

Impacts des déversements d'hydrocarbures sur le littoral

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

Étage 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)

Siège social

Étage 14, City Tower, 40 Basinghall Street, London EC2V 5DE, Royaume-Uni
Téléphone : +44 (0)20 3763 9700 Télécopieur : +44 (0)20 3763 9701
Courriel : reception@iogp.org Internet : www.iogp.org

Bureau de Bruxelles

Boulevard du Souverain 165, 4^e étage, B-1160 Bruxelles, Belgique
Téléphone : +32 (0)2 566 9150 Télécopieur : +32 (0)2 566 9159
Courriel : reception@iogp.org

Bureau de Houston

10777 Westheimer Road, Suite 1100, Houston, Texas 77042, États-Unis
Téléphone : +1 (713) 470 0315 Courriel : reception@iogp.org

Rapport 534 de l'IOGP

Date de publication : 2016

© IPIECA-IOGP 2016 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 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 le littoral

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 Guide des 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 la lutte contre les déversements d'hydrocarbures. Cette série vise à aider à aligner les pratiques et les activités du secteur, à informer les parties prenantes et à servir comme outil de communication pour promouvoir la sensibilisation et l'éducation.

Elle 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.

Les révisions sont entreprises dans le cadre du Projet de coopération industrielle de l'IOGP-IPIECA dans le cadre de la lutte contre la pollution par les hydrocarbures (le JIP, « Oil Spill Response Joint Industry Project »). Le JIP a été créé en 2011 pour valoriser les enseignements en matière de la préparation et la lutte contre les déversements d'hydrocarbures, suite à l'accident de contrôle de puits d'avril 2010 dans le golfe du Mexique.

Remarque sur les bonnes pratiques

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

Les bonnes pratiques pour un sujet particulier changeront au fil du temps à la lumière des progrès de la technologie, de l'expérience pratique et des connaissances scientifiques, ainsi que des changements dans l'environnement politique et social.

Table des matières

Préface	2	Traitement et restauration du littoral	36
Introduction	4	En fonction des options de lutttes envisagées (NEBA)	36
Écosystèmes littoraux et services écosystémiques	4	Principales options de nettoyage	38
Objectifs du document	4	Restauration environnementale du littoral	43
Arrivage des hydrocarbures sur le littoral : devenir, persistance et élimination naturelle	6	Évaluation et surveillances des littoraux souillés	45
Indice de sensibilité environnementale (ESI)	12	Distribution et quantification des hydrocarbures contaminant le littoral	45
Impacts écologiques des hydrocarbures sur le littoral	14	Évaluation et surveillance des impacts sur les communautés et le biote	46
Organismes vivants du littoral et sensibilité aux hydrocarbures	14	Bibliographie	48
<i>Plantes et invertébrés du littoral</i>	15	Manuels et documents d'orientation	48
<i>Vertébrés du littoral</i>	17	Littérature sur le devenir et les effets des hydrocarbures	49
Côtes rocheuses	19	Sites internet utiles	52
Côtes sédimentaires	22	Remerciements	53
Marais salants	26		
Mangroves	33		
Récifs coralliens	35		

Introduction

Écosystèmes littoraux et services écosystémiques

Les écosystèmes littoraux englobent une grande variété d'habitats : des rochers escarpés, des galets ou du sable sur des côtes exposées ou encore des vasières, des marais littoraux ou des mangroves denses dans les estuaires ou autres zones abritées. Ils sont colonisés par un grand nombre d'espèces végétales et animales. Ils fournissent des nutriments et servent d'abri à de nombreuses autres espèces. Les écosystèmes voisins et l'environnement dans son ensemble en tirent également un grand nombre de bénéfices. Les nombreux bénéfices que l'Homme tire de ces habitats et de ces communautés sont qualifiés de services écosystémiques.

Les habitats littoraux se caractérisent par une productivité biologique élevée (désignant la quantité de matière organique produite par les plantes et les animaux), parfois si importante qu'elle peut avoir un impact considérable sur les écosystèmes marins situés à proximité. Il s'agit principalement de matières végétales en décomposition et d'œufs, de spores et de larves.

Outre la grande variété de plantes, d'algues et d'invertébrés, qui peuplent habituellement les littoraux, de nombreux autres vertébrés s'appuient sur les ressources littorales. De nombreux oiseaux, poissons, mammifères et reptiles parcourent le littoral pour se nourrir de la grande variété d'organismes qui y vivent. Certaines espèces, comme les tortues et de nombreux poissons, pondent leurs œufs dans les habitats littoraux. Les autres, comme les phoques, les morses et de nombreux oiseaux y accostent et s'y reposent. Certains littoraux, notamment les mangroves et les marais salants, constituent des zones de reproduction importantes pour de nombreux poissons y compris les espèces commerciales, abritant, protégeant et fournissant la nourriture nécessaire aux juvéniles durant leur croissance jusqu'à l'âge adulte.

Le littoral assure la protection naturelle des côtes contre les effets de la mer. Tout particulièrement, les mangroves et les marais salants constituent une zone tampon dynamique située entre les terres et la mer, assurant une protection contre les inondations et l'érosion. Les autres services importants que les humains obtiennent du littoral incluent le traitement de l'eau (élimination des contaminants, des éléments nutritifs et des sédiments qui s'écoulent sur les terres), les ressources halieutiques (et notamment de crustacés), l'aquaculture (et notamment les crustacés et les algues), les loisirs, la culture et le potentiel esthétique.

Les déversements d'hydrocarbure provoqués par les bateaux, les infrastructures d'exploration et de production offshore, les pipelines et les installations situées sur la terre peuvent constituer une menace pour le littoral. Comme la plupart des hydrocarbures flottent et les nappes d'hydrocarbures se déplacent sous l'effet des vents et des courants, il est souvent possible que les hydrocarbures déversés atteignent le littoral. La contamination du littoral par les hydrocarbures peut avoir un impact sur les diverses fonctions et les services fournis par ces habitats ainsi qu'un impact sur les populations des espèces liées aux littoraux affectés.

Objectifs du document

Le présent document fournit un aperçu des impacts des déversements d'hydrocarbures sur les ressources et fonctions du littoral et de la vitesse de régénération de ces ressources et fonctions. Il traite des caractéristiques des habitats et des espèces de l'estran (à savoir la zone qui se situe au-dessus de la surface pendant les marées basses et sous les eaux pendant les marées hautes aussi appelé zone de marnage ou zone intertidale) des côtes et estuaires. 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 *Arrivée des hydrocarbures sur le littoral : devenir, persistance et élimination naturelle*, décrit l'évolution des hydrocarbures sur les différents types de littoraux et les caractéristiques pertinentes en matière d'impacts et de régénération. L'accent est mis sur les caractéristiques et les processus ayant un impact sur la persistance de l'hydrocarbure et qui auront vraisemblablement une influence sur les effets à long terme.

La section sur les *Impacts écologiques des hydrocarbures sur le littoral* fournit une description générale de la sensibilité des différents organismes littoraux aux hydrocarbures, ainsi qu'une description des impacts, de la résilience, et des vitesses de régénération spécifiques à chaque type d'habitat et des principaux facteurs qui les gouvernent.

La troisième section, intitulée *Traitement et restauration du littoral*, analyse les bonnes pratiques actuelles en matière de nettoyage du littoral et la façon dont elles sont conçues pour optimiser les bénéfices écologiques et économiques. Des exemples de projets passés de restauration viennent illustrer les descriptions des avantages et inconvénients des principales options de traitement.

La quatrième section, sur *l'Évaluation et la surveillance des littoraux contaminés*, présente les approches et exigences principales en matière d'évaluation des impacts, en mettant l'accent sur la technique d'évaluation de la pollution du littoral en vue du nettoyage (SCAT).

Enfin, la section *Bibliographie* fournit une liste des références les plus importantes et des publications traitant de ce sujet.

La série des Guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP (GPG) inclut d'autres titres, et notamment le GPG sur les *Impacts des déversements d'hydrocarbures sur l'écologie marine* (IPIECA-IOGP, 2015a) qui propose une analyse approfondie des impacts des déversements d'hydrocarbures en mer. D'autres titres connexes abordent des thèmes comme l'analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de lutte (IPIECA-IOGP, 2015b), de la cartographie des zones vulnérables dans le cadre de la lutte contre les déversements d'hydrocarbure (IPIECA/IMO/IOGP, 2012) et de la technique d'évaluation de la pollution du littoral en vue du nettoyage (SCAT) (IPIECA-IOGP, 2014). 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 sur les opérations de lutte à terre (IPIECA-IOGP, 2015c).

Arrivage des hydrocarbures sur le littoral : devenir, persistance et élimination naturelle

Les hydrocarbures bruts et la plupart des produits pétroliers constituent des mélanges complexes d'hydrocarbures (pour les besoins du présent document le terme hydrocarbure est utilisé de manière générique pour désigner tous ces composés organiques) dont le poids moléculaire ainsi que les caractéristiques physiques et chimiques sont susceptibles de varier. Les hydrocarbures déversés dans l'environnement marin sont exposés à un ensemble de processus qui modifient rapidement et progressivement sa nature et le redistribuent dans les autres compartiments de l'environnement. Les caractéristiques des différents hydrocarbures et les processus d'évolution des hydrocarbures qui surviennent en mer sont décrits dans le Guide de bonnes pratiques intitulé *Impacts des déversements d'hydrocarbures sur l'environnement marin* (IPIECA-IOGP, 2015a). Au fil du temps, tout hydrocarbure persistant à la surface de la mer devient généralement plus visqueux et moins toxique, dans le cadre d'un processus appelé vieillissement. Dans certains cas, les hydrocarbures peuvent demeurer en mer et ne jamais atteindre les côtes. Dans les climats très froids, la glace se formant en hiver le long de la côte peut former une barrière empêchant la contamination du littoral. Cependant, dans d'autres circonstances, ils peuvent atteindre les côtes sous plusieurs formes. Il se décline ainsi en : fines irisations ; en hydrocarbures frais légers, aux effets toxiques aigus ; en hydrocarbures lourds vieillis et en émulsions (aussi appelées mousses), aux effets engluants/étouffants ; et en petits morceaux d'hydrocarbures vieillis sous la forme de boulettes de goudrons. En outre, les organismes littoraux peuvent également être exposés à des hydrocarbures dissous ou dispersés dans l'eau. Les vagues déferlant sur le littoral favorisent encore le processus de dispersion.

Lorsqu'un hydrocarbure atteint le littoral, son devenir dépend d'une série de facteurs supplémentaires incluant la topographie de la côte, la composition de l'hydrocarbure et l'exposition aux vagues et aux marées, ainsi que

le degré de vieillissement de l'hydrocarbure lorsqu'il atteint les côtes. La figure 1 illustre certains de ces facteurs. L'exemple le plus frappant concerne une paroi rocheuse abrupte située sur une côte exposée aux vagues, qui ne sera vraisemblablement pas contaminée, la nappe d'hydrocarbure étant retenue sous l'action des vagues réfléchies. Cependant, la plupart des mangroves et des marais salants sont tellement abrités des vagues et des courants tidaux que tout hydrocarbure s'y échouant peut y persister pendant des années.

Dans certaines conditions, les hydrocarbures flottants et les sédiments en suspension peuvent se mélanger sous l'action des vagues déferlantes dans la zone de déferlement. Les sédiments contaminés sont alors plus lourds que l'eau et sédimentent, ce qui peut entraîner la formation de boulettes et de plaques de goudrons dans la zone subtidale peu profonde à proximité de la plage. Ce fut notamment le cas lors de la contamination du littoral dans certaines zones, à la suite du sinistre du Macondo survenu en 2010 dans le Golfe du Mexique.

Suivant les types de circulation d'eau à proximité des côtes, les hydrocarbures se concentrent dans des zones déterminées. Certaines côtes sont bien connues pour constituer des sites naturels d'accumulation de déchets et d'algues, et les hydrocarbures s'y accumulent également. La distribution des différents substrats, ainsi que les

Les côtes contaminées et le nettoyage (seuls les excavatrices et les camions citernes sont représentés) de la partie supérieure de la côte d'Angle Bay à Milford Haven, au Pays de Galles, illustrant la distribution éclatée de l'hydrocarbure déversé suite au naufrage du Sea Empress survenu en 1996.



Plaques d'hydrocarbures mélangées avec du sable, déposées sur la partie inférieure de la côte et la zone subtidale peu profonde à Grand Isle, en Louisiane, durant le sinistre du puit de Macondo survenu en 2010 dans le Golfe du Mexique.



structures naturelles ou artificielles comme les promontoires, les récifs, les crêtes rocheuses, les plages de galets, les ruisseaux, la glace de mer, les brise-lames et les digues déterminent dans quelle zone de la côte l'hydrocarbure va se concentrer. La contamination est souvent fragmentaire, même sur les côtes relativement uniformes : La majorité des hydrocarbures se concentrent généralement dans une zone limitée du littoral contaminé, la plus grande partie du littoral étant, au pire, exposé à une contamination légère ou à une irisation.

Les hydrocarbures ne persistent guère sur les surfaces durablement humides et notamment sur la plupart des algues, mais adhèrent fermement aux substrats desséchés après le retrait de la mer. Les étages infralittoral et mediolittoral de l'estran sont exposés à l'hydrocarbure flottant et aux hydrocarbures dissous durant les cycles des marées. Mais il est peu probable que les hydrocarbures échoués persistent sur la partie inférieure de la côte. Cependant, le long de la ligne de marée haute et dans la partie supérieure de la zone intertidale, les sédiments sont souvent moins saturés en eau, et les hydrocarbures deviennent plus collant au contact des surfaces chaudes et rugueuses. Dès lors, la remobilisation des hydrocarbures déposés sous l'action des vagues et des marées est moins probable. Les côtes recouvertes de glace assurent un certain niveau de protection contre les hydrocarbures et peuvent limiter leur persistance, l'hydrocarbure pouvant cependant être capturé par la glace sur les côtes.

Certains hydrocarbures peuvent pénétrer dans certains sédiments du littoral, en fonction de facteurs comme la porosité (liée au type et de sédiment et sa granulométrie), la profondeur de la nappe phréatique, la viscosité des hydrocarbures et la présence de terriers ou de vides laissés par des racines en décomposition. La pénétration des hydrocarbures est moins probable dans la plupart des vasières en raison de la faible granulométrie et de la saturation en eau. Cependant, il est possible qu'un hydrocarbure peu visqueux pénètre à des profondeurs d'environ un mètre sur un littoral de sable ou de gravier bien drainé ou dans les zones peuplées par les crabes. Les plages de galets et de cailloux présentent le potentiel de pénétration le plus élevé. On les rencontre avant tout à des latitudes élevées, notamment dans les zones d'accumulation des débris glaciaires où les matières fines permettant de combler les brèches font défaut. Les hydrocarbures qui pénètrent ces sédiments grossiers peuvent alors former une couche en surface ou souterraine qui peut se révéler très persistante. Cela a notamment été démontré par le Projet étudiant le déversement d'hydrocarbures de l'île de Baffin (BIOS) (1980–1983) dans l'Est de l'Arctique canadien. Le Projet BIOS constitue une des plus importantes expériences de terrain jamais mises en œuvre afin d'observer l'évolution et les effets des hydrocarbures déversés, mais aussi de démontrer que, dans les climats froids où la viscosité est relativement élevée et les terriers sont peu nombreux, la pénétration dans les sédiments fins est moins probable.

Les hydrocarbures échoués peuvent s'enfouir dans le cadre de différents processus, particulièrement durant les tempêtes. Il peut également être piégé dans les marais être



Peter Taylor

L'hydrocarbure visqueux déversé par le Worthy en 1989 n'a pas pénétré dans le sédiment sableux de Southampton Water, Angleterre.



L'hydrocarbure déversé en 1991 durant la guerre du Golfe contaminant les terriers de crabes dans les marais salants de la partie supérieure des côtes saoudiennes, permettant aux hydrocarbures de pénétrer profondément dans ces sédiments fins.

Une couche d'hydrocarbure enfouie sous le sable à côté de Manifah, en Arabie Saoudite, durant le déversement d'hydrocarbures survenu en 1991 durant la guerre du Golfe. Cette photographie a été prise 11 ans après le déversement (l'échelle est indiquée par le crayon).



enfoui par les sédiments entrants. Une grande quantité d'hydrocarbures a été enfouie sur de nombreuses côtes sableuses durant le déversement survenu en 1991 lors de la guerre du Golfe et le sinistre du *Prestige* survenu en 2002, des couches d'hydrocarbures étant recouvertes par un mètre de sable à certains endroits. Il est également possible que les dépôts d'hydrocarbures enfouis soient de nouveaux exposés par les processus d'érosion.

Une fois les hydrocarbures échoués sur la côte, les vagues et les marées sous l'effet desquelles ils ont atteint la côte, contribuent à son élimination, à une vitesse qui dépend de nombreux facteurs. L'exposition des hydrocarbures aux vagues, aux courants de marées, aux conditions météorologiques

et au climat, et aux caractéristiques de la côte constituent autant de facteurs importants. Il est peu probable qu'une plaque d'hydrocarbures exposée à une forte agitation des vagues reste sur la côte pendant longtemps, notamment sous l'action de frottement exercée par les sédiments mobiles. Sur les côtes arctiques, le frottement des glaces peut contribuer à l'élimination des résidus d'hydrocarbures. Cependant, lorsque les hydrocarbures sont piégés dans une baie abritée, comme un marais ou une mangrove, plusieurs années peuvent être nécessaires aux mouvements limités de l'eau pour éliminer les hydrocarbures. Même sur des côtes relativement exposées, les caractéristiques topographiques à petite échelle et la présence de rochers peuvent former un abri au sein duquel les résidus d'hydrocarbures peuvent persister. Les conditions météorologiques comme le ruissellement des eaux de pluie ou les tempêtes, la chaleur ou la lumière du soleil favorisent les processus de vieillissement des hydrocarbures déposés sur le littoral. La présence de particules d'argile dans l'eau peut contribuer à l'élimination de l'hydrocarbure des substrats côtiers dans le cadre d'un processus de floculation.

La biodégradation des hydrocarbures en dioxyde de carbone et en eau constitue l'étape ultime de la dégradation de la plupart des hydrocarbures déversés. La vitesse de dégradation dépend cependant d'une série de facteurs et notamment du type et du poids moléculaire des hydrocarbures et de la superficie sur laquelle les microbes peuvent attaquer les hydrocarbures. Les hydrocarbures remobilisés sur la côte sous la forme de petites gouttelettes ou de fragments, ou adhérant à des particules d'argile, peuvent dès lors être biodégradés relativement vite par les bactéries dans la colonne d'eau. Des fragments de plus grande taille peuvent se déposer dans les fonds marins.

Dans ce sable boueux, la « couche noire » naturelle anoxique peut se situer à une profondeur de 1 à 2 cm en-dessous de la couche supérieure oxygénée. Les sédiments argileux ou limoneux anoxiques sont naturellement de couleur noire suite à la formation de sulfure de fer dans les zones dans lesquelles la quantité d'oxygène est insuffisante pour permettre la formation d'oxydes de fer, si bien qu'ils sont parfois confondus avec des hydrocarbures. Ils peuvent également avoir l'odeur d'hydrogène sulfuré (l'odeur « d'œufs pourris ») qui peut également être confondue avec l'odeur de l'hydrocarbure.



Il est vraisemblable que les hydrocarbures qui pénètrent dans les sédiments ou qui sont piégés sous la surface, soient plus persistants dans la mesure où ils sont moins exposés aux mouvements de l'eau qui en principe contribuent à son élimination et car la disponibilité limitée en oxygène et en substances nutritives ralentit sa dégradation microbienne. Dans les sédiments argileux ou limoneux où l'on observe peu de drainage naturel, la perméabilité à l'oxygène peut être si faible que des conditions anoxiques se développent. Les bactéries qui vivent dans des conditions anoxiques peuvent entraîner la dégradation des hydrocarbures, quoique bien plus lentement que les bactéries qui contiennent les sédiments oxygénés. La lenteur de la dégradation des dépôts d'hydrocarbure enfouis,

qui dépend des conditions locales, permet à ces dépôts de conserver leurs caractéristiques propres propres à leur composition chimique originale pendant des années. Le même hydrocarbure enfoui dans un sédiment bien oxygéné sera dégradé plus rapidement, mais pourra persister sous la forme de couche souterraine dans certains environnements littoraux. Avec le temps, la biodégradation réduit la toxicité du sédiment et permet la recolonisation par un nombre croissant d'animaux et de plantes.

La persistance des hydrocarbures est également affectée par la température de l'eau et le climat, dans la mesure où ils sont plus visqueux dans les environnements froids et où les processus biologiques peuvent se révéler plus lents. La biodégradation de l'hydrocarbure par les bactéries peut survenir rapidement dans l'eau et les sédiments par tout temps, cependant le remaniement des sédiments contaminés par les plantes et les animaux est plus lent dans les régions polaires, notamment en hiver. Dans les zones dans lesquelles les sédiments littoraux peuvent geler, il est possible que la pénétration des hydrocarbures soit limitée.

