objectifs précis sera essentielle dans le cadre d'une étude d'évaluation des dommages structurée. Ici, il conviendra de définir le cahier des charges de l'étude (zone géographique, durée, portée de l'étude et limites) et de définir si l'évaluation se focalisera sur des seuils définis, des comparaisons à des données références, des sites de références ou des tendances à travers le temps. Il conviendra de garder à l'esprit que même une étude détaillée ne pourra pas nécessairement fournir la preuve statistique de la présence ou non d'un impact. Lorsque le dommage est manifeste, certains souhaiteront établir un suivi de la récupération, cependant, il pourra s'agir d'une activité sans fin, à moins que l'état de référence ne soit clairement défini. L'objectif fondamental poursuivi par de nombreuses études consistera à évaluer le bien-fondé des demandes d'indemnisation.

Eu égard aux contraintes logistiques et budgétaires, il sera nécessaire de hiérarchiser quelles ressources écologiques seront évaluées. Une fois sélectionnées, la conception de l'étude se basera sur les objectifs ainsi définis. Pour chaque ressource, plusieurs techniques, méthodes de mesures, sites et systèmes de prélèvements seront évalués.

Lorsqu'une étude permet de mettre en évidence un impact, il sera également nécessaire de décrire le mécanisme réaliste (processus) via lequel le déversement d'hydrocarbures a généré le dommage.

Comme les programmes d'échantillonnage biologiques et chimiques sont souvent mis en œuvre par des laboratoires ou des intervenants différents, il est essentiel que les programmes soient conçus en collaboration et qu'un certain niveau de coordination soit maintenu. Ceci ne sera pas toujours facile, cependant, en ce qui concerne la pollution des côtes, les informations détaillées sur la répartition de la pollution dans le cadre d'un programme SCAT permettront la mise en place d'une base de données commune permettant de centraliser les études et de faciliter leur conception.

Bibliographie

Manuels et documents d'orientation

IMO (1998). *Manual on Oil Pollution*. Section VI: IMO Guidelines for Sampling and Identification of Oil Spills. 44 pp.

IMO/UNEP (2009). *IMO/UNEP Guidance Manual on the Assessment and Restoration of Environmental Damage following Marine Oil Spills*. 2009 Edition. London, UK, 104 pp.

IPIECA-IOGP (2014). *A guide to shoreline clean-up techniques*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 521. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2014a). *Wildlife response preparedness*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report Number 516. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2014b). *A guide to oiled shoreline assessment (SCAT) surveys*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report Number 504. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015). *Response strategy development using net environmental benefit analysis (NEBA)*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 527. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015a). *Impacts of oil spills on shorelines*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report Number 534. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015b). *Response strategy development using net environmental benefit analysis (NEBA)*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 527. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015c). *Dispersants: surface application*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 532. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015d). *Dispersants: subsea application*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 533. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015e). *Oil spills: inland response*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 514. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015f). *In-situ burning of spilled oil*. IPIECA-IOGP Good Practice Guide Series, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). IOGP Report 523. <http://oilspillresponseproject.org>

ITOPF (2011). *Effects of Oil Pollution on the Marine Environment*. Technical Information Paper (TIP) No. 13, International Tanker Owners Pollution Federation.

ITOPF (2011a). *Fate of marine oil spills*. Technical Information Paper (TIP) No. 2, International Tanker Owners Pollution Federation.

NOAA (2010). *Characteristic Coastal Habitats: Choosing Spill Response Alternatives*. U.S. Dept. of Commerce. Seattle, WA: Emergency Response Division, Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration. 86 pp. Revised, 2010; reprinted 2013.

NOAA (2010). *Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments*. U.S. Dept. of Commerce. Seattle, WA: Emergency Response Division, Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration. 76 pp. Revised, 2010; reprinted 2013.

NOAA (2015). ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills). NOAA's oil weathering model—an oil spill response tool that models how different types of oil weather (undergo physical and chemical changes) in the marine environment. Website of the NOAA Office of Response and Restoration, US Department of Commerce. <http://response.restoration.noaa.gov/adios>

Littérature sur le devenir et les effets des hydrocarbures

AMAP (2008). *Oil and Gas Activities in the Arctic: Effects and Potential Effects*. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway. www.amap.no/documents/18/scientific/21

Anderson, J. W. and Lee, R. F. (2006). Use of biomarkers in oil spill risk assessment in the marine environment. In *Human and Ecological Risk Assessment*, Vol. 12, Issue 6, pp. 1192–1222.