Au fil du vieillissement, les hydrocarbures deviennent plus visqueux et moins toxique, persistant parfois sous la forme de résidus de goudron dans la partie supérieure de la côte. De tels résidus contiennent généralement une quantité importante d'hydrocarbures au poids moléculaire élevé qui se biodégradent lentement. La persistance des résidus d'hydrocarbures dépend également de leur épaisseur, dans la mesure où le vieillissement et l'activité bactérienne interviennent exclusivement à la surface des hydrocarbures. Lorsque les hydrocarbures se mélangent avec du gravier dans la partie supérieure de la côte, ils peuvent former des « plaques d'asphalte ». De tels résidus et plaques peuvent persister pendant des années et affecter



IPIECA

Les résidus d'hydrocarbures déversés à l'occasion du sinistre du Metula survenu en 1974 à Tierra Fuego, au Chili, persistent dans des marais salants. Sous un climat plus chaud, les hydrocarbures seraient fragmentés et dégradés plus rapidement sous l'action d'une colonisation et d'une croissance plus active des plantes et des microorganismes.

Encadré 1 Terminologie

Vulnérabilité et sensibilité aux hydrocarbures : la vulnérabilité désigne la probabilité qu'une ressource soit exposée aux hydrocarbures. La sensibilité implique que la ressource a été exposée aux hydrocarbures et désigne l'effet relatif d'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 matière à avoir des effets nocifs sur les organismes vivants. La toxicité aquatique désigne la capacité d'un agent chimique à avoir des effets toxiques sur les organismes aquatiques.

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, il peut s'agir de 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 néfastes 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.

La **biodisponibilité** désigne la mesure dans laquelle un agent chimique peut être absorbé par un organisme et détermine la capacité toxique et la vitesse de biodégradation de cet agent chimique.

Les hydrocarbures résiduels lors du sinistre de l'Exxon Valdez en 1989 persistent sur certaines côtes rocheuses de la Baie du Prince-William, en Alaska. Des hydrocarbures lourds ont contaminé des couches de sédiments poreux protégées contre le processus de vieillissement par les roches sous-jacentes et les graviers.



IPIECA

significativement les habitats et en empêcher la colonisation. À Milford Haven, au Pays-de-Galles, les résidus de goudron apparus à la suite du bombardement des cuves de pétrole d'août 1940, lors de la Seconde guerre mondiale, sont toujours présents sur une côte rocheuse située à proximité. Après le durcissement de ces plaques de goudron sous l'effet du vieillissement, toute toxicité persistante restera piégée à l'intérieur de la plaque. Le lessivage progressif des hydrocarbures contenus dans les résidus peut entraîner une exposition des organismes marins situés à proximité à de faibles concentrations (chronique). Cependant, plus les hydrocarbures sont persistants, plus ce lessivage sera lent. En conséquence, les concentrations en hydrocarbures dans les eaux environnantes peuvent être si basses qu'elles n'entraîneront pas d'effet toxique significatif. Il s'agit d'une

situation similaire à celle qu'on peut rencontrer dans certains estrans de la Baie du Prince-William, en Alaska, où des quantités relativement faibles de résidus d'hydrocarbures faisant suite au naufrage l'Exxon Valdez de 1989, persistent sous les rochers. L'exposition continue aux hydrocarbures chez les loutres et certains oiseaux a été constatée dans le cadre des études de biomarqueurs menées neuf ans après le déversement. Cette exposition a été mise en relation avec les résidus d'hydrocarbures persistants par certains chercheurs, alors que d'autres estiment que ces résidus n'ont aucun effet significatif sur l'environnement. Des informations plus détaillées sur la toxicité aiguë et chronique sont fournies par le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur les impacts des déversements d'hydrocarbures sur l'écologie marine (IPIECA-IOGP, 2015a).

La régénération des habitats contaminés correspond généralement à un processus graduel. Au fil de la réduction de la toxicité sous l'effet de la biodégradation et du vieillissement, les habitats seront colonisés par un nombre croissant d'animaux et de plantes. Certaines espèces peuvent résister à des concentrations élevées en hydrocarbures et des longues périodes d'exposition sans pâtir des effets toxiques. Il s'agit généralement des premières espèces opportunistes qui recoloniseront l'habitat. Ces opportunistes peuvent alors contribuer à la fragmentation de l'hydrocarbure et favoriser sa dégradation, ouvrant la voie de la colonisation à d'autres espèces plus sensibles.

Goudron recouvrant une plage rocailleuse sur la côte égyptienne, en mer rouge. Les quelques espèces qui se sont adaptées à la vie sur ces côtes ont besoin de refuges à l'abri du soleil. Les résidus de goudron peuvent colmater de telles cavités et réduire la disponibilité des habitats.



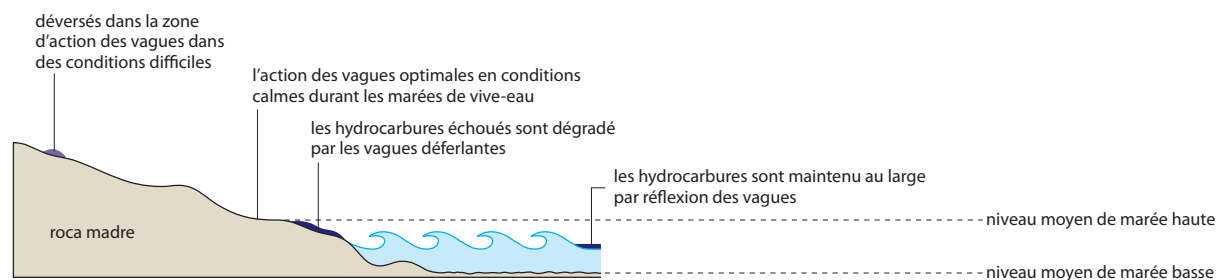
Les interprétations actuelles de la régénération écologique se focalisent sur les fonctions d'un habitat contaminé plutôt que sur la contamination elle-même. Cependant, là où les impacts des déversements d'hydrocarbures perdurent, ils sont avant tout dus à la persistance de la contamination. Il est dès lors crucial de comprendre la persistance des hydrocarbures dans différentes situations afin de pouvoir évaluer la durée nécessaire à la régénération. La nature et l'intensité de la contamination persistante constituent des facteurs importants lorsqu'il s'agit d'évaluer l'impact sur l'environnement. Il est également essentiel d'inclure les concentrations naturelles en hydrocarbures dans le milieu et la présence des autres stress naturels et anthropogéniques. La régénération de l'environnement suite à un déversement d'hydrocarbures sera en principe rapide dans la plupart des zones affectées. Les cas de régénération lente sont généralement limités aux petites parties de littoral dans lesquelles l'hydrocarbures reste persistant. Toute opération de lutte contre un déversement d'hydrocarbures vise avant tout à

empêcher que les hydrocarbures atteignent des littoraux propices à une persistance à long terme. Les déversements suivants montrent que le type d'hydrocarbure et l'exposition aux vagues influent de manière significative sur la persistance et la régénération :

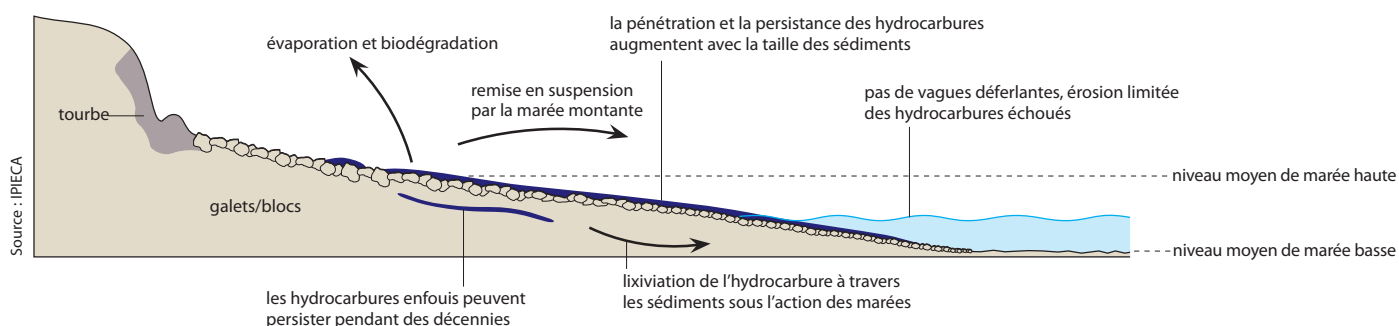
- Le fioul lourd déversé en 1970 à la suite du sinistre de l'Arrow a contaminé le littoral de la Baie de Chedabucto, à Nova Scotia, au Canada, sur plus de 300 km. La plus grande partie du littoral a été nettoyée naturellement. Une étude approfondie réalisée en 1992 a permis d'établir la présence d'hydrocarbures résiduels sur 13,3 km de littoral, environ 1,3 km de côtes faiblement exposées ayant été lourdement contaminés. Les études sur les communautés intertidales contaminées réalisées au moment du déversement ont permis d'observer des fortes mortalité chez de nombreuses espèces, et notamment chez certains bivalves, les myes communes, à Black Duck Cove. Le recrutement de ces bivalves a été gravement affecté par une contamination persistante mais a été accéléré par le vieillissement de l'hydrocarbure et la baisse du niveau de toxicité. Six ans après le déversement, des concentrations toxiques en hydrocarbures affectaient toujours les sédiments de la Baie, les taux de croissance de la mye étant significativement réduits. Des études postérieures, réalisées 23 et 27 ans après le déversement, ont montré que les sédiments provenant de ces sites contenaient toujours des concentrations importantes en hydrocarbures mais que le niveau de toxicité avait chuté, comme l'ont montré les indicateurs d'exposition des poissons plats et les autres tests de toxicité.
- Le pétrole brut léger déversé en 1996 en mer du Nord à la suite du sinistre du Sea Empress a contaminé le littoral de Pembrokeshire, au Pays de Galles, sur environ 200 km. Les opérations de nettoyage, concentrées sur les plages touristiques, ont permis d'éliminer les hydrocarbure sur la plus grande partie du littoral. Cependant, la plus grande partie des hydrocarbures échoués sur le littoral ont été avant tout nettoyés naturellement. Les études ont permis de documenter les impacts graves sur la vie côtière. Cependant, ce ne sont que de faibles concentrations en hydrocarbures qui ont été observées moins de trois ans après le déversement, la présence de petites plaques de goudron et de couches d'asphalte ayant été signalée dans des sites bien abrités. La plupart des impacts connus sur la faune et les habitats côtiers ont disparu en l'espace de cinq ans.

Figure 1 Exemple d'évolution des hydrocarbures sur le littoral

Les côtes rocheuses exposées



Les plages de galets/blocs abritées



Indice de sensibilité environnementale (ESI)

L'indice de sensibilité environnementale (ESI) consiste en une échelle à dix niveaux qui intègre tous les facteurs décrits ci-dessus voire bien plus afin de classer les littoraux en fonction de la probabilité de persistance des hydrocarbures. Plus le numéro ESI est élevé, plus la probabilité de persistance des hydrocarbures est importante. Comme la persistance des hydrocarbures est la principale cause d'impacts à long terme, l'échelle peut être utilisée pour évaluer le potentiel de régénération. Cependant, cette échelle est avant tout conçue pour classer les types de littoraux sur des cartes de sensibilité utilisées durant les opérations d'urgence, afin d'appuyer les décisions en matière de lutte, la hiérarchisation et la sélection des principales techniques de traitement du littoral. Pour en savoir plus, consultez le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA sur la cartographie de la vulnérabilité des côtes aux pollutions maritimes accidentelles (IPIECA/IMO/IOGP, 2012).

Le tableau 1 présente les principales catégories de l'échelle ESI. L'échelle a été adaptée à certains littoraux régionaux, via la définition de sous-catégories spécifiques à ces régions. Ces sous-catégories ne sont pas reportées dans ce guide.

Tableau 1 Les principales catégories de l'échelle ESI

ESI	Description du littoral
1	<p>a) Côtes rocheuses exposées Forte pente. Les hydrocarbures sont généralement maintenus au large par la réflexion des vagues sur la côte. Tout hydrocarbure déposé est rapidement éliminé sous l'action des vagues. Les impacts sur les communautés de l'estran sont généralement de courte durée, à moins qu'une exposition aiguë à un hydrocarbure léger frais soit à l'origine de fortes mortalités.</p> <p>b) Structures artificielles et solides exposées Inclut les digues, les jetées etc. Voir ci-dessus.</p>
2	<p>a) Plateformes rocheuses exposées. Plateaux ou plateformes de largeur variable en pente douce. Souvent appuyés sur un escarpement abrupt, avec parfois des sédiments à sa base. Les bassins et les crevasses sont fréquents, la présence de graviers est possible. Les hydrocarbures n'adhéreront pas à la plateforme, mais pourront s'accumuler parmi le gravier sur la ligne de marée haute. La persistance est généralement de courte durée.</p> <p>b) Escarpements et pentes abruptes argileuses exposées. Se trouve généralement le long des chéneaux dans les zones humides où les courants traversent une côte escarpée. Les hydrocarbures n'adhèrent pas à la surface argileuse, sauf éventuellement au niveau de la ligne des hautes eaux. Tout hydrocarbure déposé est rapidement éliminé par le mouvement des eaux.</p>
3	<p>a) Plages de sable fin à moyen. Des surfaces compactes planes ou à pente modérée. Des algues sont susceptible de s'accumuler le long de la laisse de mer. Les hydrocarbures peuvent recouvrir une vaste zone, mais ils seront décollés de la partie inférieure de l'estran pour s'accumuler le long de la partie supérieure de la zone intertidale. Les hydrocarbures peuvent pénétrer dans le sable ou s'enfouir, la faune des sédiments étant alors susceptible de se raréfier. Ces plages figurent parmi les plus faciles à nettoyer.</p> <p>b) Escarpements et pentes abruptes érodées dans le sable ou la tourbe. Ceci est observé là où les dunes de sable sont érodées par les vagues. Elles peuvent se composer d'une plage étroite le long de sa base, leur utilisation par la faune étant limitée. Susceptible d'avoir un impact saisonnier sur les oiseaux. Les hydrocarbures échoués se concentreront sur la ligne de marée haute, et sont susceptibles de pénétrer les sédiments. La présence d'hydrocarbures est généralement de courte durée.</p>
4	<p>Plages de sable grossier. Pente modérée de sédiments meubles. La faune des sédiments est limitée. Les hydrocarbures peuvent recouvrir une vaste zone, mais ils seront décollés de la partie inférieure de l'estran pour s'accumuler le long de la partie supérieure de la zone intertidale. Les hydrocarbures peuvent pénétrer le sable ou s'enfouir à des profondeurs supérieures à 1 m, la faune des sédiments étant alors susceptible de se raréfier. Le sédiment est trop meuble pour les véhicules.</p>

suite...

Tableau 1 Caractéristiques principales de l'échelle ESI (suite)

ESI	Descripción de las costas
5	Plages de sable et de graviers Il peut s'agir de zones composées de sable, de cailloux et de galets, la distribution étant susceptible de changer. La faune et la flore sont généralement limitées, sauf sur les substrats les plus stables. Les hydrocarbures peuvent recouvrir toute la plage, mais ils seront décollés de la partie inférieure de l'estran pour s'accumuler le long de la partie supérieure de la zone intertidale. Les hydrocarbures peuvent pénétrer les sédiments ou s'enfouir. Des plaques d'asphalte peuvent se former dans les sites abrités.
6	a) Plages de graviers, composées de matériaux allant des galets aux blocs. Elle peut être abrupte et abriter des bermes façonnées par les vagues. La faune et la flore sont généralement limitées sauf sur le substrat le plus stable de la partie inférieure de la plage. Il est possible que les hydrocarbures pénètrent en profondeur, ou qu'ils aillent au-delà de la ligne de marée haute et deviennent alors très persistants. Des plaques d'asphalte peuvent se former dans les sites abrités. Potentiel de contamination chronique. b) Enrochement. Blocs de rochers ou de béton mis en place pour la protection des côtes. Il est possible que les hydrocarbures pénètrent en profondeur et adhèrent aux surfaces rugueuses. Potentiel de contamination chronique.
7	Vasière exposée (tidal flat, vaste étendue de sable souvent couverte à marée haute) De vastes zones sableuses planes recouvertes de mélanges de coquillage et de vase. Généralement dans les passes intertidales. Saturé en eau sauf sur les crêtes les plus élevées. La faune des sédiments peut y être dense, c'est une zone importante pour les oiseaux des zones humides. Les hydrocarbures n'adhèrent pas aux sédiments humides, cependant, ils s'accumuleront au niveau de la ligne de marée haute et peuvent pénétrer les zones les plus élevées. La faune des sédiments est alors susceptible de se raréfier considérablement.
8	a) Côtes rocheuses abritées La perméabilité est variable en fonction du substrat. Les densités de la faune et la flore qui y sont liées peuvent être élevées. Les hydrocarbures adhéreront aux surfaces rugueuses le long de la ligne de marée haute mais pas sur les surfaces humides de la partie inférieure de l'estran. Les hydrocarbures pénétreront au travers de débris anguleux peu compacts, une persistance à long terme est possible. b) Côtes artificielles abritées Inclut les digues, les jetées etc. Voir ci-dessus.
9	a) Vasières abritées (tidal flats). Vase meuble, avec parfois du sable et des coquillages. Fréquemment ramenés par les marais. La faune des sédiments peut y être dense, c'est une zone importante pour les oiseaux des zones humides. Les hydrocarbures n'adhèrent pas aux sédiments humides, cependant, ils s'accumuleront au niveau de la ligne de marée haute et pourront pénétrer dans les terriers. Potentiel de dépôt de sédiments contaminés. La faune des sédiments est alors susceptible de se raréfier considérablement. b) Berges basses abritées, recouvertes de végétation. Berges basses des chéneaux, recouvertes d'herbes ou de racines d'arbres exposées. Les hydrocarbures sont susceptibles de recouvrir les plantes et les arbres à la montée des eaux.
10	a) Marais d'eau salée ou saumâtre. Zones humides tempérées et subtropicales dominées par les plantes des marais. Les sédiments correspondent à de la vase riche en matières organiques, sauf sur les rebords des chéneaux qui peuvent être sableux. Faune et flore abondante. Les hydrocarbures adhèrent à la végétation émergée. Les hydrocarbures lourds resteront à la périphérie des marais, alors que des hydrocarbures plus légers sont susceptibles d'y pénétrer plus profondément. Les hydrocarbures moyens et lourds ne pénètrent pas dans les sédiments humides, mais sont susceptibles de s'accumuler dans les cuvettes. Les hydrocarbures légers peuvent pénétrer à travers les premiers centimètres des sédiments. La faune et la flore sont alors susceptibles de se raréfier considérablement. b) Mangroves. Les marais tropicaux et subtropicaux d'eau salée recouverts de broussailles et de buissons. Des substrats variés, mais principalement vaseux. Faune et flore abondante. Les hydrocarbures adhèrent à la végétation émergée et tendent à se concentrer sur les bermes ou le littoral, où ils sont susceptibles de pénétrer les sédiments. Potentiel de contamination chronique. La faune et la flore sont alors susceptibles de se raréfier considérablement.

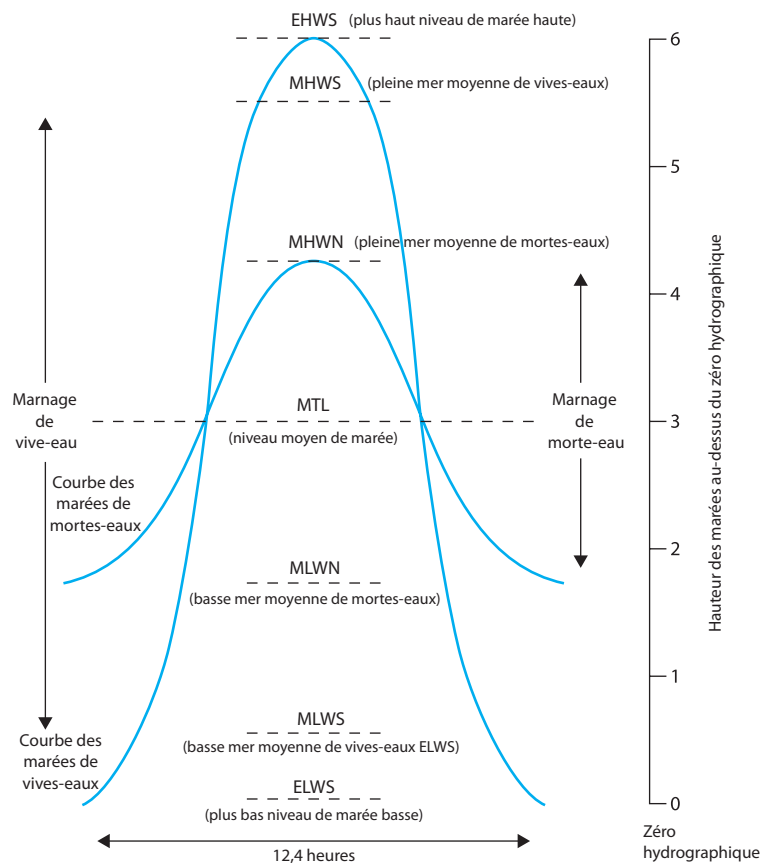
Impacts écologiques des hydrocarbures sur le littoral

Organismes vivants du littoral et sensibilité aux hydrocarbures

Les espèces animales et végétales vivant sur le littoral en raison de la source d'aliments, des abris et des substrats qu'il leur procurent sont également soumis à des stress environnementaux. Ces stress sont liés à l'action des vagues, au mouvement des sédiments et aux marées (voir la figure 2) qui sont responsables de fluctuations journalières et saisonnières significatives au niveau des températures, de la salinité, de la dessiccation, de la prédation et de la disponibilité en nutriments et en l'oxygène. Le littoral étant une zone très dynamique, chaque espèce qui l'occupe y trouve une période où les conditions sont optimales pour elle. Les bénéfices et les stress génèrent un zonage vertical marqué entre le point le plus haut de la côte, où la plupart des organismes sont robustes, et la partie basse de la côte présentant une biodiversité plus importante. Les communautés côtières sont également structurées par d'autres facteurs environnementaux liés à leur habitat, y compris le type de substrat, l'érosion et la sédimentation, l'exposition (au soleil) et la zone biogéographique. Dans les régions polaires, les côtes sont également très marquées par l'érosion générée par les glaces (affouillement des fonds marins par la glace). Les effets de la contamination sur les espèces et les communautés sont largement influencés par l'ensemble de ces facteurs physiques, mais aussi par la sensibilité biologique qui est spécifique à chaque espèce.

L'écologie de la zone néritique peu profonde est étroitement liée à sa côte adjacente tandis que, comme décrit dans la section précédente, certains des processus physiques affectant l'hydrocarbure échoué sur le littoral peuvent entraîner une exposition accrue à l'hydrocarbure dans la zone néritique peu profonde. Ces zones se

Figure 2 Un cycle typique de marées diurnes



Le cycle des marées est contrôlé par la force gravitationnelle de la lune et du soleil, si bien que le cycle lunaire d'environ quatre semaines enchaîne les marées de vives-eaux (pleine lune), les marées de mortes-eaux (dernier quartier), les marées de vives-eaux (nouvelle lune), les marées de mortes-eaux (premier quartier) et une pleine lune.

caractérisent souvent par biodiversité et productivité élevées. Pour en savoir plus sur les habitats et les communautés des eaux peu profondes, consultez les sections ci-dessous ainsi que le Guide de bonnes pratiques de l'IECA-IOGP sur les impacts des déversements d'hydrocarbure sur l'environnement marin (IECA-IOGP, 2015a).

Les lagons côtiers sont également étroitement associés au littoral adjacent et sont particulièrement importants dans certaines parties du monde, notamment en Arctique. Ils sont exposés aux fluctuations environnementales qui tendent à limiter leur biodiversité. Cependant, ils peuvent présenter une productivité élevée et sont souvent peuplés par des espèces spécialisées. Les échanges d'eau avec la mer sont, par définition, limités, toute pénétration significative des hydrocarbures à l'intérieur du lagon étant aussi limitée. Cependant, si les hydrocarbures y pénètrent, ils persisteront vraisemblablement et pourraient avoir des impacts écologiques.

Le comportement ou la biologie (par ex. les migrations, la reproduction, la mue, le frai) de nombreuses espèces sont rythmés par les saisons ce qui est susceptible d'affecter leur vulnérabilité à un déversement d'hydrocarbures. Sur les littoraux, cela concerne tout particulièrement la migration des oiseaux des marais, la nidification des tortues, le développement saisonnier et le dépérissement des plantes des marais salants. Ces problématiques et bien d'autres sont traitées plus loin dans ce guide.

Plantes et invertébrés du littoral

Toutes les espèces de l'estran peuvent être potentiellement contaminées, directement ou indirectement, par les hydrocarbures. Cependant, certaines sont plus vulnérables ou sensibles que d'autres. La majorité des herbiers marins sont par exemple protégés naturellement par un revêtement muqueux qui résiste aux hydrocarbures. Ainsi, il existe de nombreux exemples d'herbiers marins sévèrement souillés mais qui se sont auto-nettoyés et sont ressortis apparemment indemnes sans intervention humaine. À l'inverse, les mangroves peuvent être exterminées par un hydrocarbure visqueux asphyxiant les pores respiratoires situés sur leurs racines. Les mangroves dépendent de ces pores qui assurent l'oxygénation de la plante.



David Levell

Cette photographie montre une surface rectangulaire rocheuse (au centre) qui n'a pas été nettoyée et entourée de rochers lavés à haute pression afin d'éliminer les hydrocarbures suite au naufrage du Sea Empress en 1996. Le nettoyage à haute pression a également éliminé les algues et les autres organismes côtiers qui n'ont recolonisé les habitats que plus de deux ans après. Les algues souillées mais non nettoyées semblent ne pas avoir été affectées par la contamination.

Les organismes pourront, en fonction du lieu où ils se trouvent et de leur mode de vie, être exposés aux hydrocarbures par différentes voies, et le mécanisme d'action pourra également varier. Le contact physique direct des plantes et des animaux à la surface de la côte peut provoquer un engluement et perturber l'alimentation. De plus, toute exposition prolongée à des concentrations élevées en hydrocarbures peut avoir des effets toxiques. Lorsque les hydrocarbures ne pénètrent pas dans les sédiments, les animaux évoluant dans ces habitats sont susceptibles d'être moins affectés. De même, l'exposition aux hydrocarbures dispersés dans la colonne d'eau située dans la zone de l'estran où les eaux sont peu profondes, sera plus importante pour les organismes filtreurs, alors que de nombreux animaux fouisseurs seront relativement protégés.



Les moules, les palourdes et les huîtres sont des bivalves filtreurs, qui se servent de leur corps pour filtrer activement de grandes quantités d'eau et capturer les particules de matière organique. Par conséquent, leurs tissus pourraient être contaminés par des concentrations en hydrocarbures qu'ils ne pourraient métaboliser rapidement et qu'ils n'élimineraient qu'après plusieurs semaines voire plusieurs mois (ce processus est appelé détoxification). Dès lors, les bivalves sont souvent utilisés comme des indicateurs de l'exposition aux hydrocarbures et de la régénération. Même si les bivalves peuvent survivre à des concentrations élevées en hydrocarbures dans leurs tissus, des études toxicologiques font état d'effets sublétaux notamment une croissance et des capacités reproductives réduites et d'autres effets sur les tissus.

Moules filtreuses submergées par les eaux durant la marée haute. L'eau est prélevée par le siphon inhalant le plus grand (à franges) et expulsée par le siphon exhalant le plus petit. Les hydrocarbures peuvent également être prélevés et absorbés par l'organisme puis progressivement éliminés.

De nombreux escargots de mer sont des brouteurs et sont dès lors vulnérables et sensibles aux hydrocarbures présentant une toxicité aiguë et recouvrant les surfaces sur lesquelles ils se nourrissent. Les impacts sur les populations de ces espèces et les effets sur la diversité des plantes et des algues dont ils se nourrissent, ont été décrits à la suite de nombreux déversements d'hydrocarbures.

Les petits crustacés, en particulier les amphipodes (un groupe très diversifié de petites crevettes), présentent des symptômes aigus d'intoxication lorsqu'ils sont exposés à un hydrocarbure frais. Les études sur les sédiments de l'estran ou les tapis d'algues qui sont généralement colonisés par des densités élevées d'amphipodes ont montré que leurs populations sont souvent appauvries lorsque ces habitats ont été exposés à des concentrations importantes en hydrocarbures dissous dans l'eau ou à des hydrocarbures dispersés sur de longues durées.

De nombreux autres invertébrés, comme les éponges, les coraux et les ascidies, sont physiquement attachés aux rochers, aux plantes et aux autres substrats immobiles. Ainsi, même s'ils sont exposés aux hydrocarbures et présentent des effets toxiques, ils resteront en place. La plupart de ces espèces privilégient les habitats qui ne sèchent pas lors des marées basses, comme la partie inférieure de la plage ou les habitats humides et ombragés comme les bassins et les surplombs. La majorité de ces espèces, même dans les cas de concentrations élevées en hydrocarbures, survivront vraisemblablement sauf lorsqu'elles seront confrontées à une exposition prolongée localisée ou asphyxiées par un hydrocarbure persistant. De nombreuses études faisant suite à des déversements réels ont fait état d'impacts limités sur ces invertébrés sessiles sauf en cas de perturbation du substrat sur lequel ils vivent.

Comme décrit dans la section précédente, la lenteur de la régénération d'une communauté littorale est le plus souvent due à la persistance des hydrocarbures, la régénération de l'habitat contaminé s'effectuant généralement par étapes successives. Cependant, il est possible que la régénération reste lente, même en l'absence de persistance de l'hydrocarbure. La vitesse de régénération est alors déterminée par la vitesse des processus écologiques et notamment par le recrutement de nouveaux colonisateurs, la compétition entre les espèces et la vitesse de croissance. La recolonisation du littoral par les algues et la plupart des

invertébrés suppose l'installation de spores et de larves provenant du plancton, ce qui se produit en principe une fois par an voire plus souvent. Dans le cadre d'un tel processus, la vitesse de recolonisation dépend de nombreux facteurs biologiques et environnementaux, mais il reste peu probable qu'elle soit fortement affectée par un déversement d'hydrocarbures si aucun résidu ne persiste. D'autres espèces d'invertébrés ne passent pas par le stade larvaire planctonique, leur recolonisation s'opérant alors via des migrations depuis les zones littorales voisines. Ici aussi, la vitesse de régénération dépend de nombreux facteurs mais pourrait être plus



Les habitats de la partie inférieure de la côte sont peuplés par de nombreuses espèces ici notamment par un crampon de varech, des éponges, des ascidies, des algues corallinales et des œufs de poisson.

lente dans le cas où les populations auraient été appauvries sur une zone étendue. La lenteur de la régénération de certaines communautés évoluant sur des côtes rocheuses à la suite du naufrage du *Torrey Canyon* survenu en 1967 s'explique notamment par la lenteur du processus de recolonisation par des espèces de patelles (un mollusque) à la périphérie des zones touchées. Un faible taux de croissances peut également avoir des effets à plus long terme, notamment lorsque celui-ci affecte des espèces jouant un rôle structurel clé au sein d'une communauté qui s'agrandit avec la taille de chaque organisme. C'est tout particulièrement le cas des mangroves dont la croissance est accompagnée par le développement de vastes communautés, la taille ayant également une incidence sur le rôle écologique joué par les autres organismes présentant de faibles taux de croissances. Ainsi, un grand bivalve présente une capacité plus importante de filtrage de l'eau, d'excrétion et de production d'œufs et de sperme que toute population de juvéniles colonisant les mêmes fonds marins. Enfin, les impacts des activités de nettoyage peuvent aussi ralentir le processus de régénération, cet aspect étant traité dans la section suivante de ce document.

Vertébrés du littoral

Le littoral constitue un habitat important en termes d'alimentation, de reproduction et d'alevinage pour de nombreuses espèces de poissons lorsque la marée est haute. En outre, de nombreux juvéniles et certains poissons adultes trouvent refuge dans les bassins ou les habitats de la partie inférieure de la côte lorsque la marée se retire. Certaines espèces migratoires, comme les saumons et les anguilles, peuvent traverser les zones intertidales lors de leur migration vers ou depuis les habitats d'eau douce. La contamination des habitats littoraux par les hydrocarbures a le potentiel d'affecter ces espèces, les études menées après le déversement ayant décrit certains impacts sur les stocks halieutiques du littoral. Le hareng du Pacifique pond ses œufs sur le varech, dans la partie inférieure de l'estran, l'étage circalittoral ou subtidale, où les eaux sont peu profondes. Ils y sont vulnérables aux hydrocarbures dispersés et dissous dans l'eau. L'hydrocarbure déversé en 2007 lors du sinistre du *Cosco Busan* a eu des effets toxiques sur les embryons des harengs et a entraîné une mortalité élevée de ces embryons dans la Baie de San Francisco. Les poissons, à leur stade larvaire ou juvénile, sont sensibles aux hydrocarbures, cependant, les stratégies reproductives de la plupart des espèces tolèrent des pertes significatives de juvéniles résultant généralement de la prédation ou d'autres causes de mortalité. Il suffit qu'une petite quantité ne survive pour maintenir les stocks d'adultes.



Des œufs de hareng sur la partie inférieure de l'estran.

Un bécasseau variable se nourrissant à marée basse.



Les littoraux, et notamment les vasières et les berges vaseuses des baies protégées, constituent également des espaces privilégiés pour l'alimentation, le rassemblement et la nidification de nombreuses espèces d'échassiers, de sauvagines et d'autres espèces d'oiseaux. De nombreuses espèces sont migratoires et sont susceptibles de se rassembler en grand nombre avant et durant leurs migrations saisonnières. À de telles périodes, elles sont tout particulièrement vulnérables aux déversements d'hydrocarbures. Cependant, leur vulnérabilité aux déversements d'hydrocarbures dépend largement du temps qu'elles passent à la surface de la mer. Comme la plupart des espèces migratoires ne passent guère de temps à la surface, leur potentiel de contamination est moindre

que celui des oiseaux espèces côtières. Ainsi, les taux de mortalité sont généralement bas, par rapport aux populations évoluant dans la région au moment du déversement. Bien que la plupart préfèrent les eaux douces, les sauvagines qui peuplent les estuaires et les baies protégées sont plus vulnérables dans la mesure où elles restent sur l'eau. Selon certaines théories, les impacts sur la disponibilité des aliments sont susceptibles d'avoir des effets indirects sur les populations de certaines espèces d'oiseaux côtiers après déversement. Dans le scénario le plus défavorable, ceci pourrait affecter les besoins énergétiques des populations d'échassiers. 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. Ils seront particulièrement vulnérables juste après de longues migrations, lorsque leurs réserves en énergie sont basses. Les opérations de nettoyage peuvent également perturber la nidification de certaines espèces, notamment les sternes et les goélands, qui font leur nid sur les bancs de sable, les récifs de galet et d'autres habitats situés juste au-dessus du niveau de marées hautes, près des plages de sable.

Un phoque d'Amérique du Sud sur la côte.



Les phoques, les lions de mer et les morses (ci-après appelés pinnipèdes) séjournent sur les côtes durant des périodes variables, en fonction des espèces, de l'âge et de l'époque de l'année. À l'occasion des grands rassemblements saisonniers, des échoueries biens établies sont formées : ils s'y reposent après avoir mangé, s'être reproduit ou après la mue. Même si leurs corps sont relativement insensibles à la toxicité des hydrocarbures, les muqueuses de leurs yeux et leur nez peuvent être inflammés. En outre, les pinnipèdes seront plus vulnérables sur ou à proximité de leur échouerie. La plupart des espèces donnent naissance sur la côte, et les juvéniles de certaines espèces, qui peuvent être

sensibles au risque d'engluement généré par les hydrocarbures, peuvent rester sur la côte pendant plusieurs jours. Les cadavres d'un petit nombre de phoques, principalement des bébés phoques, ont été retrouvés à la suite de plusieurs déversements. Cependant aucune conséquence significative sur les populations n'a été signalée.

Dans certaines parties du monde, les femelles tortues font leur nid au-dessus de la ligne de marée haute des plages de sable, revenant au même endroit à la même époque chaque année. Leurs œufs et les juvéniles récemment éclos seront vulnérables aux hydrocarbures atteignant ces zones durant la saison de nidification. Leurs nids sont enterrés si bien que les œufs sont généralement protégés. Cependant, les juvéniles sont plus

vulnérables lorsqu'ils traversent la plage en groupe. Ces juvéniles sont plus sensibles à la toxicité de l'hydrocarbure que les adultes. Des juvéniles de tortue morts ont été signalés après certains déversements d'hydrocarbures. Les niveaux des populations locales peuvent être affectés lorsque les aires de nidification des tortues sont sévèrement affectés pendant la période de nidification. Cependant, de tels effets n'ont jamais été rapportés. Pour une analyse plus détaillée de cette problématique, consultez le Guide de bonnes pratiques de l'PIECA-IOGP sur les impacts des déversements d'hydrocarbure sur l'environnement marin (PIECA-IOGP, 2015a)



©Rainer von Brandis/Stockphoto

Une tortue faisant son nid au-dessus de la ligne de marée haute d'une côte sableuse.

Côtes rocheuses

Les côtes rocheuses englobent une grande variété d'habitats. Elles sont généralement classées en fonction de leur exposition aux vagues et de l'amplitude des marées. Cependant, d'autres facteurs jouent également un rôle important sur leur écologie et les impacts potentiels d'un déversement d'hydrocarbure. Les invertébrés et les plantes vivant dans les espaces dégagés des zones rocheuses ne sont pas protégés contre les conditions météorologiques et l'activité de la mer. Cependant, les côtes rocheuses constituent des zones accidentées à de nombreux titres, avec des pentes variées, des surplombs, des fissures, des crevasses, des grottes, des bassins, divers substrats situés sous les rochers et des surfaces de texture variées. La diversité des espèces peuplant les côtes rocheuses résulte de la variété de ces caractéristiques. En effet, les côtes abritent une grande variété d'habitats et de micro-habitats proposant divers niveaux de protection contre le soleil ou l'activité de la mer.

L'exposition aux vagues et la puissance des mouvements des eaux constituent des facteurs essentiels dans la mesure où de nombreuses plantes et de nombreux animaux ne sont pas adaptés pour faire face aux vagues et aux courants forts qui peuvent les arracher ou les déloger des roches. La persistance des hydrocarbures dépend aussi largement de ces éléments. Par conséquent, les surfaces rocheuses qui sont exposées à la forte action des vagues sont généralement dominées par les crustacés cirripèdes (comme les balanes) et les patelles qui sont de petits escargots fermement attachés mais mobiles qui peuvent trouver refuge dans de petites crevasses. Un hydrocarbure déversé atteignant de telles surfaces pourrait entraîner la mort des animaux contaminés, même s'il est peu probable que l'hydrocarbure persiste. Les processus de régénération naturelle peuvent démarrer lorsque les concentrations en hydrocarbures chutent à des niveaux ne constituant plus un obstacle à la recolonisation. En Arctique, les côtes rocheuses sont soumises à un processus d'érosion sous l'action de la glace, limitant la diversité mais aussi la persistance des hydrocarbures et leurs impacts potentiels. Les algues et de nombreux autres invertébrés sont mieux adaptés aux surfaces des côtes rocheuses qui procurent un niveau élevé de protection contre l'action des vagues. Dès lors, les côtes rocheuses protégées des vagues, dans les estuaires et les autres baies, sont généralement dominées par une variété



Zonage et micro-habitats sur une côte rocheuse escarpée.

de micro-algues marrons, vertes et rouges, alors que divers invertébrés vivent sur et en-dessous des algues. Il est peu probable que des hydrocarbures atteignant ces habitats soient éliminés rapidement. La régénération consécutive à un tel déversement pourrait nécessiter beaucoup de temps. Les structures artificielles, y compris les jetées, les digues et les autres installations de protection du littoral, sont colonisées par des communautés semblables et présentent les mêmes caractéristiques qui augmentent ou diminuent la persistance des hydrocarbures.

L'échelle ESI comprend quatre catégories et deux sous-catégories de côtes rocheuses et de côtes artificielles composées de substrats solides (ESI 1, 2, 6 et 8 -voir le tableau 1 aux pages 12 et 13) qui décrivent l'évolution probable et la persistance des hydrocarbures échoués sur ce type de côtes. Elles incluent, dans une certaine mesure, l'influence des pentes, des bassins et des autres caractéristiques. Cependant, l'hétérogénéité des habitats des côtes rocheuses rend souvent difficile toute prédiction des impacts ou de la persistance. La plupart des côtes exposées aux vagues comporte des zones abritées dans lesquelles les hydrocarbures peuvent persister. Certaines côtes abritées peuvent se composer de surfaces verticales exposées desquelles les hydrocarbures seront facilement éliminés.

Les patelles, les bigorneaux et les autres mollusques qui se nourrissent d'algues constituent un des groupes d'invertébrés caractéristiques des côtes rocheuses parmi les plus sensibles aux effets toxiques aigus des hydrocarbures. La mortalité des patelles a été maintes fois rapportée à la suite de déversements. Dans le monde entier, les patelles jouent un rôle important sur le plan écologique dans de nombreux habitats des côtes rocheuses. Elles constituent l'espèce privilégiée des programmes de surveillance des côtes rocheuses à proximité des infrastructures pétrolières. Des études ont montré que même de faibles quantités d'hydrocarbure frais sur le pied d'une patelle la contamineront et pourraient la faire tomber des rochers, sa survie étant alors peu probable. Cet effet a été démontré lors du déversement d'hydrocarbure suite au naufrage du *Sea Empress* survenu en 1996, à l'occasion duquel un taux de mortalité élevé des patelles (supérieur à 50 % en moyenne et à 100 % sur certaines surfaces) a été signalé sur les côtes gravement contaminées proches de la source du déversement. Cependant, lorsque des quantités importantes d'hydrocarbures vieillies provenant du même déversement ont atteint les côtes rocheuses après avoir passé huit jours en mer, les patelles contaminées de ces côtes ont été moins affectées en raison du niveau de toxicité bien inférieur de l'hydrocarbure.