ASM (2011). *FAQ: Microbes & Oil Spills*. Published for the American Society for Microbiology by the American Academy of Microbiology. 13 pp. <http://academy.asm.org/index.php/faq-series/436-faq-microbes-and-oil-spills>

Baker, J. M., Clark, R. B., Kingston, P. F. and Jenkins, R. H. (1990). *Natural Recovery of Cold Water Marine Environments After an Oil Spill*. Presented at the Thirteenth Annual Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar, June 1990, 111 pp.

Boehm, P. D., Page, D. S., Brown, J. S., Neff, J. M., Bragg, J. R. and Atlas R. M. (2008). Distribution and Weathering of Crude Oil Residues on Shorelines 18 Years After the *Exxon Valdez* Spill. In *Environmental Science and Technology*. Vol. 42, Issue 24, pp. 9210–9216.

Cosco Busan Oil Spill Trustees (2012). *Cosco Busan Oil Spill Final Damage Assessment and Restoration Plan/Environmental Assessment*. Prepared by California Department of Fish and Game, California State Lands Commission, National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Fish and Wildlife Service, National Park Service, Bureau of Land Management. www.fws.gov/contaminants/RestorationPlans/CoscoBusan/Cosco_Settlement/FinalCoscoBusanDARP.pdf

ESGOSS (1994). *The Environmental Impact of the Wreck of the Braer*. The Ecological Steering Group on the oil spill in Shetland. Published by The Scottish Office, Edinburgh, UK. 200 pp.

Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council (2010). *Exxon Valdez Oil Spill Restoration Plan: 2010 Update. Injured Resources and Services*. Anchorage, AK. 46 pp.

Geraci, J. R. and St. Aubin, D. J. (1990). *Sea Mammals and Oil: Confronting the Risks*. Academic Press. 282 pp.

Gesteira, J. L. G. and Dauvin J. C. (2000). Amphipods are Good Bioindicators of the Impact of Oil Spills on Soft-Bottom Macrobenthic Communities. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 40, Issue 11, pp. 1017-1027.

Harwell, M. A. and Gentile, J. H. (2006). Ecological significance of residual exposures and effects from the Exxon Valdez oil spill. In *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol. 2, Issue 3, pp. 204-246.

Integral Consulting Inc. (2006). *Information Synthesis and Recovery Recommendations for Resources and Services Injured by the Exxon Valdez Oil Spill*. Restoration Project 060783, Final Report. Integral Consulting, Mercer Island, WA 98040. Anchorage, AK.

Jones, D. A., Plaza, J., Watt, I., Al Sanei, M. (1998). Long-term (1991–1995) monitoring of the intertidal biota of Saudi Arabia after the 1991 Gulf War oil spill. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 36, No. 6, pp. 472–489.

King, G. M., Kostka, J. E., Hazen, T. C., Sobecky, P. A. (2015). Microbial Responses to the Deepwater Horizon Oil Spill: From Coastal Wetlands to the Deep Sea. In *Annual Review of Marine Science*, Vol. 7, pp. 377–401.

Kingston, P. F. (1999). Recovery of the Marine Environment Following the Braer Spill, Shetland. *International Oil Spill Conference Proceedings: March 1999*, Vol. 1999, No. 1, pp. 103-109.

Kingston, P. F. (2002). Long-term environmental impact of oil spills. In *Spill Science and Technology Bulletin*, Vol. 7, No. 1-2, pp. 53–61.

Kirby, M. F., Lyons, B. P., Waldock, M. J., Woodhead, R. J., Goodsir, F., Law, R. J., Matthiessen, P., Neall, P., Stewart, C., Thain, J. E., Tylor, T. and Feist, S. W. (2000). *Biomarkers of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) exposure in fish and their application in marine monitoring*. Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science (CEFAS), Science Series Technical Report No. 110. 30 pp.

Lane, S. M., Smith, C. R., Mitchell, J., Balmer, B. C., Barry, K. P., McDonald, T., Mori, C. S., Rosel, P. E., Rowles, T. K., Speakman, T. R., Townsend, F. I., Tumlin, M. C., Wells, R. S., Zolman, E. S. and Schwacke, L. H. (2015). Reproductive outcome and survival of common bottlenose dolphins sampled in Barataria Bay, Louisiana, USA, following the Deepwater Horizon oil spill. In *Proceedings of the Royal Society B*. 282:1994-2001.

Law, R. J. and Hellou, J. (1999). Contamination of fish and shellfish following oil spill incidents. In *Environmental Geosciences*, Vol. 6, Issue 2, pp. 90–98.

Law, R. J., Kirby, M. F., Moore, J., Barry, J., Sapp, M. and Balaam, J. (2011). *PREMIAM – Pollution Response in Emergencies Marine Impact Assessment and Monitoring: Post-incident monitoring guidelines*. Science Series Technical Report No. 146, Cefas, Lowestoft, 164 pp.

- Lee, R. F. and Anderson, J. W. (2005). Significance of cytochrome P450 system responses and levels of bile fluorescent aromatic compounds in marine wildlife following oil spills. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 50, Issue 7, pp. 705-723.
- Lee, R. F. and Page, D. S. (1997). Petroleum hydrocarbons and their effects in subtidal regions after major oil spills. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 34, Issue 11, pp. 928-940.
- Leighton, F. A. (1993). The toxicity of petroleum oils to birds. In *Environmental Reviews*, Vol. 1, No. 2, pp. 92-103.
- Loughlin, T. R. (ed) (1994). *Marine Mammals and the Exxon Valdez*. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- McFarlin, K. M., Prince, R. C., Perkins, R. and Leigh, M. B. (2014). Biodegradation of dispersed oil in arctic seawater at -1°C. *PLoS ONE* 9(1): e84297. doi:10.1371/journal.pone.0084297
- Mearns, A. J., Levine, E., Yender, R., Helton, D. and Loughlin, T. (1999). Protecting Fur Seals During Spill Response: Lessons from the *San Jorge* (Uruguay) Oil Spill. In *International Oil Spill Conference Proceedings: March 1999*, Vol. 1999, No. 1, pp. 467-470.
doi: <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-1999-1-467>
- Michel J., Csulak F., French D. and Sperduto, M. (1997). Natural resource impacts from the *North Cape* oil spill. In *International Oil Spill Conference Proceedings: April 1997*, Vol. 1997, No. 1, pp. 841-850.
- Montagna, P. A., Baguley, J. G., Cooksey, C., Hartwell, I., Hyde, L. J. et al. (2013). *Deep-Sea Benthic Footprint of the Deepwater Horizon Blowout*. *PLoS ONE* 8(8): e70540. doi:10.1371/journal.pone.0070540
- Moore, J. (2006). *State of the marine environment in south west Wales 10 years after the Sea Empress oil spill*. A report to the Countryside Council for Wales from Coastal Assessment, Liaison & Monitoring, Cosheston, Pembrokeshire. CCW Marine Monitoring Report No. 21. 30 pp.
- Moore, J. (2006). Long term ecological impacts of marine oil spills. In: *Proceedings of the Interspill 2006 Conference*, held at London ExCeL, 2-23 March 2006.
- National Academy of Sciences (1985). *Oil in the Sea: Inputs, Fates and Effects*. National Academies Press, Washington D.C. 601 pp.
- National Academy of Sciences (2003). *Oil in the Sea III: Inputs, fates and effects*. Washington: National Academies Press, Washington D.C. 280 pp.
- National Research Council (2005). *Oil Spill Dispersants: Efficacy and Effects*. National Academies Press, Washington D.C. 378 pp.
- NOAA (2010). *Oil and Sea Turtles: Biology, Planning, and Response*. US National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Response and Restoration. 116 pp.