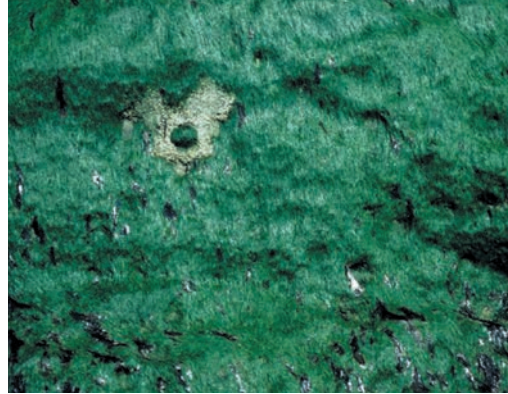
Sur les sites exposés aux vagues dans lesquels les populations de patelles ont été gravement contaminées par le naufrage du *Sea Empress*. Les dernières traces d'hydrocarbures ont été éliminées par les tempêtes hivernales, la régénération de la communauté s'est faite en plusieurs étapes successives similaires à celles observées à la suite des autres déversements. En l'absence de la pression exercée par les patelles sur les algues vertes dont ils se nourrissent, celles-ci se développent rapidement pour former un dense revêtement recouvrant les rochers. Les algues brunes fucacées, qui sont très rares sur les côtes exposées aux vagues, ont colonisé la côte et sont devenues dominantes après un an. Elles ont persisté pendant près de trois ans avant d'être éliminées par l'action des vagues au fil de leur croissance. Pendant ce temps, les patelles juvéniles provenant des larves planctoniques ont rapidement grandi durant le premier hiver sur les algues alors abondantes. La densité de la population de patelles a atteint des niveaux très élevés après deux ans et la structure de la population a retrouvé les mêmes caractéristiques qu'avant les déversements après cinq ans.

Comme indiqué plus haut dans cette section, les amphipodes constituent un autre groupe d'espèces connus pour être sensibles à la toxicité des hydrocarbures. En outre, d'autres espèces se développent généralement dans les zones denses des herbiers des côtes rocheuses et dans les crampons de varech. Certaines études post-déversement ont décrit une disparition presque totale des populations amphipodes dans les habitats formés par les côtes rocheuses exposées à des concentrations élevées en hydrocarbures sur une courte durée. Cependant, une fois les concentrations en hydrocarbures revenues au niveaux ambiants, la régénération des populations concernées se fait dans un délai inférieur à deux ans et souvent en quelques mois.

Les hydrocarbures visqueux se collant et séchant sur des surfaces rugueuses ou se concentrant dans des poches pourraient provoquer un engluement des invertébrés. Les balanes sont des filtreurs présents en grand nombre dans les habitats des côtes rocheuses. La mortalité pourrait être élevée si les hydrocarbures se y



(a) Après une semaine : des patelles moribondes qui se sont détachées des rochers après avoir été contaminées par un hydrocarbure frais.



(b) Après trois mois : une patelle restée seule dans une zone habituellement très peuplée, entourée d'une épaisse couche d'algues vertes qui s'est développée à la suite de la disparition de la pression des patelles qui s'en nourrissent.



(c) Après trois mois : une couverture verte s'étend dans toute la Baie de West Angle et sur la côte adjacente.



(d) Après un an : l'étape suivante de la colonisation - le développement d'algues fucacées dans une zone dans laquelle les spores sont habituellement broutées par les patelles.



(e) Après un an : les balanes et les patelles ayant survécu sont toujours recouvertes par des algues vertes.



(f) Cinq ans après le déversement : repopulation par une communauté dominée par les patelles et les balanes caractéristique de ce site.

À gauche : exemples d'impacts et de régénération à West Angle Bay, Milford Haven, Pays-de-Galles, à la suite du déversement d'hydrocarbures du Sea Empress en 1996.

adhérait, et interrompait ou perturberait leur capacité à se nourrir. Après l'élimination des balanes ayant péri et des dépôts d'hydrocarbure persistants, la côte peut être recolonisée par de nouvelles populations de balanes et la régénération est généralement rapide.

Alors que la majorité des algues sont résistantes à la toxicité des hydrocarbures, certaines algues rouges sont relativement sensibles. Les algues corallinales notamment, qui peuplent habituellement les habitats des parties inférieures de la côte rocheuse et les cuvettes, pourraient blanchir et périr à la suite d'un contact avec des hydrocarbures. Les lichens, sur les parties supérieures des côtes rocheuses au-dessus du niveau de marée-haute, sont parfois vulnérables aux hydrocarbures projetés dans cette zone lors des intempéries. Ces plantes à la croissance lente, composées d'un symbiote spécifique d'algues et de champignons, peuvent être sensibles à l'engluement physique et les concentrations élevées en hydrocarbures dissous. La mortalité et la régénération lente des ensembles de lichen ont été décrites à la suite de nombreux déversements, et notamment le sinistre de l'*Erika* survenu en 1999 en Bretagne, France.

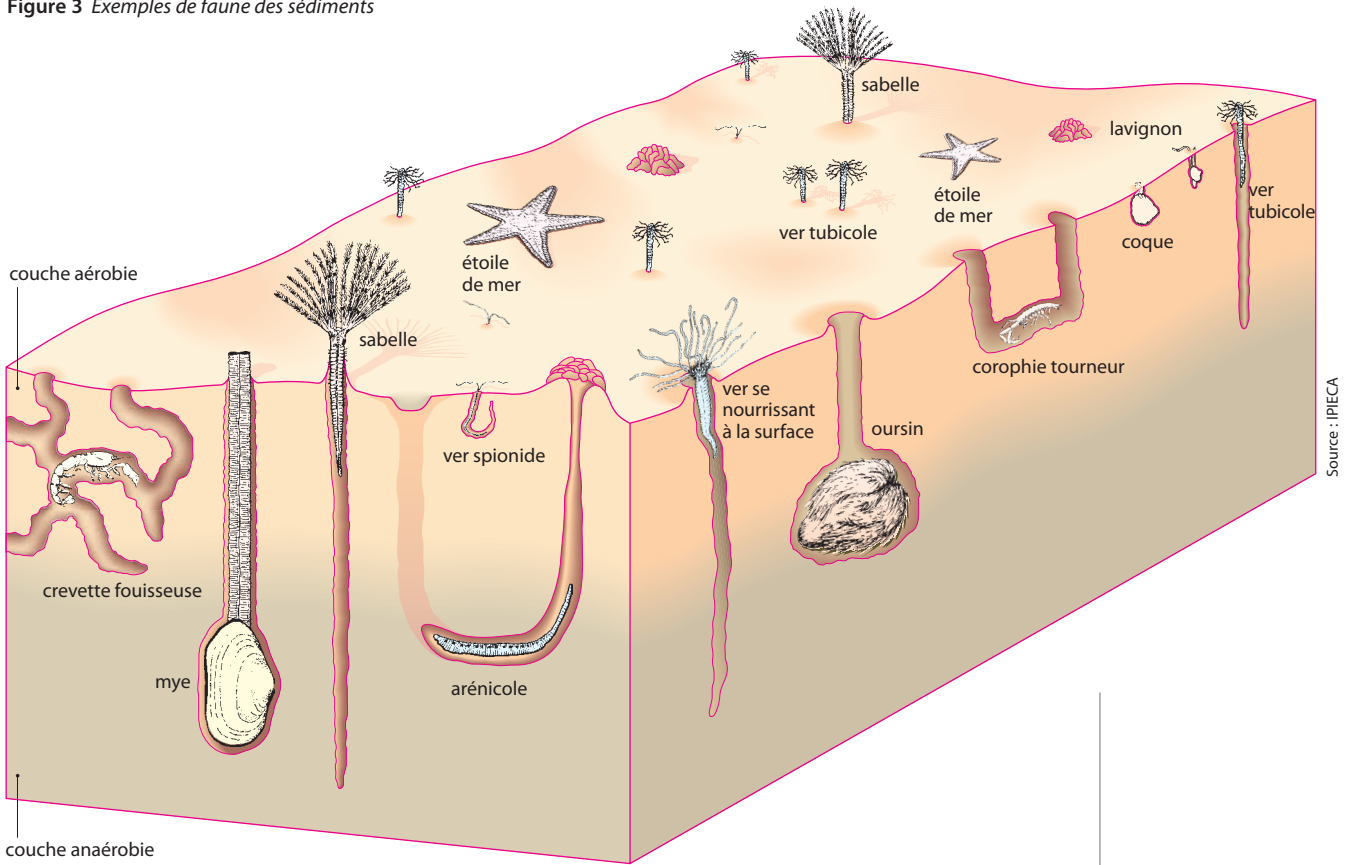
Des études comparatives des communautés d'algues des côtes rocheuses menées jusqu'à deux ans avant et moins d'un an après le naufrage du *Prestige* en 2002 sur les côtes de la Galice en Espagne, n'ont pas permis d'identifier des changements significatifs, même sur les sites qui avaient été gravement contaminés.

Les zones des côtes rocheuses dans lesquels les hydrocarbures visqueux sont susceptibles de persister incluent les fissures et les trous de la partie supérieure de la côte protégés par rochers, les cuvettes dans la roche sur les côtes protégées des vagues et les interstices situés entre ou sous les rochers et les graviers. Comme décrit dans la section précédente, ces résidus vieillissent habituellement pour se transformer en goudron et présenter une biodisponibilité très faible, tout en pouvant empêcher la colonisation sur leur surface. Dans les cas où la contamination est importante, il est possible que le goudron colmate les habitats côtiers et réduise la complexité de l'habitat. Ce fut tout particulièrement le cas à Curaçao, à la suite du sinistre du *Vivita* survenu en 1986, lors duquel une épaisse couche de goudron a colmaté des côtes de rocs et réduit les micro-habitats ombragés propice aux escargots et autres mollusques, à un tel point que la diversité des espèces avait chuté de 35 % après sept ans.

Côtes sédimentaires

Les sédiments de l'estran peuvent être composés de : plages de graviers ou de sable fin, de structures solides argileuses ou de mélanges complexes de particules minérales fines et grossières. Les côtes sédimentaires se composent entre autres de débris organiques. Leur porosité, leur potentiel à être meuble, la capacité de pénétration de l'oxygène, leur teneur en eau mais aussi leurs autres caractéristiques physiques et chimiques ayant un impact sur l'écologie marine, peuvent varier considérablement. La plupart des organismes vivants sur les côtes sédimentaires se cachent en-dessous de la surface (voir la figure 3 à la page 23). Certains de ces habitats peuvent présenter une diversité et une productivité n'ayant rien à envier à celles des communautés de surface. En fonction de la nature du sédiment et des autres facteurs environnementaux, les communautés d'animaux vivant au sein des sédiments peuvent comprendre des fortes densités de vers, crabes, amphipodes et autres crustacés, palourdes, anémones, concombres de mer et oursins. Ces organismes peuvent être de taille microscopique ou prendre la forme d'espèces de palourdes vivant longtemps et dépasser un kg. Les biologistes spécialistes des sédiments différencient traditionnellement les grands animaux (> 0,5 mm, appelés macrofaune) qui creusent leur terrier dans le sédiment et les petits animaux (appelés meiofaune) qui vivent dans les espaces interstitiels entre les particules des sédiments. Les herbiers forment des prairies denses sur certaines plages de sable, et diverses variétés d'algues, notamment les diatomées et les algues bleues-vertes, peuvent créer un film ou un tapis vert sur les vasières protégées.

Figure 3 Exemples de faune des sédiments



Source : IPIECA

L'échelle ESI comprend six catégories de côtes sédimentaires (ESI 3, 4, 5, 6, 7 et 9- voir le tableau 1 aux pages 12 et 13) en raison de la variété et la richesse des côtes sédimentaires mais aussi de l'effet qu'elles ont sur le devenir et la persistance des hydrocarbures qui y arrivent. L'écologie des côtes sédimentaires et les impacts que les hydrocarbures peuvent avoir varient considérablement en fonction principalement de l'exposition aux vagues, la composition du sédiment, la mobilité et les caractéristiques du drainage, l'apport en matières organiques, la salinité de l'eau et le climat. La plupart de ces facteurs sont étroitement liés.

Les côtes arctiques constituent des environnements rudes qui sont généralement faiblement colonisés.

Des sédiments plus ou moins meubles affectent significativement les communautés d'animaux et de plantes qui y vivent. Relativement peu d'espèces sont capables de tolérer l'instabilité des sables et des graviers exposés à des vagues puissantes et des courants forts. L'action de la glace de mer peut également être à l'origine de conditions difficiles, de nombreuses côtes arctiques étant très faiblement colonisées. La biomasse, la productivité et la diversité des espèces des communautés des côtes sédimentaires tendent à augmenter avec la stabilité de ces dernières. En outre, relativement peu d'espèces aquatiques sont en mesure de supporter les stress inhérents à la vie dans la partie supérieure des côtes à moins que le sédiment ne soit si vaseux et saturé en eau qu'elles sont protégées contre le dessèchement. Par conséquent, la quantité et la variété des formes de vie dans les sédiments bien drainés tendent à diminuer dans les parties supérieures de la côte.



Cependant, il est possible que les herbiers détachés et les autres débris organiques soient parfois déposés le long de la ligne de marée haute, dérogeant ainsi au principe énoncé ci-dessus. Ces matières déposées sur la laisse de mer sont dans une certaine mesure éphémères, leur quantité variant en fonction des saisons. Elles forment une couverture temporaire et constituent une source précieuse d'éléments nutritifs pour les écosystèmes des plages, c'est pourquoi elles sont rapidement colonisées par des animaux spécialisés, incluant les amphipodes (crevettes des sables), des insectes, des araignées et des scarabées. Ces animaux sont opportunistes, leur population fluctuant de manière significative. Cependant, ils jouent un rôle important dans la décomposition des matières accumulées sur la laisse de mer. Ils constituent également une proie privilégiée pour certains oiseaux. Comme tout hydrocarbure arrivant sur la côte tend également à se concentrer dans cette même zone, les communautés de la laisse de mer sont particulièrement vulnérables. Cependant, leur régénération est en principe rapide en raison de leur capacité naturelle de recolonisation rapide.

Les communautés des plages de sable à grains grossiers et meubles et des côtes de graviers (ESI 4, 5 et 6a) se composent généralement de populations clairsemées d'animaux opportunistes, petits (méiofaune) et mobiles aux durées de vie courte. Lorsque les hydrocarbures pénètrent dans les sédiments ou sont enfouis, ces communautés risquent d'être gravement affectées par leur toxicité aiguë. Cependant, la régénération consécutive à toute exposition à un hydrocarbure ou aux activités de nettoyage est en générale rapide sauf lorsque l'hydrocarbure persistant forme une source chronique de contamination.

Les communautés des côtes sédimentaires plus stables, notamment celles composées de sables fins et de sédiments vaseux (ESI 3a, 7 et 9a), sont très différentes d'une côte à l'autre en termes de composition des espèces, de modes de vie, de tailles et d'abondance. Elles peuvent également être très fragmentaires, ce qui n'est cependant pas aussi visible que sur les côtes rocheuses dans la mesure où les animaux vivent en-dessous de la surface. La vulnérabilité des animaux à un hydrocarbure arrivant à la côte dépend dans une large mesure de leurs modes d'alimentation. De nombreux invertébrés sédimentaires, y compris les vers polychètes, se nourrissent de matières organiques contenues dans les sédiments et ont très peu de contact avec la surface. Ils sont relativement bien protégés contre les hydrocarbures à la surface du sédiment, sauf lorsque ceux-ci pénètrent dans les sédiments ou est enfoui. Cependant, les organismes filtreurs et notamment les palourdes bivalves et les amphipodes, ainsi que les autres espèces dont les terriers sont irrigués par un débit constant d'eau oxygéné (par ex. les oursins perforants, certaines crevettes et crabes) sont particulièrement vulnérables à la toxicité aiguë des hydrocarbures. Ils sont susceptibles d'y être exposés même si les hydrocarbures ne pénètrent pas les sédiments ou ne sont pas enfouis. Les animaux exposés aux hydrocarbures dispersés finissent souvent par sortir eux-mêmes du sédiment, pour s'échouer et rester coincés sur la côte.

Les palourdes et les boulettes de goudron échouées sur une plage à Pembrokeshire, au Pays-de-Galles, lors du déversement d'hydrocarbures du Sea Empress, en 1996. L'analyse des tissus des palourdes a permis de confirmer la contamination par l'hydrocarbure déversé.



Lors du naufrage du *Sea Empress* survenu en 1996, des quantités importantes de coques, de palourdes et d'oursins ont été balayés sur les côtes de sable au Sud-ouest du Pays-de-Galles, bien que la contamination du sédiment soit demeurée négligeable. La plupart des palourdes et des oursins proviennent d'espaces situés juste en dessous du niveau de marée basse, dans la zone sublittorale peu profonde, où ils sont très nombreux et vulnérables aux hydrocarbures dispersés depuis le large et le littoral. En absence d'hydrocarbure persistant, la régénération était une fonction du processus naturel de recrutement et de croissance, la plupart des espèces affectées présentant un bon potentiel de recolonisation via les larves planctoniques recrutées à proximité au sein des populations non affectées. La régénération de la plupart des espèces était considérée comme complète au bout de deux ans. Cependant, la plupart des bivalves sont des organismes vivant longtemps, et certaines espèces n'avaient pas encore retrouvé leurs niveaux antérieurs au déversement.

Comme les moules et les huîtres, les palourdes de l'estran accumuleront également des concentrations en hydrocarbures dans leurs tissus, qu'elles sont incapables de métaboliser. En fonction de la concentration et de la toxicité des hydrocarbures, il est possible que les palourdes ne présentent aucun symptôme visible. Cependant, les études sur les effets des contaminations persistantes des sédiments vaseux consécutives au sinistre de l'Arrow survenu en 1970 ont permis d'établir une chute des taux de croissance des palourdes six années après le déversement.

Les amphipodes, comme indiqué à la page 16, sont sensibles à la toxicité des hydrocarbures. Certains sédiments de l'estran se caractérisant par des densités élevées d'amphipodes. Leur population est susceptible d'être appauvrie en cas d'exposition, même brève, de ses habitats, à des concentrations élevées en hydrocarbures solubles ou dispersés. Cependant, la régénération des populations affectées est généralement rapide.

Les crabes, dont beaucoup vivent dans des terriers, constituent une composante importante de nombreuses côtes sédimentaires intertidales des régions tropicales et subtropicales et peuvent dominer certains habitats. Il est possible que les hydrocarbures pénètrent en-dessous de la surface via les terriers, tuant les crabes et laissant des résidus persistants. Les vastes zones de vasières ont été contaminées lors du déversement de la guerre du Golfe survenu en 1991, des populations d'ocypodes et autres crabes fouisseurs étant gravement contaminées. La régénération a été rapide là où l'hydrocarbure n'a pu persister ou a été enterré à des profondeurs supérieures à celles de leur terrier. Cependant, 20 ans après le déversement, la recolonisation de nombreuses zones par les crabes demeurait impossible en raison de la présence d'hydrocarbures.

L'importance des côtes sédimentaires pour les oiseaux des zones humides, les tortues et les autres vertébrés est traitée aux pages 17 – 19.



Ci-dessus, à gauche : des vasières abritées à Dawhat ad-Dafi sur la côte du Golf Persique, en Arabie-Saoudite, contaminées par le déversement d'hydrocarbures survenu en 1991 lors de la Guerre du Golfe. Sur cette photographie, qui date de 2002, Don Aurand, qui a réalisé des études sur l'estran en 1992, à côté d'un trou utilisé comme site de prélèvement qu'il a creusé 10 ans auparavant. La présence du trou, après de nombreuses années, témoigne de la stabilité de l'habitat, résultant de la protection extrême contre les mouvements de l'eau et de l'absence d'activité biologique. Ceci explique pourquoi l'élimination naturelle de la contamination est si lente.

Ci-dessus, à droite : les terriers de crabes visibles sur la photographie sont demeurés inoccupés et sont toujours contaminés par des résidus d'hydrocarbures. Les expériences ont depuis montré que les crabes peuvent vivre dans ces sédiments contaminés, mais que la recolonisation est très lente.

Le déversement a perturbé les processus naturels de cet écosystème, le développement excessif des tapis d'algues bloquant les canaux et réduisant l'infiltration d'eau dans la partie supérieure de la vasière. Des mesures correctrices sont actuellement mises en œuvre et ont montré qu'un raclage délicat des canaux bouchés pouvait augmenter le débit d'eau et favoriser la recolonisation par les crabes.

Le fioul lourd déversé en 2002 lors du sinistre du *Prestige* a contaminé les plages de sable exposées aux vagues le long de la côte de la Galice, en Espagne, et s'est enfoui sous le sable à des profondeurs variables en de nombreux endroits. De faibles concentrations d'hydrocarbures persistent sept ans après le déversement. Les impacts sur les communautés de la plage, y compris la baisse de la diversité et des populations, ont été observés après six mois, mais plus aucun effet n'était détectable sept ans après le déversement.

Les analyses des sédiments côtiers affectés par le sinistre de l'*Hebei Spirit* survenu en 2007 à Taean, en Corée, soulignent une réduction des concentrations en hydrocarbures et de leur toxicité sur les plages de sable exposées sur une période de cinq ans. Cependant, des concentrations toxiques significatives demeurent dans les sédiments des vasières abritées.

Marais salants

Les marais salants (également appelés marais maritimes ou marais littoraux) se développent dans la partie supérieure de l'estran ou les côtes vaseuses abritées. Ces marais sont exposés à l'eau de mer lors des périodes de marée haute et sont dès lors vulnérables aux hydrocarbures flottant. Ils peuvent recouvrir une vaste superficie et sont structurés en étage en fonction de leur place dans l'estran. Ainsi, les zones inférieures, situées juste au-dessus des marées hautes de morte-eau, peuvent être dominées par une espèce de plante unique alors que d'autres plantes coloniseront et auront un avantage concurrentiel plus haut sur la côte. Les espèces de plantes sont généralement plus nombreuses dans les zones supérieures des marais, qui sont plus stables, moins souvent recouvertes par les marées et situées à proximité des communautés terrestres. Les communautés de plantes marécageuses varient également en fonction de la salinité, de la région et du climat. Elles abritent souvent des habitats importants pour les oiseaux, y compris les espèces nicheuses résidentes et les espèces migratoires au printemps et en automne. Les petits mammifères, amphibiens et reptiles peuvent être nombreux dans la partie supérieure des marais, alors que de petits poissons et des juvéniles de poissons se nourrissent et trouvent refuge dans les chenaux. Les mammifères plus grands évoluent dans les marais de

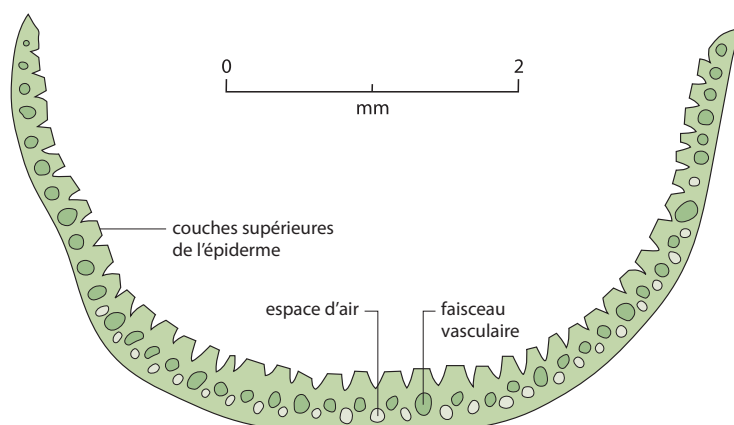
Un marais salant étendu.



certaines régions, alors que les fermiers utilisent parfois les marais comme terres de pâturage pour leurs moutons ou autre bétail. Les petits invertébrés, et notamment les vers, les crabes et les bivalves, peuvent être présents en forte densité dans les sédiments vaseux alors que de petits escargots se nourrissent généralement des tiges, feuilles et de sédiment de surface. Une grande variété d'algues est également présente.

Les feuilles dans les marais salants, qui sont souvent ondulées, présentent une surface importante sur laquelle les hydrocarbures peuvent adhérer (voir la figure 4). Les tiges et les feuilles des plantes peuvent ainsi être détériorées par engluement ou par toxicité chimique. Les hydrocarbures frais, légers et raffinés ont des effets toxiques aigus plus importants, alors que les hydrocarbures noirs vieillis et lourds ont un effet asphyxiant plus marqué. Les hydrocarbures s'échouant sur des sédiments vaseux peuvent les pénétrer via les terriers de crabes, de vers et les espaces vides laissés par les tiges et les racines des plantes mortes, et pourront ainsi détruire les racines vivantes. Cependant, la profondeur de la pénétration et ses effets varient significativement, en fonction de la toxicité aigüe et de la viscosité de l'hydrocarbure ainsi que de la densité et la taille des terriers et des trous. Comme pour les autres effets des hydrocarbures, plus la plante est contaminée, plus l'impact sera important.

Figure 4 Coupe verticale à travers une feuille de spartine, montrant la superficie importante des couches supérieures de l'épiderme



Source : IPECA

Une contamination relativement modeste par un hydrocarbure lourd est susceptible de recouvrir de vastes zones de plantes marécageuses. Cependant, en l'absence de pénétration de l'hydrocarbure dans les sédiments, il est probable que les racines survivront et que la plante survivra. C'est généralement le cas des espèces vivaces présentant de vastes systèmes de racines souterraines constituant des stocks importants de réserves nutritives (glucides et autres éléments nutritifs) pour la plante. Dans les zones tempérées, caractérisées par un cycle naturel de sénescence (dépérissement) durant l'hiver suivi par une repousse au printemps, ces plantes marécageuses vivaces reconstituent leurs stocks à l'automne puis les utilisent durant leur phase de repousse. Ainsi, une contamination substantielle d'un marais survenant en hiver pourrait avoir un effet limité sur la survie de la plante, le même déversement survenant à la fin du printemps, lorsque les réserves souterraines de nourritures ont été épuisées, étant susceptible d'avoir un impact bien plus marqué. La résilience des espèces vivaces dépendra également de la profondeur et de la taille des systèmes de racines.

Les espèces annuelles, composées de nombreuses espèces pionnières qui colonisent la partie inférieure des marais et les autres zones de sol nu sur la partie supérieure de la côte, sont moins résilientes dans la mesure où elles n'ont pas de réserves souterraines de nourriture et s'appuient sur le recrutement annuel via les semences.



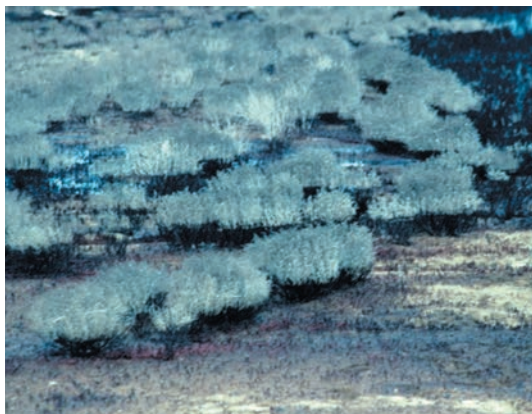
Michel et al., 2008

Le fuel léger (mélange du numéro 6 et du numéro 2) déversé en 2000 depuis le pipeline de Chalk Point, au Maryland, a pénétré à des profondeurs allant jusqu'à 30 cm dans les sédiments des marais saumâtres et se sont concentrés le long des cavités laissées vacantes par les racines des plantes marécageuses et les rhizomes (représentés sur la photo). Les sédiments de surface étaient, dans 25 % des échantillons, toujours toxiques pour les amphipodes même après sept ans. Les hydrocarbures ont également eu des effets modérés, mais significatifs sur le plan statistique, sur la biomasse végétale des marais (en-dessus et au-dessus des sols). Les auteurs de l'étude ont prédit une persistance de l'hydrocarbure dans les sédiments des marais pendant plusieurs décennies.

Si les quantités de graines provenant des zones voisines étaient faibles ou les graines étaient déposées sur la surface d'un sédiment toujours contaminé, la régénération pourrait s'avérer plus lente. Cependant, de nombreuses études de cas ont montré un niveau satisfaisant de recrutement d'espèces annuelles, au cours de l'année suivant le déversement.

Les études des marais salants réalisées en 1996 lors du naufrage du *Sea Empress* fournissent un exemple d'impacts limités et de régénération rapide. Un hydrocarbure brut léger avait recouvert des plantes

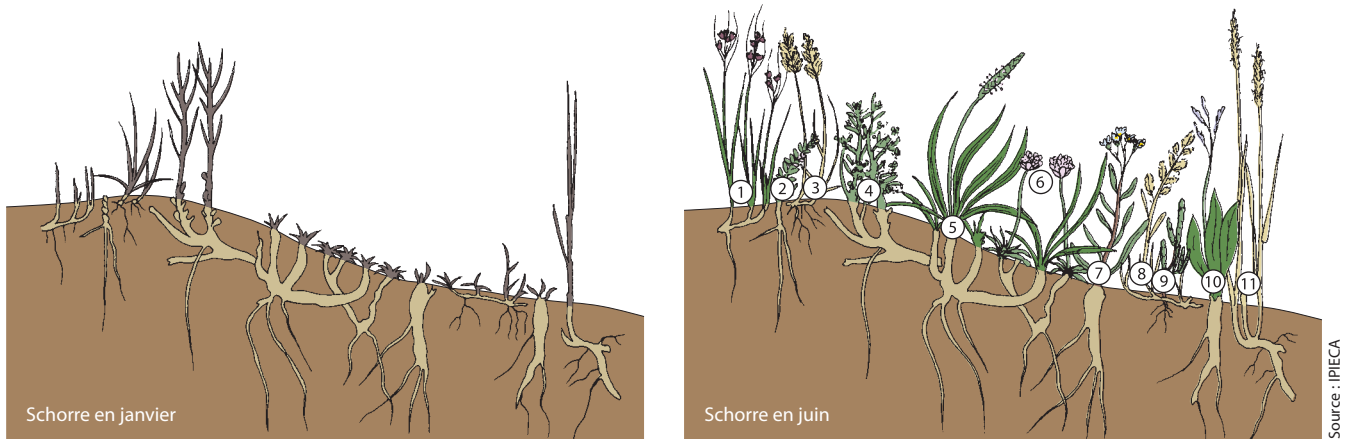
marécageuses dans plusieurs zones de Milford Haven, au Pays-de-Galles. Les études réalisées dans ces marais faisaient état de seulement quelques effets détectables, si bien que la plupart des plantes contaminées ont survécu et qu'aucune contamination significative du sédiment n'a été constatée. Une diminution négligeable des populations de deux espèces a été constatée après un an.



Un marais halophyte contaminé sur la côte du Golfe Persique, en Arabie Saoudite durant le déversement survenu en 1991 lors de la guerre du Golfe.

Cependant, la contamination modérée et significative par le fuel numéro 6 déversé en 2003 depuis la barge *Boucharde B-120* dans la Baie de Buzzards, dans le Massachusetts, a gravement affecté les marais et laissé des résidus persistants.

Figure 5 Les plantes d'un marais salant britannique en janvier et en juin, mettent en exergue les différences entre les espèces vivaces et les espèces annuelles



- (a) Les plantes d'un marais salant Britannique en janvier, mettant en évidence les parties protégées par la terre et la végétation ayant péri naturellement (la végétation morte est représentée en gris).
- (b) Les plantes en juin, avec les parties vulnérables aux hydrocarbures – les feuilles, les tiges et les fleurs. Les plantes annuelles comme la salicorne sont particulièrement sensibles dans la mesure où, à la différence des espèces vivaces, elles ne possèdent pas de vastes systèmes de racines avec des bourgeons protégés et des réserves de nourriture. En outre, la salicorne ne possède pas de réserve de semences persistante dans le sol si bien que si la plante meurt avant l'ensemencement, la recolonisation dépendra uniquement de la dispersion de semences venant d'autres zones.

Numéro

1. Juncus
2. Glaux
3. Fétuque
4. Armoise
5. Plantago
6. Armérie
7. Aster
8. Puccinellie
9. Salicorne
10. Limonium
11. Spartine

Les tentatives initiales visant à replanter certaines des zones affectées ont eu des résultats inégaux, et de vastes zones dénudées ont été signalées deux ans après le déversement. La durée de régénération a été estimée à plus de 10 ans.

Alors que les études des impacts des déversements d'hydrocarbures sur les marais salants sont principalement focalisées sur la végétation, des études relatives aux impacts sur la faune marécageuse, et notamment les crabes et les bivalves du sédiment, ont été réalisées après certains déversements. Voir le chapitre sur les côtes sédimentaires (pages 22 – 26) décrivant les effets sur les organismes vivants dans les sédiments de l'estran.

Les marais salants se développent généralement dans des zones qui ne sont pas exposées aux vagues et aux marées, si bien que l'élimination naturelle des hydrocarbures peut être lente, notamment s'il est visqueux ou s'il pénètre dans le sédiment. Dans certains marais, les hydrocarbures peuvent être enfouis sous les dépôts des sédiments. Les hydrocarbures recouverts par les sédiments ne peuvent être éliminés par l'action des vagues, alors que la biodégradation est généralement lente dans la mesure où les sédiments des marais salants sont généralement anoxiques (dépourvus d'oxygène). Dans une étude, les hydrocarbures enfouis dans un marais pendant 22 ans et hautement dégradés ont pu être identifiés comme du fuel lourd. Les études des sédiments marécageux contaminés par le sinistre du Macondo survenu en 2010 ont permis d'établir la



Photographie d'un marais salant de spartines à Milford Haven, au Pays-de-Galles, 22 ans après qu'un déversement de fioul ait contaminé le marais. Une analyse de l'hydrocarbure a permis d'établir qu'il était toujours identifiable comme un fioul lourd bien que hautement dégradé.

persistance de certains fragments d'hydrocarbure lourd, mais ont aussi fait état d'une dégradation rapide des fragments plus légers sous l'effet des bactéries sulfato-réductrices présentes dans des conditions anoxiques et de champignons décomposant les hydrocarbures. La persistance est généralement plus importante dans les sédiments renfermant des quantités plus importantes de matières organiques.

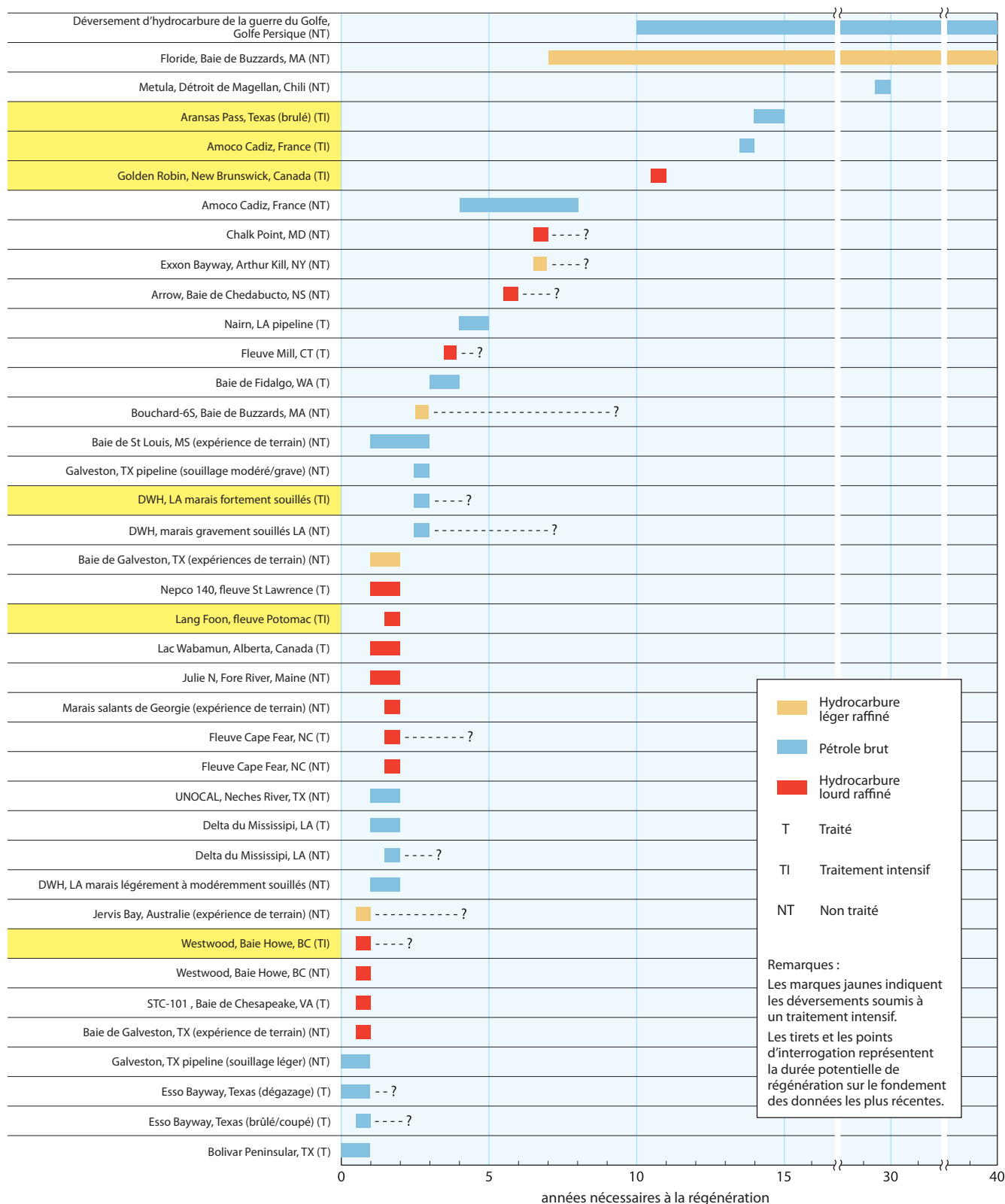
Sur l'échelle de l'ESI, la note la plus élevée est dès lors attribuée aux marais salants (ESI 10). Même si une note unique a été attribuée à tous les marais, les processus d'élimination naturelle peuvent varier en fonction des marais. Ceux situés le long des chéneaux estuariens seront exposés aux mouvements des vagues qui peuvent favoriser l'élimination des hydrocarbures, à l'inverse de ceux situés en arrière des vastes zones de vasières. La persistance des hydrocarbures constitue le principal facteur générant des impacts à long terme dans les marais. Les autres facteurs sont les traitements intensifs ou les espèces présentant un faible potentiel de recolonisation.

Sur 32 études suivant des déversements d'hydrocarbures (comprenant certaines expériences), environ la moitié estimait la durée de régénération des marais impactés à deux ans, un tiers à environ dix ans et six études à plus de dix ans. Dans trois des six études, la lenteur du processus de régénération était principalement due au traitement intensif (voir *Traitement du littoral et régénération* aux pages 36 à 44) alors que les trois impacts les plus durables, qui sont toujours identifiables, sont principalement dus à la persistance des hydrocarbures. Voir la figure 6.

À la suite du sinistre du *Metula* survenu en 1974 à Magellan Strait, au Chili, les marais ont été recouverts par d'épais dépôts d'hydrocarbures, dont certains sont encore visibles dans certaines zones. Les résidus solides résistent naturellement aux processus d'élimination et de biodégradation par les bactéries, cependant, les semences marécageuses germent dans certaines fissures et la croissance lente des plantes dans les climats froids les morcelle progressivement.

Lors du naufrage de la barge *Florida* survenu en 1969 dans la Baie de Buzzards, au Massachussettes, des dépôts de fioul domestique ont recouvert un marais dominé par la spartine à feuilles alternes (*Spartina alterniflora*), des crabes violonistes et des palourdes. Dans les zones les plus lourdement contaminées, les trois espèces présentaient un taux de mortalité élevé. Leur régénération a été progressive après la chute du niveau de toxicité dans les sédiments. Vingt ans après le déversement, les marais salants ressemblent aux autres zones non contaminées. Cependant, des concentrations élevées en hydrocarbures demeuraient dans les sédiments anoxiques des marais. Les études récentes ont montré que des concentrations élevées sont toujours présentes à certains endroits, de 8 à 20 cm en-dessous de la surface, et que les crabes violonistes ne font plus leur terrier dans les couches contaminées du sédiment, laissant présager un comportement d'évitement.

Figure 6 Durées de régénération des marais dans le cadre de divers déversements d'hydrocarbures et d'expériences de terrain



Source : adapté de Michel et Rutherford, 2014.

À droite : marais d'eau saumâtre sur le fleuve Plate à côté de Buenos Aires, en Argentine, après sa contamination lors du sinistre de l'Estrella Pampeana survenu en 1999. Les photographies ci-dessous illustrent les effets des activités de nettoyage intensif et la repousse rapide du marais, depuis le même point de vue, en janvier, avril et octobre 1999 et en novembre 2000. (22 mois plus tard).

La croissance rapide est néanmoins le fait d'espèces opportunistes plus que de la communauté naturelle, qui n'était pas complètement rétablie lors de la dernière étude de 2003. La régénération des zones marécageuses situées à proximité, qui ont été soumises au même niveau de contamination mais qui n'ont pas été traitées, a été rapide, aucune différence avec les zones non souillées n'ayant été identifiée en 2002.