- NOAA (2010). *Oil Spills in Coral Reefs. Planning & Response Considerations*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Response and Restoration. 82 pp.
- NOAA (2010). *Oil Spills in Mangroves. Planning & Response Considerations*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Response and Restoration. 70 pp.
- NOAA (2013). *Oil Spills in Marshes. Planning & Response Considerations*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Response and Restoration. 125 pp.
- O'Hara, P. D. and Morandin, L. A. (2010). Effects of sheens associated with offshore oil and gas development on the feather microstructure of pelagic seabirds. In *Marine Pollution Bulletin*, Volume 60, Issue 5, pp. 672-678.
- Owens, E. H. and Sergy, G. A. 2005. Time Series Observations of Marsh Recovery and Pavement Persistence at Three Metula Spill Sites after 30½ Years. In: *Proceedings of the 28th Arctic and Marine Oilspill Programme (AMOP) Tech. Seminar, Environment*, pp. 463-472.
- Peterson, C. H., Rice, S. D., Short, J. W., Esler, D., Bodkin, J. L., Ballachey, B. E. and Irons, D. B. (2003). Long-Term Ecosystem Response to the Exxon Valdez Oil Spill. In *Science*, Vol. 302, No. 5653, pp. 2082-2086. DOI: 10.1126/science.1084282
- Price, A. R. G., Downing, N., Fowler, S. W., Hardy, J. T., Le Tissier, M., Mathews, C. P., McGlade, J. M., Medley, P. A. H., Oregoni, B., Readman, J. W., Roberts, C. M. and Wrathall, T. J. (1994). *The 1991 Gulf War: Environmental Assessments of IUCN and Collaborators*. A Marine Conservation and Development Report. IUCN, Gland, Switzerland. xii + 48 pp.
- Rice, S. D., Spies, R. B., Wolfe, D. A., Wright, B. A. (editors). (1993). *Proceedings of the Exxon Valdez Oil Spill Symposium*. American Fisheries Society, Symposium 18, held on 2–5 February 1993 at Anchorage, Alaska. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, USA.
- SEEEC (1998). *The environmental impact of the Sea Empress oil spill*. Final Report of the Sea Empress Environmental Evaluation Committee. Her Majesty's Stationery Office, London, UK.
- Wells, P. G., Butler, J. N. and Hughes, J. S. (editors) (1995). *Exxon Valdez Oil Spill: Fate and Effects in Alaskan Waters*. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials. ASTM Special Technical Report (STP) 1219.
- Wiens, J. A. (ed.) (2013). *Oil in the Environment. Legacies and Lessons of the Exxon Valdez Oil Spill*. Cambridge University Press. 458 pp.
- Yender, R., Michel J. and Lord C. (2002). *Managing Seafood Safety after an Oil Spill*. Seattle: Hazardous Materials Response Division, Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration. 72 pp.

Sites internet utiles

Deepwater Horizon, Bibliography of Published Research:

www.lib.noaa.gov/researchtools/subjectguides/dwh.html

Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council: www.evostc.state.ak.us

Interspill: www.interspill.org/previous-events

IOSC: www.ioscproceedings.org/loi/iosc

IPIECA: www.ipieca.org/library

ITOPF: www.itopf.com/knowledge-resources

NOAA: <http://response.restoration.noaa.gov/publications>

PREMIAM: www.cefas.defra.gov.uk/premiam/publications.aspx

Remerciements

Le présent document a été rédigé par Jon Moore (CALM) sous la tutelle du Groupe de travail sur les impacts.

La page a été intentionnellement laissée vierge.

IPIECA

L'IPIECA est l'association internationale de l'industrie pétrolière pour la sauvegarde de l'environnement et les questions sociales. Elle développe, diffuse et promeut les bonnes pratiques et les connaissances afin de permettre à l'industrie d'améliorer son impact sur l'environnement et la société ; elle constitue le principal canal de communication de l'industrie avec les Nations-Unies. Grâce à ses groupes de travail conduits par les membres et à sa direction, l'IPIECA rassemble l'expertise collective des entreprises et associations pétrolières et gazières. Sa position unique dans l'industrie permet à ses membres de répondre efficacement aux enjeux essentiels environnementaux et sociaux.

www.ipieca.org



L'IOGP représente l'industrie des hydrocarbures en amont des organisations internationales, y compris l'Organisation maritime internationale, le Programme environnemental des Nations Unies (UNEP), les Conventions régionales dans le domaine marin et les autres groupes sous l'égide des Nations-Unies. Au niveau régional, l'IOGP représente l'industrie auprès de la Commission européenne, du Parlement européen et de la Commission OSPAR pour l'Atlantique Nord-Est. Tout aussi important est le rôle de l'IOGP pour la promulgation des meilleures pratiques, en particulier dans les domaines de la santé, de la sécurité, de l'environnement et de la responsabilité sociale.

www.iogp.org.uk