Janvier 1999



Avril 1999



Octobre 1999



Novembre 2000

Le déversement survenu en 1991 lors de la guerre du Golfe a contaminé une vaste zone sédimentaire abritée colonisée par des plantes marécageuses halophytes à croissance lente et longue durée de vie, les crabes fouisseurs et les tapis d'algues. Les hydrocarbures ont pénétré les sédiments via les terriers de crabes, la recolonisation par les halophytes et les crabes s'étant révélée lente. La régénération pourra nécessiter plusieurs décennies et la restauration est en cours (voir page 44).

Les études des impacts sur les marais salants du déversement d'hydrocarbures survenu en 2010 après le sinistre du Macondo sont en cours, les premières analyses ayant fait état de cas de mortalité des plantes marécageuses dans les zones souillées. Certains des marais les plus gravement souillés ont été traités afin d'éliminer les résidus persistants (voir la page 40). Certaines études sur les killies des marais salants réalisées en Louisiane ont prouvé l'existence d'effets sublétaux sur la morphologie des tissus, alors que d'autres études n'ont décelé aucune différence en terme de composition des espèces, de population et de taille des poissons des marais salants dans les sites souillés et non souillés, deux à trois ans après le déversement.

Mangroves

Les mangroves sont des habitats diversifiés et productifs sur le plan biologique, situés sur les littoraux abrités contre les vagues des régions tropicales et subtropicales. Les écosystèmes des mangroves sont dominés par les palétuviers (arbres ou arbustes) qui constituent la principale structure physique au sein de laquelle bien d'autres espèces vivent. Ils peuvent former des franges étroites le long d'estuaires et d'autres baies marines abritées ou des forêts denses dans les zones de deltas. Les communautés marines évoluant au sein des mangroves incluent généralement une variété d'algues et d'invertébrés attachés aux racines et aux troncs des arbres et des arbustes, d'autres invertébrés vivant à la surface des sédiments vaseux ou dans des terriers, des poissons vivants dans les chenaux ou se déplaçant avec la marée pour se nourrir dans la mangrove, des serpents de mer et d'autres reptiles et bien d'autres espèces d'oiseaux de marais qui se nourrissent des organismes vivants dans les sédiments et dans l'eau. La mangrove fournit également un habitat pour une grande variété de mammifères, d'oiseaux, d'autres vertébrés, d'insectes et de plantes. En outre, comme mentionné en introduction, les mangroves fournissent de nombreux services écosystémiques essentiels, dépendant largement de la stabilité de la structure créée par les systèmes racinaires des palétuviers.



IPIECA

À gauche : une mangrove dense de palétuviers noirs à Oman, composée de pneumatophores (racines respiratoires).

À gauche, ci-contre : coupe transversale de pneumatophores, montrant les tissus respiratoires spongieux.

Les arbres et arbustes des mangroves sont adaptés à la vie en eaux salées, leurs racines étant en mesure de s'adapter aux conditions anoxiques qui sont caractéristiques des sédiments vaseux dans lesquels elles se développent. Comme les racines ne peuvent puiser une quantité suffisante d'oxygène à travers le sédiment afin de répondre à leur besoin physiologique, elles ont évolué pour développer des structures respiratoires au-dessus de la surface du sédiment. Différentes formes de racines ont évolué, et notamment les racines de soutien des palétuviers rouges (*Rhizophora*), les pneumatophores des palétuviers noirs en forme de crayons (*Avicennia*) et les pneumatophores des plantes du genre *Sonneratia* en forme de tige, bien plus grandes. Les tissus spongieux respiratoires de ces structures sont reliés aux petits pores de surface appelés lenticelles. Lorsque ces pores sont bloqués, les racines peuvent manquer d'oxygène ce qui se répercutera négativement sur la plante. Si une grande proportion des pores étaient bloqués, la plante pourrait mourir. La perte des feuilles (défoliation) constitue un symptôme précoce de ce stress.

Un déversement d'hydrocarbures persistants pénétrant dans une mangrove est en mesure d'asphyxier les pores respiratoires des palétuviers et d'avoir des effets toxiques sur les racines. Les produits plus légers peuvent avoir des effets asphyxiants plus limités, mais générer une toxicité plus aiguë. Les études de cas réalisées à l'occasion des nombreux déversements dans les mangroves ont documenté ces impacts et prouvé que la contamination de plus de 50 % des racines respiratoires d'un arbre entraînerait vraisemblablement la mort de cet arbre. Suite à la défoliation, le processus de décomposition, qui peut survenir très rapidement dans les environnements chauds et humides, peut dès lors entraîner le dépérissement des arbres affectés et la perte des



Ci-dessus, à gauche : des racines de soutien de palétuviers rouges souillées à la suite du déversement d'un pipeline survenu en 2005 sur le fleuve de Coatzacoalcos, au Mexique.



Ci-dessus, au centre : les mangroves défoliées dans la baie de Guanabara, au Brésil, à la suite d'une contamination par un hydrocarbure déversé cinq mois auparavant.

Ci-dessus, à droite : les restes d'une mangrove dans le port de Mombassa, au Kenya, en 1991 ; la mangrove a été souillée par un déversement de fuel survenu en 1988, et a depuis repoussé.



habitats pour les espèces résidentes. Outre les impacts sur les arbres et les arbustes de la mangrove, les invertébrés vivant dans les sédiments de surface et sur les racines des mangroves seront également vulnérables. Les crabes, les autres crustacés et les escargots sont particulièrement sensibles, si bien que leur population risque d'être appauvrie.

L'abri procuré par les mangroves, notamment au sein même de celles-ci, signifie que tout hydrocarbure s'y infiltrant risque d'y demeurer, à moins que, par chance, il la traverse durant une marée haute. Le plus souvent, il reste concentré sur les berges ou les zones intertidales supérieures à l'intérieur de la mangrove et dans les bassins et les creux peu profonds à la surface du sédiment. Il est également probable qu'il se colle aux surfaces rugueuses des racines des mangroves avec lesquelles il entre en contact. Les sédiments des mangroves sont généralement peuplés par de nombreux crabes, certains gobies et d'autres espèces qui vivent dans des terriers susceptibles de constituer la voie par laquelle les hydrocarbures pénétreront le sédiment. Il est dès lors probable que les hydrocarbures persistent dans les mangroves et y demeurent pendant plusieurs années, notamment lorsqu'il est enfoui dans des sédiments anoxiques. La dégradation de l'hydrocarbure dans les sédiments de surface, peut néanmoins être rapide dans des conditions tropicales alors que la recolonisation naturelle par les semis (appelés propagules) peut intervenir la même année si la contamination en hydrocarbures est relativement légère. Cependant, la mortalité des plantules est susceptible d'être relativement élevée et leur croissance peut être lente lorsque la toxicité des sous-sols est toujours importante. La recolonisation par des espèces liées surviendra parallèlement à la recolonisation des arbres. Cependant, la pousse des arbres jusqu'à une taille pouvant soutenir la diversité associée à une forêt mature (par ex. des oiseaux faisant leur nid etc.) peut nécessiter plusieurs années.

Sur l'échelle de l'ESI, la note la plus élevée (ESI 10) est attribuée aux mangroves, à l'instar des marais salants. Si une note unique est attribuée à tous les mangroves, leur sensibilité à la contamination et leur potentiel d'élimination naturelle sont susceptibles de varier. Le substrat de certaines mangroves est relativement sableux, et présente une perméabilité élevée à l'oxygène, si bien que la mangrove s'appuie moins sur ces racines respiratoires. En outre, les mangroves situées le long des berges des chenaux, seront plus exposées aux mouvements de l'eau favorisant l'élimination des hydrocarbures. Les mortalités élevées des arbres suite à un déversement sont souvent enregistrées juste à l'intérieur des limites de la mangrove, là où les hydrocarbures se concentrent et ne sont pas éliminés par les courants plus forts situés en périphérie.

Les hydrocarbures bruts déversés en 1986 lors du sinistre du Bahia las Minas a souillé plus de 85 km de côte, et notamment des zones de récifs coralliens (page 35), des herbiers marins et des mangroves. Les hydrocarbures ont engendré des pertes substantielles notamment des palétuviers rouges, sur 27 km de côte et une réduction majeure des populations d'épibiotiques qui poussent sur leurs racines de soutien. Des mesures de restauration ont été entreprises afin d'accélérer la régénération de la mangrove, avec un certain succès. Cependant, la restauration des services écologiques de l'habitat mature a nécessité plusieurs années (voir *Restauration des littoraux* à la page 43).

Le déversement du *Solar* survenu en 2006 à Guimaras, aux Philippines, a entraîné la contamination des mangroves par un fuel lourd (numéro 6). La forte mortalité des palétuviers a entraîné la déforestation de vastes zones situées à l'intérieur de la mangrove, des concentrations élevées en hydrocarbures étant observées dans les sédiments de la mangrove. Les concentrations en hydrocarbures ont rapidement chuté dans les échantillons de surface alors que les concentrations de plantules ont progressivement augmenté, excepté là où les arbres morts ont été enlevés.

Récifs coralliens

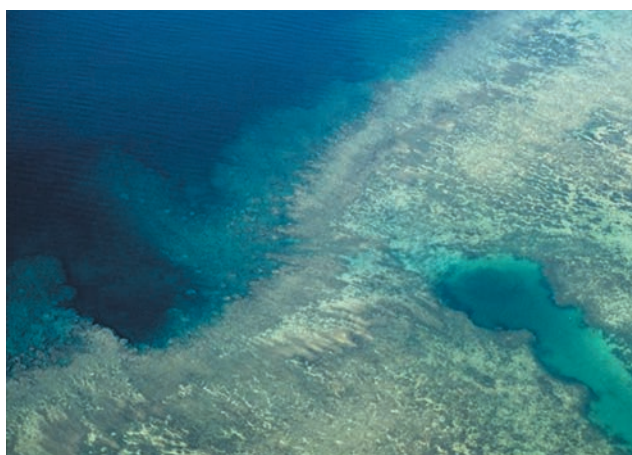
Les récifs coralliens sont en majorité des habitats de la zone subtidale, cependant, de nombreux récifs frangeants incluent de vastes zones coralliennes qui sont en partie découvertes durant les marées basses. Ils tendent à être dominés par quelques espèces résistantes de coraux durs qui peuvent résister aux périodes d'émergence, mais fournissent des habitats à un grand nombre d'autres espèces. Une nappe d'hydrocarbures est dès lors susceptible d'asphyxier temporairement des coraux émergents et d'avoir des effets toxiques aigus. Cependant, il est peu probable que les hydrocarbures persistent sur les habitats du récif. Les zones subtidales peu profondes des récifs frangeants sont très productives et riches en biodiversité, et seront vulnérables et sensibles aux hydrocarbures dispersés. Les concentrations en hydrocarbure sont susceptibles d'être élevées dans les eaux peu profondes en raison du ruissellement de l'eau souillée sur la côte. Cependant, il est souvent difficile d'étudier ces zones.

En 1986, des quantités importantes d'hydrocarbures bruts déversées depuis le réservoir de stockage du terminal de Baha Las Minas à Panama ont affecté les mangroves, les récifs frangeants et les herbiers marins situés dans ces zones. Les coraux durs et mous, les algues coralliennes et les animaux vivant dans les tapis d'algues ont été affectés, principalement via un contact physique direct avec les hydrocarbures à la périphérie du récif. S'en est suivi un développement des tapis d'algues sur les coraux morts. La régénération aux conditions existantes avant le déversement des coraux et de la couverture d'algues a eu lieu en l'espace d'un an. Cependant, la régénération de certains animaux associés aux coraux a nécessité plus de temps. La superficie des herbiers marins a diminué et les densités de crevettes mantes ont chuté et étaient encore faibles cinq ans après le déversement. La contamination chronique par des résidus persistants d'hydrocarbures dans les mangroves voisines a eu des effets sublétaux durables sur la croissance du corail après cinq ans.

Les récifs coralliens sont traités de façon détaillée par le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur les impacts des déversements d'hydrocarbures sur l'environnement marin (IPIECA-IOGP, 2015a).

Ci-dessous, à gauche : vue aérienne d'un récif corallien aux Philippines. Les coraux émergents et les habitats des récifs peu profonds seront vulnérables et sensibles aux hydrocarbures flottants et dispersés.

Ci-dessous, à droite : le déversement du Baha Las Minas survenu en 1986 à Panama a souillé le récif frangeant et les autres habitats du littoral dans des zones déjà étudiées par les chercheurs du Smithsonian Tropical Research Institute.



Traitement et restauration du littoral

La présence d'un hydrocarbure persistant constitue la cause première de la lenteur des processus de régénération, c'est pourquoi il convient d'éliminer le plus tôt possible tout hydrocarbure à l'origine d'une contamination du littoral. Cependant, l'expérience acquise lors des opérations de lutte contre les déversements antérieurs a montré qu'il est possible de causer d'autres dommages en recourant à des méthodes de traitement inappropriée ou trop invasives. Malheureusement, il arrive souvent que les littoraux présentant le potentiel de persistance de l'hydrocarbure le plus important sont également ceux les plus sensibles aux techniques de nettoyage physique. Néanmoins, de nombreux enseignements ont été tirés alors que des approches modernes, incluant les techniques, les technologies, la gestion et la planification des opérations de lutte contre les déversements d'hydrocarbures ont été renforcées. La mobilisation d'un personnel bien formé et expérimenté constitue une exigence permanente, les dispositifs de formation constituant une composante essentielle des plans d'urgence actuels. Bien que de nombreux enjeux demeurent, les techniques de luttes appropriées permettront de réduire significativement les impacts d'un déversement d'hydrocarbures.

La présente section présente certains des enjeux environnementaux qui doivent être pris en compte dans le cadre des opérations de lutte menées sur le littoral, et indique les méthodes possibles pour les gérer. Chaque côte et chaque déversement possèdent des caractéristiques particulières qui soulèvent des enjeux différents. La mise en place d'un processus décisionnel efficace, incluant l'analyse des avantages environnementaux nets (NEBA) (voir ci-dessous) et une technique d'évaluation de la pollution du littoral en vue du nettoyage (SCAT) (voir page 45), est nécessaire.

En fonction des options de luttes envisagées (NEBA)

Lors de la lutte contre un déversement d'hydrocarbures, plusieurs décisions opérationnelles sont prises par les centres de lutte afin de sélectionner les mesures qui permettront d'éliminer ou de traiter les hydrocarbures tout en réduisant les dommages causés aux ressources affectées. Le choix de certaines de ces techniques pourrait avoir des répercussions majeures sur l'environnement et les ressources socio-économiques. Le NEBA (Net Environmental Benefits Analysis) constitue un processus d'évaluation largement utilisé et structuré qui prend objectivement en compte les bénéfices et les impacts potentiels sur toutes les ressources soumises à une ou plusieurs options de nettoyage/de traitement, et les compare avec l'absence de mesure de lutte si nécessaire. Il n'existe aucune méthode standard, le processus pouvant se focaliser sur les ressources écologiques, ou englober une grande variété d'infrastructure, de ressources culturelles, économiques, archéologiques et les autres ressources naturelles de l'environnement.

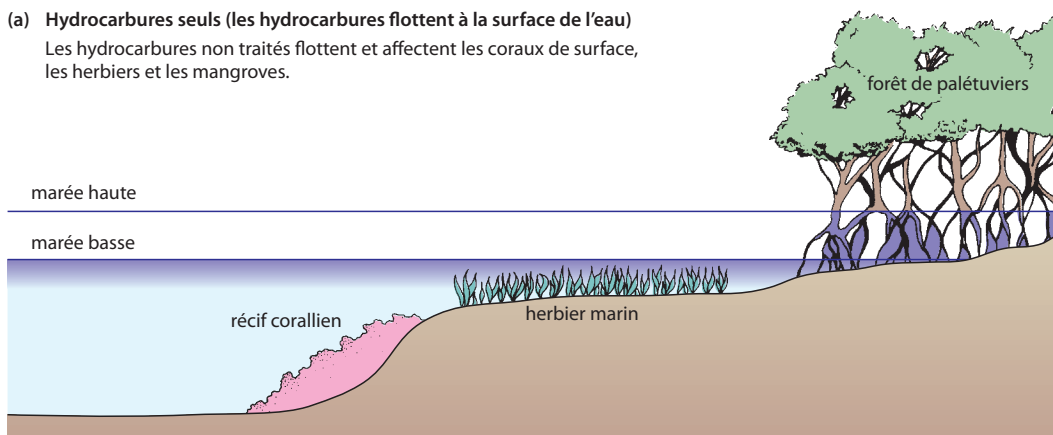
Parfois, il sera nécessaire de prendre des décisions sur la base de compromis entre différentes considérations environnementales et socio-économiques. Il s'agit avant tout de réduire les impacts à long terme en identifiant les situations générant un risque de persistance des hydrocarbures et en évaluant les options de lutte réduisant ce risque. La section sur l'évolution, la persistance et l'élimination naturelle des hydrocarbures (pages 6 à 13) souligne que le processus d'élimination naturelle peut permettre de traiter les hydrocarbures arrivés sur le littoral plutôt rapidement, mais il est souvent inacceptable pour les responsables des ressources économiques affectées de rester inactif pendant si longtemps., alors que Une autre technique d'évaluation consiste à comparer les avantages et les inconvénients de la lutte dans un marais salant souillé qui est utilisé par un grand nombre d'oiseaux, en examinant les risques de destruction du marais et les risques de contamination d'un grand nombre d'oiseaux, et en recherchant une option qui permettra de réduire durablement les deux types de risque.

L'existence dans les mangroves d'un risque élevé d'impacts graves et de la persistance à long terme des hydrocarbures a encouragé l'adoption d'une approche qui recommande parfois l'application de dispersants chimiques sur les hydrocarbures se dirigeant vers une mangrove. Dans certaines situations, lorsque les hydrocarbures ne peut être arrêtés dans leur dérive vers une mangrove, le recours aux produits dispersants peut réduire le niveau global d'impacts même si la profondeur de l'eau est inférieure à la limite généralement recommandée de 10 m et même si des ressources sensibles peuplent la zone subtidale peu profonde. Cette approche a été testée en 1984 des essais sur le terrain du projet TROPICS mis en œuvre à Panama et articulés

Figure 7 Two oil spill situations studied in the 1984 TROPICS experiment in Panama

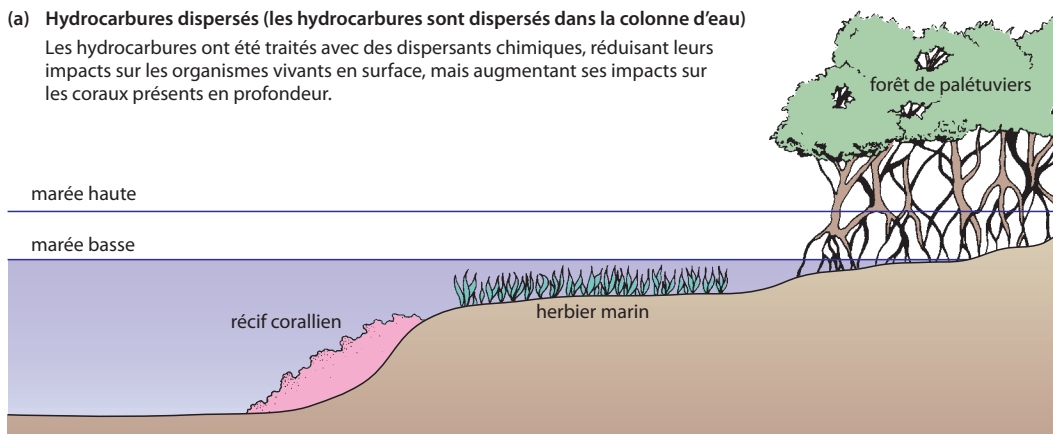
(a) **Hydrocarbures seuls (les hydrocarbures flottent à la surface de l'eau)**

Les hydrocarbures non traités flottent et affectent les coraux de surface, les herbiers et les mangroves.



(a) **Hydrocarbures dispersés (les hydrocarbures sont dispersés dans la colonne d'eau)**

Les hydrocarbures ont été traités avec des dispersants chimiques, réduisant leurs impacts sur les organismes vivants en surface, mais augmentant ses impacts sur les coraux présents en profondeur.



Source : IPIECA

autour de trois sites (chacun représentant une superficie de 1000 m²), composés d'une mangrove littorale et d'herbiers marins et de récifs coralliens lui étant étroitement liés. Ces sites ont été traités respectivement avec un hydrocarbure frais, un hydrocarbure dispersé et sans hydrocarbure (voir figure 7). Des études détaillées sur l'évolution des hydrocarbures, les impacts sur chaque habitat et leur régénération ont été réalisées. Les résultats de cette étude menée il y a déjà 30 ans font état de persistance à long terme (jusqu'à 25 ans) des hydrocarbures dans le site contaminé par des hydrocarbures non dispersés, mais aucun reste de contamination dans le site exposé aux hydrocarbures dispersés trois ans après l'exposition. Des taux de mortalité élevés des palétuviers (toujours visibles après 10 ans) et des impacts visibles à long terme sur la croissance des semis (au-delà de 25 ans) ont été observés dans le site contaminé par des hydrocarbures non dispersés. Alors que les impacts étaient très limités et brefs sur les mangroves du site exposé aux hydrocarbures dispersés. La couverture corallienne, les autres invertébrés coralliens et les poissons territoriaux ont enregistré un bref déclin sur le site exposé aux hydrocarbures dispersés (sur une année), suivi d'une augmentation sur tous les sites. Le recours à une NEBA permet de conclure que les hydrocarbures dispersés par voie chimique ont peut-être des impacts à court terme plus importants sur les ressources subtidales des eaux peu profondes que tout hydrocarbure non dispersé dans une mangrove, mais un impact environnemental global moindre. Cependant, les dispersants ne sauraient être appliqués lorsque l'échange d'eau est faible.

Pour une analyse complète de la méthodologie en question, consultez le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur l'utilisation de la NEBA dans le développement des stratégies de lutte (IPIECA-IOGP, 2015b).

Principales options de nettoyage

Un grand nombre de méthodes de traitement du littoral (« traitement » est ici utilisé pour désigner toutes les méthodes de nettoyage) ont été classées, testées et adaptées à des circonstances spécifiques. La section sur les *références bibliographiques* (pages 48 à 53) fournit des informations et manuels de nettoyage des déversements d'hydrocarbures contenant des descriptions détaillées sur les options disponibles. L'efficacité et les conséquences de toute méthode de traitement du littoral dépendent, dans une large mesure, de la façon dont elle est appliquée et de l'envergure de l'opération. De nombreux impacts potentiels sont liés à l'accès, à l'élimination des déchets et à la perturbation de la faune, cette constatation s'appliquant à toutes les méthodes de lutte énumérées ci-dessous. Le piétinement et l'utilisation de véhicules et de machines lourdes, notamment sur les sédiments meubles, dans les marais et les mangroves, sont susceptibles de générer des dommages physiques, le compactage des sédiments et la destruction des racines. Le piétinement est également susceptible d'enfouir les hydrocarbures dans les sédiments et de prolonger sa persistance. Un certain nombre d'études ont décrit de tels impacts, et notamment la perturbation physique à long terme et l'érosion résultant des opérations agressives de nettoyage des marais de l'île Grande suite au naufrage de l'*Amoco Cadiz* de 1978, la régénération des marais souillés mais non traités étant bien plus rapide. Plus récemment, un marais estuarien a été piétiné et sa régénération retardée par les activités de nettoyage entreprises en 2006 après le sinistre du *Westwood Anette* en Colombie britannique. Les différents manuels de nettoyage fournissent des orientations sur la gestion d'un grand nombre de travailleurs, sur les voies d'accès, les véhicules les plus adaptés, la circulation des sédiments, la réduction et la gestion des déchets, la réduction des perturbations causées à la faune et les autres bonnes pratiques de gestion. Il est vivement recommandé de déterminer le bon moment pour mettre fin aux opérations de nettoyage : cela nécessite de définir des critères de validation prenant en compte l'élimination effective des hydrocarbures ne générant pas d'impact excessif et promouvant la régénération naturelle. Pour en savoir plus, voire le Guide de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP sur les techniques de nettoyage du littoral (IPIECA-IOGP, 2015).

Les photographies ci-dessous illustrent les dommages causés à une mangrove par piétinement (à gauche) et une gestion défectueuse des équipements lourds sur les rives d'un fleuve (à droite) à la suite de deux déversements d'hydrocarbures.



Racines respiratoires des palétuviers piétinées lors du déversement d'hydrocarbures suite au naufrage du *Coatzacoalcos*, au Mexique, en 2005. Les équipes de nettoyage ont éliminé certains débris souillés, mais ont causé des dommages supplémentaires à la mangrove durant le processus.



Un usage trop zélé des véhicules lourds lors du nettoyage du sinistre du *Worthy* en 1989.

Peter Taylor

Les principales méthodes de nettoyage, leurs bénéfices et les impacts potentiels sur les ressources écologiques sont décrits ci-dessous :

- **Ne rien faire en vue d'une élimination naturelle** : aucune activité de nettoyage – cette méthode est habituellement choisie lorsque les impacts des activités de nettoyage sont considérés comme supérieurs aux bénéfices de l'élimination. Cette approche est principalement appliquée aux littoraux faiblement souillés. L'élimination naturelle des hydrocarbures doit être surveillée afin de s'assurer que son impact n'est pas supérieur à celui prévu. Le principal bénéfice de cette méthode est qu'elle ne cause aucun impact lié aux opérations de nettoyage. Néanmoins, les hydrocarbures sont susceptibles de contaminer d'autres ressources (par ex. les oiseaux) mais aussi de persister et de ralentir le processus de régénération de la communauté naturelle, ce qui constitue les principaux inconvénients de la méthode. Évidemment, l'absence apparente d'opérations de lutte clairement définies est susceptible de soulever de nombreux enjeux en termes de relations publiques et nécessitera le soutien des principales parties prenantes.
- **Mise en place de barrages de protection du littoral** : Les barrages flottants peuvent être utilisés afin de détourner les nappes d'hydrocarbures des habitats sensibles du littoral ou pour contenir les hydrocarbures sur une côte afin de favoriser sa régénération subséquente. Il existe un certain nombre d'enjeux pratiques et opérationnels qui peuvent réduire l'efficacité de ces techniques voire même générer certains impacts. Une forte amplitude de marées, et l'action des vagues rendent le recours aux barrages flottants très difficiles, même si cette technique peut dans certaines situations permettre de réduire la contamination de certaines sections du littoral.
- **Utilisation de barrières et de barrages** : Des barrières physiques incluant les barrages, les clôtures et les bermes de terre, peuvent être mises en place sur la côte ou au large afin de prévenir la contamination d'une ressource sensible (par ex. l'entrée d'un lagon) ou pour collecter les hydrocarbures en vue de leur élimination future. Cette option perturbera nécessairement les habitats côtiers sur lesquels seront construites ces installations, et pourrait générer des impacts sur les habitats qui dépendent de leur exposition aux mouvements des marées. Lors du blocage de chéneaux étroits, il est possible de mettre en place un dispositif permettant de faire circuler les eaux sous la surface tout en capturant les hydrocarbures flottants. Il est recommandé de surveiller les conditions prévalant dans les zones situées au-dessus de la barrière, et de rétablir un débit normal des eaux avant que les conditions se détériorent en-dessous des limites acceptables.
- **Élimination non invasive des hydrocarbures et des débris souillés libres** : l'élimination des hydrocarbures libres, sans éliminer ou perturber le principal substrat ou le biote caractéristique des habitats, constitue le principal objectif de la plupart des options de lutte sur le littoral. Dans sa forme la plus simple, cette méthode ne requière pas plus d'une personne munie d'un sac en plastique et de la tenue appropriée, qui ramassera les boulettes de goudron et les débris souillés. Cependant, un certain nombre de produits, d'outils et de machines dont l'utilisation peut être manuelle ou mécanique, incluant des absorbants, des racleurs, des décapeurs, des dispositifs d'aspiration (aspirateurs) et des machines de nettoyage des plages, ont été développés. L'élimination des hydrocarbures libres réduit le risque de remobilisation et de contamination des autres ressources et peut favoriser la régénération des habitats souillés. Dans de nombreuses situations, ces avantages surpassent largement les inconvénients. Cependant, dans d'autres situations, les impacts potentiels sont liés à l'accès au littoral et à la perturbation de la faune. Le recours aux absorbants augmente en outre la quantité de déchets devant être traitée.
- **Remaniement et déplacement des sédiments** : ces méthodes favorisent le nettoyage naturel du sédiment sous l'action des vagues et des courants, via le remaniement, le morcellement ou le déplacement du sable, des cailloux et des galets contaminés. Le déplacement peut nécessiter d'excaver et de transférer les sédiments souillés de la partie supérieure de la côte vers la partie basse de la côte où l'action des vagues est plus importante (nettoyage dans la zone déferlement, surf washing). et leur persistance est peu probable. Certains hydrocarbures sont susceptibles de se remobiliser pour contaminer d'autres ressources. Lorsque



Zengel, S. and Michel, J., 2013



Zengel, S. and Michel, J., 2013

Ci-dessus : le sinistre du Macondo survenu en 2010 a entraîné le souillage de marais salants dans certaines zones de la baie de Barataria, en Louisiane. Des séries d'essais des différentes méthodes de traitement des marais ont été réalisées le terrain et les résultats surveillés. L'accès au marais affecté, sans causer de dommages supplémentaires aux sédiments vaseux, a été facilité par la proximité des canaux et l'utilisation de barges à faible tirant d'eau, d'hydroglisseurs et de passerelles en planches. Les essais ont montré que le raclage associé au coupage manuel a permis d'éliminer de manière efficace les tapis de végétation souillée, et a favorisé la régénération du marais et des populations de crabes violonistes. La replantation des zones traitées avec des plantes marécageuses a permis d'accélérer la régénération (voir page 43) Cependant, la régénération naturelle a été considérée comme l'approche privilégiée pour la majorité des marais souillés à la suite de ce déversement.

cette méthode est mise en œuvre de manière appropriée, les impacts potentiels générés par la perturbation des habitats, l'enfouissement des organismes et l'augmentation temporaire de l'envasement sont limités, mais dépendront surtout des communautés présentes.

- **Élimination physique des substrats ou du biote fixes contaminés** : ce qui peut inclure des méthodes invasives d'excavation ou de raclage des sédiments souillés ou de coupage/retrait des algues ou des plantes. Alors que l'élimination des hydrocarbures réduit le risque de remobilisation et de contamination des autres ressources, l'élimination du substrat ou de la végétation pourrait générer des impacts significatifs sur les habitats et ralentir la régénération des communautés naturelles. L'élimination des sédiments peut dans certaines situations déclencher une érosion de l'arrière-plage. Afin de réduire la contamination plus rapidement que les processus naturels ne le permettent, la méthode employée devra permettre d'éliminer la quantité minimale de sédiment ou de végétation nécessaire. Le réapprovisionnement (parfois appelé rechargement) en sédiment importés sur la plage depuis d'autres zones, souvent dragués au large, est réalisé régulièrement sur certaines plages de loisirs populaires, mais ne constitue pas une méthode adaptée à toutes les plages.
- **Nettoyage à basse pression** : ces méthodes de nettoyage consistent à pomper et projeter de l'eau sur les habitats du littoral contaminé afin d'éliminer les hydrocarbures. Il existe plusieurs approches, se différenciant principalement en termes de volume et de pression des eaux pompées, et parfois en termes de température et de type d'eau. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour récupérer les hydrocarbures qui sont alors remobilisés, la plupart d'entre elles impliquant de renvoyer les hydrocarbures dans l'eau où il pourra être plus facilement confiné et récupéré. Dans de nombreuses situations, ces méthodes peuvent être utilisées pour mobiliser et récupérer des quantités importantes d'hydrocarbures sans générer des impacts significatifs sur les habitats. Cependant, les hautes pressions ou les quantités élevées d'eau sont relativement agressives et sont susceptibles de causer la destruction du sédiment, la modification de la nature du sédiment via la perte de particules fines, l'enfouissement des organismes, l'érosion des surfaces rocheuses planes et l'élimination des plantes et des animaux ainsi que l'augmentation temporaire de l'envasement. L'utilisation de l'eau chaude pour favoriser la démobilité d'hydrocarbures

plus visqueux et l'utilisation de d'eau douce plutôt que d'eau de mer pourrait générer des cas de mortalité supplémentaires. La mise en place de tranchées, ou de barrages pour concentrer les hydrocarbures peut également générer des impacts supplémentaires.

- **Brûlage contrôlé in-situ de la végétation contaminée** : dans certains marais contaminés, un brûlage « contrôlé » peut permettre l'élimination de quantités importantes d'hydrocarbures et la régénération de la végétation plus rapidement que cela aurait été le cas dans le cadre des seuls processus naturels. Cependant, l'efficacité du brûlage et les impacts potentiels sur les communautés marécageuses peuvent dépendre de plusieurs facteurs, y compris la période de l'année (de préférence en hiver), les espèces de plante, le type de sol (les sols tourbeux sont sujets à des dommages importants), le niveau d'eau (de préférence > 10 cm au-dessus du sédiment) et le type d'hydrocarbure. Certains brûlages ont permis une régénération rapide, alors que dans d'autres cas, la régénération des habitats a nécessité plusieurs années. En outre, il peut s'avérer difficile de contrôler un brûlage. De nombreux brûlages s'étant propagés bien au-delà des zones contaminées. Le brûlage contrôlé entrainera également la mort des animaux peuplant le marais qui ne sont pas protégés par une quantité suffisante d'eau ou de sédiments, en plus de créer de grandes quantités de fumée noire pouvant affecter les ressources locales. Un exemple de brûlage in-situ efficace ayant favorisé la régénération a été mis en œuvre après le déversement de plus de 5 000 tonnes d'hydrocarbures à la suite d'une fuite sur une installation pétrolière en Louisiane, causé par l'ouragan Katrina (voir les photographiques ci-dessus, à droite). Le brûlage a permis d'éliminer de 80 à 90 % de la contamination, la productivité en surface et souterraine du marais ayant été rétablie en l'espace d'un cycle de croissance.



US EPA, 2006



US EPA (2006)

Ci-dessus : brûlage in-situ d'un marais contaminé en Louisiane, à la suite de l'ouragan Katrina ; (en haut) après une heure de brûlage ; et (en bas) 5 mois après le brûlage.



Le nettoyage à haute pression permet d'éliminer les hydrocarbures mais a également le potentiel d'éliminer les organismes vivants. Le recours à cette méthode dépend au moins en partie de la vitesse de régénération prévue. La régénération de la communauté dominée par les balanes sur la gauche a nécessité moins de deux ans, en raison de l'installation annuelle de larves de balanes provenant du plancton. La régénération des lichens oranges sur la droite s'est avérée limitée ou nulle après dix ans, en raison de la lenteur de la croissance et de la recolonisation.

Dans certains cas, le traitement des résidus d'hydrocarbures à l'aide d'agents chimiques peut s'avérer approprié, notamment dans les zones de loisirs.



le lichen) attachés à la zone traitée et peuvent parfois entraîner l'effritement de la surface des substrats meubles ou friables. Il est recommandé d'avoir recours aux absorbants ou aux autres méthodes pour récupérer les hydrocarbures ainsi remobilisés. Les bénéfices écologiques sont plutôt limités sauf lorsque les résidus de goudrons potentiels couvrent les parties supérieures de la côte rocheuse à l'abri des vagues et empêchent ainsi la colonisation du biote.

- **Traitement par agents chimiques** : un certain nombre d'agents chimiques sont conçus pour être utilisés lors des opérations de nettoyage du littoral, incluant les agents de nettoyage de surface, les formules de dispersants et les agents solidifiant. Il s'agit également de techniques de « nettoyage fin » qui sont principalement utilisées pour éliminer des quantités relativement faibles d'hydrocarbure vieilli depuis les substrats solides dans les zones de loisirs. Elles peuvent en outre avoir des bénéfices semblables dans les parties supérieures des côtes rocheuses à l'abri des vagues. Les hydrocarbures remobilisés peuvent être dispersés ou flottants à nouveau, en fonction de l'agent chimique utilisé. Les hydrocarbures dispersés génèrent des concentrations élevées en hydrocarbures dans les eaux littorales et favorise la pénétration des hydrocarbures dans les sédiments des plages, bien qu'il s'agisse probablement d'effets limités dans le temps. Les agents de nettoyage de surface, qui soulèvent et font flotter les résidus d'hydrocarbure, sont généralement privilégiés.
- **Bioremédiation** : La principale approche de bioremédiation est la *biostimulation* dans le cadre de laquelle les éléments nutritifs (des fertilisants incluant généralement des formules de nitrates et de phosphates) sont appliqués afin d'accélérer les processus de dégradation microbienne naturelle. L'ajout excessif d'éléments nutritifs dans la zone affectée peut générer un risque d'eutrophisation (simulation excessive de la croissance des plantes). La réalisation d'un test de toxicité du produit de bioremédiation peut s'avérer appropriée. La *bioaugmentation* implique l'ajout de microorganismes décomposant les hydrocarbures dans une zone souillée dans le cas où les populations naturelles seraient considérées insuffisantes. Elle est utilisée régulièrement en cas de contamination des terres, mais s'est révélée inefficace sur les habitats des littoraux.

La première analyse des bénéfices écologiques et économiques en fonction des options de lutte envisagées a été réalisée après le naufrage de l'*Exxon Valdez* en 1989 dans la Baie du Prince William, en Alaska. Elle a notamment permis de se demander s'il était approprié d'utiliser des méthodes intensives de traitement du littoral afin d'éliminer les hydrocarbures qui avait pénétré les sédiments poreux de certaines côtes à des profondeurs allant jusqu'à un mètre. Le traitement proposé impliquait l'excavation des sédiments contaminés du littoral (des galets et des cailloux principalement), pour les laver au moyen de dispositifs de traitement monté sur barge et les replacer sur la plage. Cependant, la NEBA a conclu que le processus de déplacement du sédiment en vue de son remplacement aurait des impacts environnementaux surpassant considérablement les impacts générés par une régénération naturelle.

Conclusions

D'un point de vue écologique, la meilleure façon de favoriser le processus de régénération consiste généralement à éliminer une quantité maximale des hydrocarbures libres sans causer de perturbation physique majeure aux habitats, et de laisser le reste être nettoyé dans suivant les processus naturel. Cependant, il est possible que cette approche soit modifiée si la NEBA concluait que d'autres enjeux sont prioritaires.

Restauration environnementale du littoral

Dans certaines situations, les dommages causés au littoral par les hydrocarbures et/ou les activités de nettoyage peuvent justifier certaines formes de restauration (c'est-à-dire des actions supplémentaires au-delà du nettoyage) permettant d'accélérer la régénération. Certaines méthodes de restauration ont été éprouvées, testées, développées et adaptées et peuvent être classées en méthodes directes ou indirectes. Les méthodes directes impliquent une manipulation directe de l'habitat ou des populations touchées. Les méthodes indirectes favorisent la régénération naturelle de l'habitat endommagé en réduisant les autres stress auxquels il est exposé. Une approche alternative à la restauration consiste à compenser les impacts en remplaçant certains des services perdus fournis par l'habitat à d'autres endroits de la zone en question. De manière générale, ceci implique la création de nouveaux habitats ou la régénération d'habitats déjà affectés sur le littoral (généralement dans les zones humides) dans une zone côtière située dans la même région que l'habitat souillé dont la valeur écosystémique est réputée défailante. Cette méthode de compensation est utilisée dans certains pays pour pallier aux impacts sur les écosystèmes naturels et les services qu'ils proposent.

Les exemples de restaurations directes de littoraux souillés les plus réussies concernaient des marais salants et des mangroves. Une expérience considérable a été acquise en matière de régénération des zones humides dans de nombreuses régions du monde, plusieurs techniques ayant été mises au point afin de restaurer les équilibres hydrodynamiques, stimuler la recolonisation naturelle, replanter les sols nus, prévenir l'érosion et protéger les plantes restantes. La replantation des zones contaminées n'est pas toujours nécessaire mais est souvent réalisée dans le cadre d'un programme plus global, habituellement à l'aide de semis cultivés en pépinière. Cela est possible dans la mesure où ces deux habitats sont largement dominés par un petit nombre d'espèces de plantes qui se propagent rapidement. Le succès de la replantation n'est pas garanti, particulièrement s'il ne s'est pas passé assez de temps pour que la toxicité du sédiment diminue. La mise en place d'un programme progressif de plantation en plusieurs étapes peut s'avérer nécessaire. Il existe de nombreux exemples de programmes de restauration des marais salants souillés par des déversements d'hydrocarbures (par ex. *Amoco Cadiz*, Bretagne, 1978 ; le déversement du pipeline d'Exxon Bayway, New York, 1990 ; et le déversement de Chalk Point, Maryland, 2000) et des mangroves (pa ex. Baha las Minas, 1986 ; déversement de la raffinerie de Cartagena, Colombie, 1990 ; et Baie de Guanabara, Rio de Janeiro, 2000).

La replantation des marais salants suite au déversement du pipeline d'Exxon Bayway survenu en 1990 a été réalisée afin de stopper l'érosion des surfaces et la perte des plantes marécageuses. La survie des jeunes pousses et des pousses transplantées de *Spartina* a varié d'un site à l'autre. Trois ans après la plantation, la biomasse de surface sur deux des trois sites replantés était comparable à la biomasse des sites de référence, cependant, le niveau de survie est resté bas au sein du troisième site en raison, au moins partiellement, de l'action des vagues générée par le passage des navires.

La replantation des mangroves souillées à Panama, lors du déversement du Baha en 1986, s'est avérée dans un premier temps inefficace en raison de la toxicité résiduelle aiguë des sédiments contaminés. Un second programme de replantation s'est révélé plus efficace, mais après six ans, la densité des arbres était plus élevée dans les zones recolonisées naturellement, et il est possible que la replantation n'ait pas été nécessaire. L'érosion des jeunes plants, replantés ou ayant repoussé naturellement, aurait pu être réduite au moyen de mesures de protection.

*Mangroves restaurées
16 ans après la
plantation, à la suite
du déversement
d'hydrocarbures de
Bahia las Minas de 1986.*



Rene Bernier, Chevron

Des jeunes plants de palétuviers, à côté de Bangkok, en Thaïlande, plantés dans le cadre d'un projet de restauration suite à un déversement d'hydrocarbures.



La restauration des marais halophytes saoudiens gravement affectés par le déversement de la guerre du Golfe de 1991 est toujours en cours. Elle vise à favoriser la circulation des eaux vers les zones marécageuses en dégageant et débloquent les chéneaux, en stimulant la recolonisation naturelle des crabes fouisseurs et en décompactant le sédiment. Elle vise également à favoriser la repousse de la végétation marécageuse via la plantation d'halophytes vivaces. Les activités de restauration ont eu des résultats encourageants mais nécessiteront plusieurs années.

L'érosion du littoral est parfois amplifiée sur les zones qui ont déjà été impactées par les déversements d'hydrocarbure et les activités de lutte. Plusieurs techniques de restauration ont été conçues pour réduire de tels effets, notamment la technique des « littoraux vivants » qui implique généralement l'utilisation de brise-lames naturels et/ou artificiels pour stabiliser le littoral affecté et réduire l'action des vagues. De telles structures peuvent également fournir un habitat aux crustacés.

Évaluation et surveillances des littoraux souillés

Une composante essentielle des opérations de lutte contre les déversements d'hydrocarbure consiste à décrire le devenir et la distribution des hydrocarbures, les effets générés et le potentiel de régénération des ressources affectées. Ces informations sont utilisées pour : la planification des activités de nettoyage, l'évaluation du niveau de contamination des habitats et du biote (notamment ceux destinés à la consommation humaine), l'évaluation des impacts sur les communautés naturelles et les populations d'espèces sauvages, la gestion des ressources affectées, la préparation des demandes en indemnisation, et la communication avec le public.

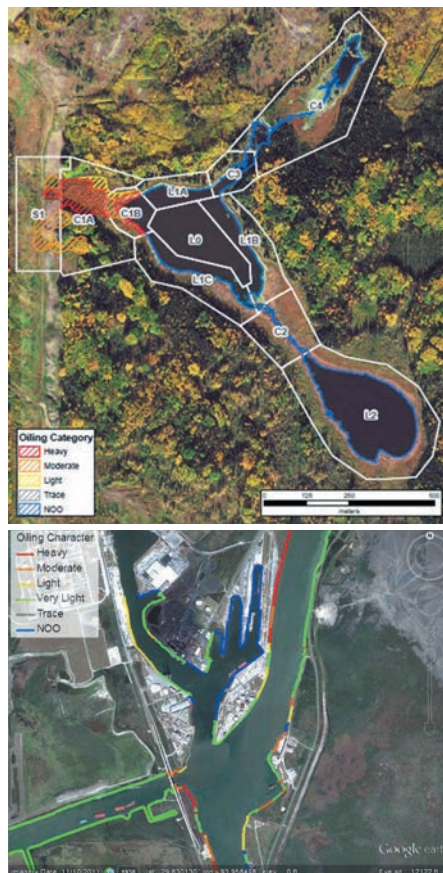
Des lignes directrices générales sur l'évaluation des dommages causés par les déversements d'hydrocarbures ont été publiées dans le Guide de bonnes pratiques de l'IEPCA-IOPG sur les impacts des déversements d'hydrocarbures sur l'environnement marin (IEPCA-IOPG, 2015a). D'autres guides détaillés sont disponibles dans certains pays et certaines régions. L'IMO/PNUE a publié un document d'orientation de portée internationale (IMO/UNEP 2009). Les principales activités d'évaluation applicables au littoral sont abordées ci-dessous.

Distribution et quantification des hydrocarbures contaminant le littoral

L'arrivage des hydrocarbures sur le littoral après un déversement est en principe très fragmentaire. Certaines ressources sont susceptibles d'être gravement affectées, alors que les ressources adjacentes ou situées à proximité peuvent demeurer intactes. Les informations sur la quantité et la distribution des hydrocarbures arrivés à la côte sont dès lors essentielles en vue de la planification des opérations de lutte sur le littoral, et alimenteront les études futures sur les impacts et la régénération.

Les études réalisées à l'aide de la technique d'évaluation de la pollution du littoral en vue du nettoyage (SCAT) sont des études soigneusement structurées sur l'épaisseur, la nature et la distribution des hydrocarbures sur certaines sections du littoral, au moyen de formulaires standardisés et d'un personnel d'enquête dûment formé. Ces études sont généralement réalisées conjointement par des spécialistes environnementaux et du personnel de l'équipe de lutte et pourront être utilisées pour suivre les effets du traitement du littoral ou de la régénération naturelle. Outre la description de la distribution de l'hydrocarbures, les études SCAT peuvent également fournir des données précieuses sur les impacts les plus évidents, par ex. la faune morte, tordue ou visiblement souillée et les algues blanchies, qui peuvent constituer des états transitoires. Les études SCAT sont également conçues pour fournir des informations et des recommandations afin d'aider aux décisions en matière de traitement des plages et des ressources. Les recommandations ainsi formulées peuvent devenir une composante importante de la NEBA. Pour plus d'informations sur les techniques SCAT, consultez le Guide de bonnes pratiques de l'IEPCA-IOPG sur les techniques d'évaluation de la pollution du littoral en vue du nettoyage.

La quantification de l'exposition des communautés et de la faune du littoral aux hydrocarbures peut être réalisée dans le cadre d'une analyse chimique de l'eau, des sédiments et du biote, et d'opération d'échantillonnage généralement mises en œuvre à des intervalles de temps réguliers afin de



Des cartes SCAT présentant le statut de contamination du littoral : (en haut) une zone humide contaminée (segments en forme de polygone) et les berges d'un lac (segments linéaire) ; et (en bas) des segments linéaire du littoral sur une voie commerciale.

fournir des informations sur la durée d'exposition et afin de suivre l'évolution. Il convient en principe d'adopter une approche d'échantillonnage par étage qui fournira des données représentatives et objectives sur chaque ressource, à différentes hauteurs par rapport aux marées et pour différentes catégories de contamination, sur le fondement des données SCAT. Lorsque c'est possible, des échantillons de référence devront être prélevés depuis les côtes avant que les hydrocarbures déversés n'atteignent le littoral. Les échantillons prélevés avant le déversement peuvent s'avérer très précieux si stockés de manière appropriée. Des procédures rigoureuses d'échantillonnage doivent être mises en place pour s'assurer de l'absence d'autres contaminations depuis d'autres sources et garantir le traitement et le transport futurs des échantillons vers les laboratoires d'analyse et afin de se conformer aux procédures strictes de traçabilité.

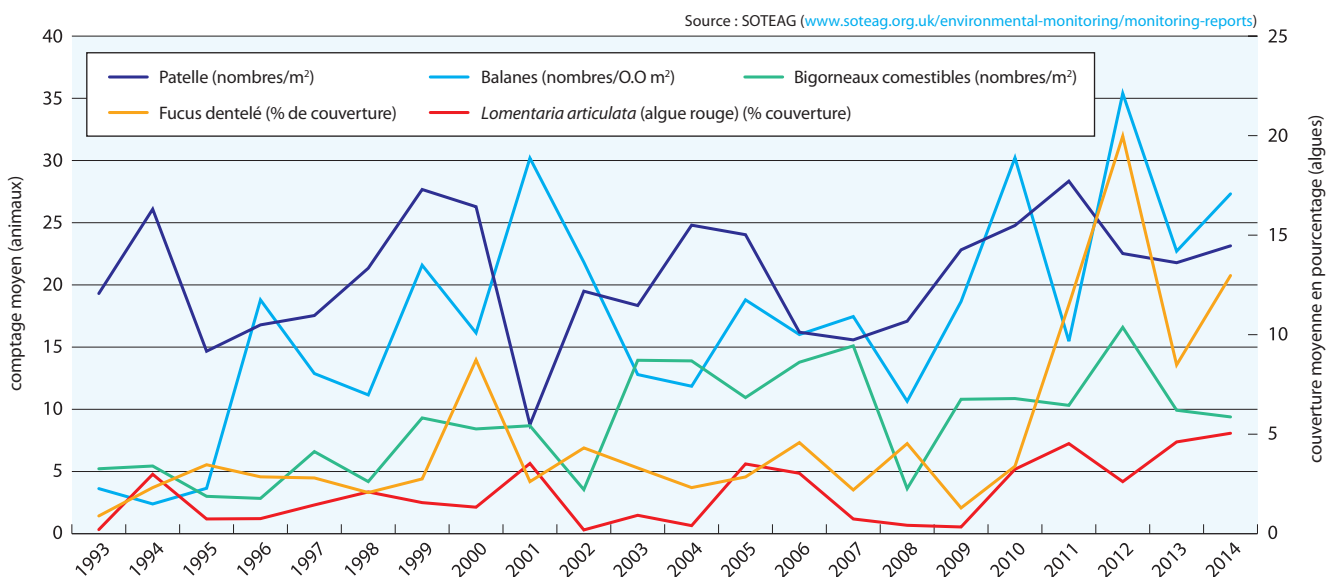
La sélection du biote littoral pour les analyses des concentrations en hydrocarbures dans les tissus dépend de l'habitat et des ressources concernés. Cependant, les bivalves, et notamment les moules, présents en quantités suffisantes et durables, sont généralement prélevés dans la mesure où il s'agit d'organismes filtreurs sessiles et d'importants bio-accumulateurs des hydrocarbures. La surveillance des concentrations dans les tissus permet de mettre en place des indicateurs utiles, intégrés au fil du temps et fournissant des informations sur le niveau d'exposition lors du déversement et le retour aux concentrations naturelles.

Ci-dessous : fluctuations des populations de cinq espèces sélectionnées enregistrées sur une période de 21 ans qui sont considérées comme naturelles et qui reflètent l'incertitude inhérente aux tentatives de détermination de l'ampleur et de la portée des impacts sur les ressources biologiques.

Évaluation et surveillance des impacts sur les communautés et le biote

La description de la distribution et du niveau de contamination par les hydrocarbures peut constituer une opération coûteuse et fastidieuse, les résultats devant être dûment contrôlés et interprétés. Cependant, elle permet de fournir des informations pertinentes sur les effets indésirables sur l'environnement. Ce n'est cependant pas le cas de nombreuses études relatives aux ressources biologiques et écologiques. La plupart des descriptions et des études de cas visées dans la section sur les impacts écologiques des hydrocarbures sur les littoraux (pages 14–35) emploient des termes qui reflètent un certain niveau d'incertitude quant à la portée de l'impact sur une ressources biologique, ou sur l'existence même de l'impact. Ceci s'explique par une

Figure 8 Fluctuations annuelles du nombre moyen d'espèces sélectionnées*



* Enregistré sur 15 sites de suivi à proximité du terminal pétrolier de Sullom Voe, Shetland Islands. Toutes les fluctuations enregistrées sont considérées comme naturelles.

incertitude latente. Les niveaux élevés de variabilité naturelle (fluctuations temporaires et dispersion spatiale) et les nombreuses autres causes potentielles de stress environnemental (facteurs de confusion) rendent souvent difficile l'interprétation des données biologiques et écologiques. Des lignes directrices sur l'évaluation des impacts soulignent souvent la quasi-impossibilité d'obtenir une preuve statistique et le risque d'interprétation erronée, pouvant mener à la détection d'un impact inexistant ou à la non-détection d'un impact réel.

Les connaissances sur la biologie et l'écologie de la plupart des espèces marines sont limitées, la nature accidentelle de tout déversement d'hydrocarbure empêchant tout contrôle expérimental. Le concept des programmes d'évaluation et de surveillance des impacts doit dès lors prendre en compte ces facteurs et les enseignements tirés des études antérieures. Lorsque c'est possible, les études d'évaluation doivent déterminer les conditions de référence et les changements dans les conditions naturelles du littoral avant le déversement. Que ce soit possible ou non, les études d'évaluation doivent viser à :

- établir le niveau d'exposition des communautés ou des ressources littorales aux hydrocarbures ;
- décrire un mécanisme réaliste (cheminement) expliquant la survenance de l'impact ;
- décrire l'impact, au moyen d'un ensemble de données collectées depuis les sites affectés et non affectés, dans la mesure où les conditions logistiques le permettent ;
- décrire le processus de régénération ; et
- fournir plusieurs ensembles de preuve pour chacun des processus.

Les preuves provenant de seulement un ou deux sites sont intrinsèquement faibles. La littérature publiée sur la régénération, et notamment la régénération à long terme, demeure relativement limitée, ce qui constitue un des travers de la lutte contre les impacts des déversements d'hydrocarbures. Très peu d'études ont duré plus d'un an ou deux.

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.

IPIECA-IOGP (2014). *A guide to oiled shoreline assessment (SCAT) Surveys*. Série de guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP, Projet de coopération industrielle dans le cadre de la lutte contre la pollution par les hydrocarbures (OSR-JIP). Rapport 504 de l'IOGP. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015). *A guide to shoreline clean-up techniques*. Série de guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). Rapport 521 de l'IOGP. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015a). *Impacts of oil spills on marine ecology*. Série de guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). Rapport de l'IOGP 525. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA/IOGP (2015b). *Élaborer une stratégie de lutte sur le fondement d'une analyse des avantages environnementaux nets (NEBA)*. Série de guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP, Oil Spill Response Joint Industry Project (OSR-JIP). Rapport de l'IOGP 527. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA-IOGP (2015c). *Oil spills: inland response*. Série de guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP, déversement d'hydrocarbures Projet de coopération industrielle dans le cadre de la lutte contre la pollution par les hydrocarbures (OSR-JIP). Rapport de l'IOGP 514. <http://oilspillresponseproject.org>

IPIECA/IMO/IOGP (2012). *Sensitivity mapping for oiled spill response*. Série de guides de bonnes pratiques de l'IPIECA-IOGP, Projet de coopération industrielle dans le cadre de la lutte contre la pollution par les hydrocarbures (OSR-JIP). Rapport de l'IOGP 477. <http://oilspillresponseproject.org>

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. Révisé en 2010; réédité en 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. Révisé en 2010; réédité en 2013.

NOAA (2013). *NOAA Shoreline Assessment Manual. 4th Edition*. U.S. Dept. of Commerce. Seattle, WA: Emergency Response Division, Office of Response and Restoration, National Oceanic and Atmospheric Administration. 73 p + annexes.

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, Numéro 6, pp. 1192–1222.

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

Baca, B. J., Lankford, T. E., Gundlach, E. R. (1987). Recovery of Brittany coastal marshes in the eight years following the *Amoco Cadiz* incident. Proceedings of the 1987 International Oil Spill Conference. In *International Oil Spill Conference Proceedings: Avril 1987*, Vol. 1987, No. 1, pp. 459–464. doi: <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-1987-1-459>

Baker, J. M. (1999) Ecological effectiveness of oil spill countermeasures: how clean is clean? In *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 71, No. 1, pp. 135–151.

Baker, J. M., Clark, R. B., Kingston, P. F. et Jenkins, R. H. (1990). *Natural Recovery of Cold Water Marine Environments After an Oil Spill*. Présenté au treizième séminaire annuel Arctic and Marine Oil spill Program Technical Seminar, Juin 1990, 111 pp.

Boehm, P. D., Page, D. S., Brown, J. S., Neff, J. M., Bragg, J. R. et 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, Numéro 24, pp. 9210–9216.

Boehm, P. D., Page, D. S., Brown, J. S., Neff, J. M. et Gundlach, E. (2014). Long-Term Fate and Persistence of Oil from the *Exxon Valdez* Oil Spill: Lessons Learned or History Repeated? In *International Oil Spill Conference Proceedings: Mai 2014*, Vol. 2014, No. 1, pp. 63–79. doi: <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-2014.1.63>

DeMicco, E., Schuler, P. A., Omer, T. et Baca, B. (2011). Net Environmental Benefit Analysis (NEBA) of Dispersed Oil on Nearshore Tropical Ecosystems: Tropics – the 25th Year Research Visit. In *International Oil Spill Conference Proceedings: Mars 2011*, Vol. 2011, No. 1, pp. abs282. doi: <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-2011-1-282>

Hale, J. A., Cormack, C. D., Cotsapas, L., Montello, T. M., Langman, O., Gabriel, J. J. et Michel, L. (2011). Relationships Between Key Indicators of Environmental Condition and Degrees of Oiling in Sediments in Salt Marsh Habitats: a Balance Between Contamination and Ecological Recovery by Natural Processes. In *International Oil Spill Conference Proceedings: Mars 2011*, Vol. 2011, No. 1, pp. abs213. doi: <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-2011-1-213>

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

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

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.

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.

Michel, J., Nixon, Z., Dahlin, J., Betenbaugh, D., White, M., Burton, D. and Turley, S. (2008). *Monitoring of Recovery of Marshes Impacted by the Chalk Point Oil Spill*. NOAA Office of Response & Restoration, Silver Spring, MD. 68 pp. + appendices.

Michel, J. et Rutherford, N. (2014). Impacts, recovery rates, and treatment options for spilled oil in marshes. In *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 82, Issues 1–2, pp. 19–25.

[doi:10.1016/j.marpolbul.2014.03.030](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.030)

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.

Moore, J. (2013). *Sullom Voe rocky shore transects monitoring, 1976 to 2012: summary of survey methods and database*. A report to SOTEAG from Aquatic Survey & Monitoring Ltd., Cosheston, Pembrokeshire. 16 pp + iii.

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 (1992). *An Introduction to Coastal Habitats and Biological Resources*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Report No. HMRAD 92-4
<http://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/Monterey.pdf>

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.

- Owens, E. H. et Sergy, G. A. (2003). Treatment and Cleanup Standards: The Development of End-Point Criteria for Oil Spills. In *International Oil Spill Conference Proceedings*: Avril 2003, Vol. 2003, No. 1, pp. 1163–1169. doi: <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-2003-1-1163>
- 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.
- 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., Oregioni, 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.
- Reddy, C. M., Eglinton, T. I., Hounshell, A., White, H. K., Xu, L., Gaines, R. B. et Frysinger, G. S. (2002). The West Falmouth oil spill after thirty years: The persistence of petroleum hydrocarbons in marsh sediments. In *Environmental Science and Technology*, Vol. 36, Issue 22, pp. 4754–4760.
- 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.
- Sell, D., Conway, L., Clark, T., Picken, G. B., Baker, J. M., Dunnet, G. M., McIntyre, A. D. and Clark, R. B. (1995). Scientific Criteria to Optimize oil spill Cleanup. In *International Oil Spill Conference Proceedings*: February–March 1995, Vol. 1995, No. 1, pp. 595–610. doi: <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-1995-1-595>
- Shigenaka, G. (2014). *Twenty-Five Years after the Exxon Valdez Oil Spill: NOAA's Scientific Support, Monitoring, and Research*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Office of Response and Restoration. 78 pp. http://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/Exxon_Valdez_25YearsAfter_508_0.pdf
- US EPA (2006). *Cooperative Efforts to Use In-situ Burning in Empire, LA, in an Intermediate Marsh Following Hurricanes Katrina and Rita*. Amy Merten, Ph.D., NOAA Scientific Support/Biological Assessment. US Environmental Protection Agency Archive Document, Office of Solid Waste and Emergency Response (OSWER), Office of Emergency Management.
- 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.
- Zengel, S. et Michel, J. (2013). *Deepwater Horizon Oil Spill: Salt Marsh Oiling Conditions, Treatment Testing, and Treatment History in Northern Barataria Bay, Louisiana (Interim Report October 2011)*. U.S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 42. Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA. 74 pp. http://response.restoration.noaa.gov/deepwater_horizon
- Zengel, S., Bernik, B. M., Rutherford, N., Nixon, Z. et Michel, J. (2015). Heavily Oiled Salt Marsh following the *Deepwater Horizon* Oil Spill, Ecological Comparisons of Shoreline Cleanup Treatments and Recovery. In *PLoS ONE*, Vol. 10, No. 7: e0132324. doi:10.1371/journal.pone.0132324.

Sites internet utiles

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: <https://www.cefas.co.uk/premiam/publications>

Remerciements

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

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 au sein de l'industrie permet à ses membres de traiter efficacement les enjeux clés en matière environnementale et sociale.

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. L'IOGP intervient de manière tout aussi importante dans la promotion des meilleures pratiques, notamment en matière de santé, de sécurité, d'environnement et de responsabilité sociale.

www.iogp.org

